ISSN 0207-2564

FEDERAL SERVICE
ON HYDROMETEOROLOGY
AND ENVIRONMENTAL
MONITORING

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

INSTITUTE OF GLOBAL CLIMATE AND ECOLOGY

PROBLEMS OF ECOLOGICAL MONITORING AND ECOSYSTEM MODELLING

Volume XXV

MOSCOW – 2013

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том XXV

МОСКВА – 2013

УДК 576(06)470 ББК 20.18 (2Рос)

Редакционная коллегия: академик РАН, проф. Ю.А. Израэль (председатель); д.ф.-м.н., проф. С.М. Семенов (зам. председателя); д.б.н., проф. В.А. Абакумов; д.ф.-м.н., проф. Г.В. Груза; к.б.н. Г.Э. Инсаров; д.б.н. В.В. Ясюкевич (ответственный секретарь).

Адрес: ул. Глебовская, д. 20Б, 107258, Москва, РОССИЯ
Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Факс: +7 499 160-08-31, тел.: +7 499 169-11-03

Все статьи данного издания рецензируются.

Представлены работы, посвященные мониторингу и оценке ответной реакции природных систем на антропогенные воздействия регионального, континентального и глобального масштабов, в том числе на загрязнение атмосферы и изменение климата. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований, а также математические модели процессов.

Для климатологов, биологов и экологов широкого профиля.

Editorial Board: Member of the Russian Academy of Sciences, Prof. Yu.A. Izrael (Chairman); Prof. S.M. Semenov (Vice-Chairman); Prof. V.A. Abakumov; Prof. G.V. Gruza; Dr. G.E. Insarov; Dr. V.V. Yasukevich (Executive Secretary)

Address: 20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, RUSSIA
Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS
Fax: +7 499 160-08-31, Phone: +7 499 169-11-03

All papers published in this book are peer-reviewed.

The issues of monitoring and assessment of Earth's systems' response to anthropogenic impacts of regional, continental and global scale, in particular, to air pollution and climate change, are considered. The results of experimental studies as well as mathematical models of processes are presented.

The book is of interest for climatologists, biologists and environmentalists.

ISSN № 0207-2564

© Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2013

Содержание

А.П. Ревокатова, А.Г. Рябошапко. Ранжирование негативных побочных эффектов применения геоинженерии климата по степени опасности 9

С.М. Семенов, Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, И.О. Попов, С.Н. Титкина. Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления 29

Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, Л.К. Клещенко, В.Д. Смирнов. О пространственном осреднении в задачах мониторинга климата 42

М.Ю. Бардин, Т.В. Платова. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления 71

Э.В. Рочева, В.Д. Смирнов. О тенденциях в изменении продолжительности «волн тепла» на территории России 94

Е.А. Черенкова. Возможное изменение увлажнения равнин России в середине XXI века 115

В.А. Кокорев, О.А. Анисимов. Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России 131

М.Д. Ананичева, А.Н. Кренке-мл. Новые оценки и элементы прогноза состояния ледников хребта Орулган 154

Е.Н. Попова, И.О. Попов. Климатические факторы, определяющие границы ареалов вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений, и расчетные методы оценки изменения ареалов при изменении климата..... 175

Л.Ю. Новикова, И.Г. Лоскутов, Е.В. Зуев, О.Н. Ковалева, Е.А. Пороховинова, А.М. Артемьева, С.Д. Киру, Е.В. Рогозина. Анализ динамики хозяйственно ценных признаков сельскохозяйственных культур на северо-западе Российской Федерации в условиях изменения климата 205

И.А. Шульгин. Энергетический баланс и физиологические критерии продуктивности посевов сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата 224

А.Н. Золотокрылин, Е.А. Черенкова. Тенденции увлажнения зернового пояса России в начале XXI века 251

А.Н. Полевой, В.В. Синицына. Моделирование развития зерновых культур на ранних этапах онтогенеза и формирования всходов 265

Б.Г. Шерстюков. Оценки потенциальной горимости леса по месячным метеорологическим данным 288

Б.Г. Шерстюков, А.Б. Шерстюков. Лесные пожары при потеплении климата в XXI веке 300

В.В. Ясюкевич, С.Н. Титкина, И.О. Попов, Е.А. Давидович, Н.В. Ясюкевич. Климатозависимые заболевания и членистоногие переносчики: возможное влияние наблюдаемого на территории России изменения климата 314

Е.Л. Жильцова, О.А. Анисимов. Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России 360

С.Н. Титкина, И.О. Попов, С.М. Семенов, В.В. Ясюкевич. Изменение распространения в России и соседних странах непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки (*Lymantria dispar* L. и *Lymantria monacha* L., Lymantriidae, Lepidoptera) под влиянием наблюдаемого и ожидаемого в XXI веке изменения климата..... 375

И.О. Попов, С.Н. Титкина, С.М. Семенов, В.В. Ясюкевич. Модельные оценки распространения переносчиков некоторых болезней человека в XXI веке в России и соседних странах 395

Е.А. Давыдов, Г.Э. Инсаров, А.К. Сундетпаев. Мониторинг лишайников в связи с изменениями климата в Катон-Карагайском национальном природном парке (Восточный Казахстан) 428

Н.С. Смирнов. Взаимосвязь рельефа с растительностью темнохвойных лесов в нижнем течении реки Большая Порожняя (Печоро-Илычский заповедник)..... 442

В.В. Ясюкевич, С.Н. Титкина, И.О. Попов, Е.А. Давидович, Н.В. Ясюкевич. О формировании вторичного ареала американской белой бабочки (*Hyphantria cunea* Drury, Arctiidae, Lepidoptera) в России и соседних странах в XXI веке 454

CONTENTS

A.P. Revokatova, A.G. Ryaboshapko. Ranking of negative side effects of climate geoengineering application with respect to danger degree 9

S.M. Semenov, G.V. Gruza, E.Ya. Ran'kova, I.O. Popov, S.N. Titkina. Distribution of surface temperature over territory of Russia and neighboring countries for given level of global warming 29

G.V. Gruza, E.Ya. Rankova, L.K. Kleschenko, V.D. Smirnov. On spatial averaging in climate monitoring problems..... 42

M.Yu. Bardin, T.V. Platova. Changes in thresholds of extreme temperatures and precipitation on territory of Russia with global warming ... 71

E.V. Rocheva, V. D. Smirnov. On tendencies in the duration of "heat waves" in Russia 94

E.A. Cherenkova. Potential change in humidification of Russian plains by mid 21st century 115

V.A. Kokorev, O.A. Anisimov. Constructing optimal ensemble climatic projection for climate change impact assessment in Russia 131

M.D. Ananicheva, A.N. Krenke-jr. New assessment and some predictions of glaciers' state of Orulgan range 154

E.N. Popova, I.O. Popov. Climatic factors determining ranges of agricultural pests and agents of plant diseases and model methodology for assessment of change in ranges 175

L.Yu. Novikova, I.G. Loskutov, E.V. Zuev, O.V. Kovaleva, E.A. Porokhovinova, A.M. Artemieva. S.D. Kiru, E.V. Rogozina. The analysis of economically valuable characters of crop varieties at Northwestern region of Russia under climate change conditions 205

I.A. Shulgin. Energy budget and physiological criteria for crops' productivity under climate change 224

A.N. Zolotokrylin, E.A. Cherenkova. Moistening tendencies in grain-growth zone of Russia in beginning of 21st century 251

A.N. Polevoy, V.V. Sinitsyna. Modeling of grain development at early stages of ontogenesis and seedling emergence 265

B.G. Sherstyukov. Assessing the potential flammability of forests in Russia using monthly meteorological data 288

B.G. Sherstyukov, A.B. Sherstiukov. Forest fires in Russia under climate warming in XXI century 300

V.V. Yasjukevich, S.N. Titkina, I.O. Popov, E.A. Davidovich, N.V. Yasjukevich. Climate-dependant diseases and arthropod vectors: possible influence of climate change observed in Russia 314

E.L. Ziltcova, O.A. Anisimov. Empirico-statistical modeling of vegetation zonation under climate change in Russia 360

S.N. Titkina, I.O. Popov, S.M. Semenov, V.V. Yasjukevich. Changes in distribution in Russia and neighboring countries of gipsy moth and nun moth (*Lymantria dispar* L. and *Lymantria monacha* L., Lymantriidae, Lepidoptera) due to observed climate change and projected ones for XXI century 375

I.O. Popov, S.N. Titkina, S.M. Semenov, V.V. Yasukevich. Model assessment of distribution for vectors of some human diseases in XXI century in Russia and adjacent countries 395

E.A. Davydov, G.E Insarov, A.K. Sundetpaev. Lichen monitoring in Katon-Karagai national park, Eastern Kazakhstan, in context of climate change 428

N.S. Smirnov. Interrelationship of relief and vegetation of coniferous forests in lower course of river Bolshaya Porozhnyaya (Pechora-Ilych reserve) 442

V.V. Yasjukevich, S.N. Titkina, I.O. Popov, E.A. Davidovich, N.V. Yasjukevich. About the formation of a secondary range of the fall webworm (*Hyphantria cunea* Drury, Arctiidae, Lepidoptera) in Russia and adjacent countries in XXI century 454

РАНЖИРОВАНИЕ НЕГАТИВНЫХ ПОБОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОИНЖЕНЕРИИ КЛИМАТА ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ

А.П. Ревокатова, А.Г. Рябошапко*

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. *revokatova@gmail.com

Реферат. Проведен критический анализ степени опасности возможных побочных эффектов применения геоинженерии климата с использованием сульфатных стратосферных аэрозолей. Показано, что многие из отмеченных в научной литературе возможных эффектов не имеют научного обоснования. В частности, часто используемый противниками геоинженерии климата довод о связи повышения содержания в стратосфере сульфатных аэрозолей и закисления вод Мирового океана является абсолютно спекулятивным. В то же время такие эффекты как появление заметных климатических аномалий в ряде регионов Земли или усиление разрушения стратосферного озона имеют определенную физическую связь с наличием в стратосфере аэрозолей. Такие последствия требуют дальнейшего детального изучения. В данной работе проведено ранжирование возможных побочных эффектов использования геоинженерии климата по пространственному масштабу и народонаселению затронутых территорий, по степени опасности для человека и природных экосистем, по степени уверенности в возможности возникновения тех или иных эффектов.

Ключевые слова. Геоинженерия климата, стратосферный аэрозоль, негативные эффекты, степень опасности.

RANKING OF NEGATIVE SIDE EFFECTS OF CLIMATE GEOENGINEERING APPLICATION WITH RESPECT TO DANGER DEGREE

A.P. Revokatova, A.G. Ryaboshapko*

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, *revokatova@gmail.com

Abstract. Critical analysis of danger degree for potential side effects of climate engineering application using stratospheric sulfate aerosols is carried out. It is shown that many of side effects mentioned in

scientific literature have no scientific justification. In particular, an argument about relationship between enrichment of the stratosphere with aerosols and acidification of the World Ocean (used very often by opponents of climate engineering) is absolutely speculative. At the same time, such effects as the appearance of noticeable climatic anomalies in some regions of the Earth, or increase in stratospheric ozone destruction really have physical relation to enrichment of the stratosphere with aerosols. These effects require further careful investigation. In this paper, ranking of possible side effects of climate engineering application was carried out taking into account size of an influenced area, number of people potentially affected, degree of danger for humans and natural ecosystems, and level of confidence in the occurrence of an effect.

Key words. Climate geoengineering, stratospheric aerosol, negative effects, danger degree.

Введение

Последние всемирные климатические конференции в Копенгагене (2009), Канкуне (2010), Дохе (2012) зафиксировали фактический провал Киотского протокола (Kyoto Protocol, 1998), основной целью которого было сокращение выбросов в атмосферу парниковых газов (ПГ) и стабилизация их концентраций в атмосфере на уровне, не представляющем экологической угрозы. Несмотря на усилия некоторых стран, выбросы ПГ продолжают расти, что предполагает дальнейший рост глобальной температуры. Это обстоятельство определяет рост внимания к возможности использования более эффективных, оперативных и дешевых мер стабилизации климата, чем меры Киотского протокола. Реализацию таких мер предполагает геоинженерия климата (ГИК) – целенаправленное изменение параметров климатической системы Земли (Будыко, 1974; NAS, 1992; Teller et al., 1997; Израэль, 2005; Crutzen, 2006). П.Крутцен (Crutzen, 2006) недвусмысленно заявил, что «геоинженерия климата является единственным доступным путем быстрого понижения температуры, если провалятся международные усилия обуздать эмиссию парниковых газов».

К настоящему времени предложены десятки вариантов геоинженерной стабилизации климата. Их сравнение по различным параметрам (энергетическая эффективность, стоимость, экологическая безопасность и т.д.) показало, что несомненными преимуществами обладает метод, основанный на внесении в

стратосферу субмикронного сульфатного аэрозоля, способного отразить часть приходящего солнечного излучения (Израэль и др., 2009; Lenton, Vaughan, 2009; The Royal Society, 2009).

Наряду с несомненными достоинствами данного ГИК метода ему присущи определенные недостатки. Физические основы парникового эффекта и ГИК с использованием отражения части солнечного света принципиально различны (Израэль, Рябошапко, 2011). Это делает невозможным с помощью данного метода компенсировать воздействие ПГ одновременно на все климатические параметры, что создает предпосылки возникновения различных негативных эффектов.

А.Робок (Robock, 2008) обобщил информацию о возможных негативных эффектах в своей статье «20 причин, по которым геоинженерия может быть плохой идеей». Часть побочных эффектов упоминалась и в более поздних работах (Robock et al., 2013). Следует заметить, что все рассуждения о возникновении негативных эффектов носят либо умозрительный характер, либо основаны на результатах моделирования с использованием глобальных климатических моделей. Целью настоящей работы является попытка критического анализа степени реальной опасности побочных эффектов ГИК, выделенных А.Робоком.

Влияние на региональный климат

Одновременное наличие в атмосфере ПГ и отражающего солнечное излучение аэрозольного слоя не может не вызвать изменений климатических характеристик по сравнению с тем случаем, когда отсутствует и то, и другое. Можно подобрать такой уровень воздействия аэрозолей, который будет практически компенсировать глобальный температурный эффект, но на региональном уровне пространственное распределение температур будет неизбежно меняться. Этот эффект отмечается при мощных выбросах вулканического аэрозоля в стратосферу (Robock, 2000).

Анализ климатических последствий извержения вулкана Пинатубо показал, что при падении глобальной температуры в течение 3-х лет после извержения на вполне ощутимую величину (десятые доли градуса), эффект был весьма мозаичным по площади земного шара и неодинаковым по сезонам (Robock, 2002). Так в северном полушарии лето 1992г. было заметно холоднее обычного, а

зима 1991/92 годов несколько теплее. Весьма вероятно, что извержение вулкана Лаки в 1783г. сопровождалось ослаблением индийского муссона и засухой в Сахеле (Morton, 2007). Гипотетически можно допустить, что такой температурный сдвиг способен повлиять на производство сельскохозяйственных культур.

Повышение зимней температуры после мощных извержений было впервые обнаружено П.Гройсманом (1985) на территории центральной части России. Над Северной Америкой потепления не было. Позднее он обнаружил зимнее потепление как над Россией, так и над Северной Америкой после извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо (Groisman, 1992). П.Гройсман объяснил явление усилением меридионального переноса, вызванного повышением температурного градиента между экваториальной областью и полярной зоной.

Модели прогнозируют изменение конфигурации глобальных полей распределения температуры и осадков (Robock et al., 2008), но эти изменения существенно ниже тех, которые возникают при росте концентраций ПГ в отсутствие применения методов ГИК (Morton, 2007; Rasch et al., 2008; Bala, 2009). Изменения региональных климатических параметров при применении методов ГИК следует рассматривать в сравнении с той ситуацией, когда действует только парниковый эффект. Модельные расчеты показывают, что при удвоении концентрации CO_2 и компенсации парникового эффекта стратосферными аэрозолями заметные температурные аномалии могут отмечаться на 15% площади планеты. Без применения ГИК в этом случае аномалии возникнут на 97% всей площади (Keith, 2000). Следует заметить, что современные климатические модели удовлетворительно воспроизводят глобальные характеристики климата, но не обладают достаточным разрешением для надежного выявления региональных климатических аномалий (Robock et al., 2008; Jones et al., 2010). Можно надеяться, что постоянное совершенствование моделей позволит преодолеть этот недостаток в ближайшее десятилетие.

Подчеркнем, что проблему региональных аномалий климата при ГИК необходимо рассматривать с точки зрения баланса выгод и потерь для мировой экономики в целом и для отдельных стран. Вполне вероятна ситуация, когда мировое сообщество может компенсировать потери индивидуальной страны ради получения выгоды для большинства стран.

Продолжение закисления Мирового океана

Закисление поверхностных вод Мирового океана вызвано растущим содержанием в атмосфере важнейшего ПГ – диоксида углерода. Это ведет к повышению кислотности морской воды за счет повышения концентрации бикарбонатного иона. По оценкам с середины XVIII века по конец XX среднее глобальное значение pH поверхностного слоя Мирового океана уже упало с 8,179 до 8,104 (Orr et al., 2005).

Включение продолжающегося закисления мирового океана в список негативных последствий ГИК является безосновательным, так как по физической природе оно не имеет никакого отношения к введению серосодержащих аэрозолей в стратосферу. Идея включения закисления океана в список возможных негативных эффектов состоит в том, что, добившись компенсации потепления, человечество перестанет снижать выбросы CO_2. Это не следует из философии ГИК, и рассмотренный негативный эффект следует считать надуманным.

Разрушение озона в стратосфере

Можно выделить три механизма влияния ГИК воздействия на озоносферу в том случае, если сульфатные аэрозоли генерируются в результате инжекции в стратосферу сероводорода. Во-первых, можно гипотетически допустить, что только озон расходуется на окисление сероводорода. Если проигнорировать действие других, более эффективных окислителей (гидроксильный радикал, атомарный кислород), то на окисление 1 Мт H_2S будет израсходовано около 6 Мт озона, или 0,2% от общего содержания озона в стратосфере (отметим, что это оценка «по максимуму»).

Во-вторых, дополнительное количество аэрозоля ведет к увеличению поглощения части потока солнечной энергии и, соответственно, к нагреву стратосферы. Изменение температуры в свою очередь ведет к смещению динамического равновесия между процессами генерации и разрушения озона (Pueschel, 1996). Эксперты ВМО (WMO, 2007) указывают, что после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году температура стратосферы на уровне 50 hPa могла вырасти на 1°C, что вызвало снижение глобального содержания озона примерно на 2%. В результате этого извержения в стратосферу поступило огромное количество пеплового материала и

со временем образовалось около 30 Мт аэрозольных сульфатов. Скорее всего, роль сульфатных частиц в нагреве стратосферы минимальна, поскольку они в основном рассеивают солнечное излучение, не поглощая его.

В-третьих, реакции разрушения озона могут протекать на поверхности аэрозольных частиц в присутствии химически активных соединений хлора (Crutzen, 1974; Molina, Rowland, 1974). Источником активных соединений хлора являются в основном фреоны антропогенного происхождения. Этот механизм признан в настоящее время основным для наблюдавшегося в конце 20-го века истощения озонового слоя.

По мнению С.Соломон (Solomon, 1999) именно жидкие сферические частицы серной кислоты несут ответственность за резкое усиление явления антарктической озоновой «дыры» в марте-апреле 1992 года после извержения вулкана Пинатубо. С другой стороны, влияние извержения Пинатубо, выбросившего около 30 Мт аэрозоля, на толщину озонового слоя оценивается диапазоном 2 − 4% на глобальном уровне и до 8% в Арктике. Минимум ОСО был достигнут в 1994 году (а не в 1992/93 гг.), т.е. через 3 года после извержения вулкана Пинатубо, когда в стратосфере уже практически не осталось вулканических продуктов. Мощное извержение вулкана Эль-Чичон в 1982 году никак не отразилось на долговременном нисходящем тренде ОСО. Эксперты ВМО по озону (WMO, 2007) вообще воздержались от утверждения о наличии связи между средним ОСО и вулканическими выбросами в стратосферу. Такого же мнения придерживались К.Кондратьев и др., (1974), заключившие, «что не обнаруживается определенной связи уменьшения концентрации озона с увеличением концентрации аэрозоля, т.е. озоноразрушающее действие аэрозольных частиц не является, вероятно, определяющим фактором содержания озона в стратосфере».

Химический состав частиц и состояние вещества (кристаллическое, аморфное, жидкое) играют первостепенную роль в определении скоростей гетерогенных реакций. Оценено (Ивлев, Довгалюк, 1999), что скорости гетерогенных реакций на поверхности растворов серной кислоты на 2-3 порядка ниже, чем на поверхности твердых частиц. Исходя из сказанного, можно заключить, что наблюдаемое уменьшение содержания озона после мощных вулканических извержений связано, скорее, с деструкцией на

поверхности твердых частиц, а не жидких (полужидких) сульфатных частиц (Deshler et al., 1996). Соответственно, разрушение озона сульфатными частицами при ГИК должно проходить намного слабее, чем на аэрозолях вулканического происхождения.

Какова бы ни была природа аэрозолей, для ответа на вопрос о возможности влияния ГИК на озоносферу важнейшим фактором является динамика содержания в стратосфере фреонов. Содержание фреонов в стратосфере в последние годы постоянно падает за счет снижения их антропогенных выбросов. Прогнозируется, что ко времени востребованности ГИК в середине 21-ого века механизм гетерогенного разрушения озона в стратосфере практически потеряет свое значение. Модельные расчеты показывают, что это может произойти в ближайшие десятилетия (Lane et al., 2007). По мнению экспертов ВМО, при отсутствии в стратосфере «активного» хлора сульфатные частицы могут даже способствовать генерации озона (WMO, 2007). С учетом этих обстоятельств можно заключить, что разрушение озона вследствие увеличения массы стратосферного сульфатного аэрозоля, скорее всего, не может рассматриваться как негативный эффект ГИК.

Влияние на растительность

Снижение потока солнечного излучения при применении отражающих стратосферных аэрозолей, допустим, на 2% не означает, что на такую же величину снизится продуктивность фотосинтеза. Наземная растительность использует лишь около 1% потенциально доступной фотосинтетически активной радиации, поскольку продуктивность ограничена недостатком тепла и влаги (Будыко, 1984). На этом основании можно уверенно заключить, незначительное ослабление потока солнечной радиации при использовании геоинженерии климата никак не отразится на продуктивности наземных растений. Исключение могут составлять бурые водоросли, обитающие на глубинах в десятки метров, но их вклад в глобальный фотосинтез ничтожен.

Считается, что из-за введения аэрозолей в стратосферу уменьшится доля прямой радиации и увеличится доля рассеянной. Суммарная эффективность поглощения CO_2 кронами деревьев будет увеличиваться, так как увеличится рассеянная радиация. Это связано с тем, что в этом случае крона дерева получает более равномерное освещение, и количество поглощенной растением энергии возрастает

(Будыко, 1984). При этом может возрасти первичная продукция у некоторых видов, что может рассматриваться как негативный эффект, поскольку нарушается баланс экосистемы. С другой стороны, рост первичной продукции может поспособствовать увеличению поглощения углекислого газа растениями. В таком случае, при увеличении доли рассеянной радиации скорее имеет место позитивный эффект.

Увеличение кислотности атмосферных осадков

В случае введения в стратосферу серосодержащих газов образующаяся серная кислота может нейтрализоваться не полностью и выпасть на земную поверхность. Следовательно, избыточная кислота потенциально может изменить степень закисления осадков. Напомним, что закисление осадков определяется концентрацией свободных ионов водорода.

Допустим, что образовавшиеся в стратосфере сульфаты представлены исключительно серной кислотой (нейтрализация кислоты на всех этапах поступления кислоты из стратосферы на земную поверхность игнорируется). В работе (Израэль и др., 2013) показано, что при самом негативном сценарии роста концентраций ПГ, к концу 21 века потребуется поддержание дополнительного слоя стратосферного сернокислотного аэрозоля массой 27 Мт. При времени жизни 1,5 года необходимо ежегодное введение в стратосферу количество серы, эквивалентное $2{,}4 \cdot 10^{11}$ г-моль $[H^+]$. Допустим, кроме того, что кислота выводится исключительно осадками (сухое поглощение аэрозолей поверхностью игнорируется). При площади поверхности Земли $5{,}1 \cdot 10^{14}$ м^2 на каждый квадратный метр будет дополнительно выводиться в $4{,}7 \cdot 10^{-4}$ г-моль $[H^+]$ в год. Средняя интенсивность выпадающих на всем земном шаре осадков составляет около 1000 л/м^2/год (Henshow et al., 2000). Таким образом, дополнительная концентрация кислоты в дождевой воде (при условии наших допущений) составит максимально $4{,}7 \cdot 10^{-7}$ г-моль $[H^+]$/литр. Современная кислотность осадков варьирует по территории земного шара в пределах величины pH от 4 до 7 (Whelpdale, Kaiser, 1996). Для расчетов в качестве среднего можно взять значение pH=5,6. Это значение соответствует абсолютно чистой воде с растворенным в ней атмосферным углекислым газом. Добавление к чистой дождевой воде $4{,}7 \cdot 10^{-7}$ г-моль $[H^+]$ /литр снизит среднюю величину pH со значения 5,6 лишь до 5,53. Такая

кислотность дождевой воды в принципе не может вызвать каких-либо негативных эффектов (Израэль и др., 1989). Напомним, что приведенный расчет базировался на максимально жестких предположениях. Таким образом, учет дополнительного сколь либо опасного закисления атмосферных осадков, т.е. снижения величины pH ниже 4,0 лишен всякого смысла.

К выводу об отсутствии превышения нагрузки по кислотности пришли Кравитц и др. (Kravitz et al., 2009). На основе модельных расчетов они показали, что внесение в стратосферу 4 Мт серы приведет к дополнительному выпадению кислоты на уровне 0,001 г-моль/м^2/год лишь на очень малых площадях. Это значение ниже принятой критической нагрузки для самых чувствительных экосистем на порядки величины.

Влияние на перистые облака

Переохлажденный водный раствор, содержащий частицы растворенной серной кислоты − важный предшественник кристаллов льда. Влияние геоинженерных аэрозолей на перистые облака проявляется, когда за счет седиментации или других процессов они попадают в верхнюю тропосферу (Pueschel, 1996). Исследованию влияния вулканических аэрозолей на перистые облака было посвящено множество работ. В большинстве исследований (Minnis et al., 1993; Pueschel et al., 1994) говорится об увеличении количества ядер конденсации и, соответственно увеличении альбедо облаков. В работе (Mitchell, Finnegan, 2009) показано, что перистые облака контролируют поток уходящей длинноволновой радиации, при этом, чем выше перистое облако, тем сильнее оно влияет на этот поток. Таким образом, за счет изменения размеров кристаллов в перистых облаках можно менять и климат (Mitchell, Finnegan, 2009). То есть генерация дополнительных перистых облаков не должна рассматриваться как негативный эффект, поскольку является частью механизма геоинженерного воздействия на климат.

Осветление/помутнение неба

Один из предполагаемых побочных эффектов метода «стратосферных аэрозолей» − осветление неба (или образование белесого неба). Считается, что увеличенное количество сульфатных аэрозолей в стратосфере приведет к увеличению рассеянной радиации с неоднородным спектральным распределением.

Результаты модельных расчетов показали, что при любом распределении частиц по размерам, стратосферные аэрозоли приведут к увеличению белого цвета в спектре (Kravitz et al., 2012).

Изменение цвета неба наблюдалось в периоды после крупных извержений вулканов, например таких, как Пинатубо в 1991г. Наиболее сильный эффект наблюдался на малозаселенных территориях. В атмосфере городов, которые сами по себе являются сильнейшими источниками загрязнения атмосферы, находится множество аэрозолей, рассеяние на которых высветляет небо даже в отсутствии ГИК. В настоящее время в мире каждый второй человек проживает в городе, а всего через 35 лет в городах будет проживать две трети населения (Народонаселение, 2011). Т.е., скорее всего, введение в стратосферу аэрозольных частиц вызовет осветление неба, однако этот эффект будет заметен лишь для трети населения планеты. Эффект в данном случае носит чисто эстетический характер.

Ухудшение условий для астрономических наблюдений

Важную информацию о влиянии стратосферного аэрозоля могут дать результаты астрономических наблюдений после мощных вулканических извержений. После извержения вулкана Эль-Чичон в Мексике в 1982 году аэрозольное поглощение в высокогорной обсерватории ГАИШ в Казахстане возросло с 2-3% до 15-20% (Мошкалев, 1983). Изменение аэрозольной экстинкции в течение длительного периода после извержения Пинатубо в 1991г. проанализировано в целом ряде работ (Guerrero et al., 1998; Ильясов, 2011; Burki et al., 1995).

Из-за значительных вариаций коэффициента экстинкции после вулканических извержений учесть его влияние на качество астрономических наблюдений достаточно сложно. Однако ни в одной из цитируемых работ не отмечалась принципиальная невозможность наблюдений в связи с появлением стратосферного вулканического аэрозоля. Важным является то, что при относительной фотометрии астрономических объектов измеряется интенсивность их излучения с привязкой к звездам-стандартам. Поэтому при наблюдениях такого рода, снижение прозрачности стратосферы не должно вызвать значимых помех (комментарий сотрудника НИАИ СПбГУ Капацкой Е.Н.). Заметим, что наблюдения в Пулковской обсерватории после извержений вулканов Эль Чичон и

Пинатубо продолжались в обычном режиме (комментарий научного сотрудника Пулковской обсерватории В.Д. Галкина)

Таким образом, исследования показывают, что создание дополнительного аэрозольного слоя может отразиться на некоторой части наземных астрономических наблюдений. Однако в меняющихся предсказуемым образом условиях прозрачности атмосферы будет возможность учесть эти изменения при астрономических наблюдениях.

Снижение эффективности солнечной энергетики

В настоящее время солнечная энергетика обеспечивает 0,05% от нужд мировой энергетики. Считается, что к 2025 году этот показатель может вырасти до 2,5%, а к 2040 году до 16%. Если при использовании ГИК будет достигнуто глобальное снижение потока солнечной радиации на 3%, то доля потерь мировой энергетикой составит от 0,00075 в 2025 году до 0,0048 в 2040 году. Если же доля солнечной энергетики останется прежней, то общие потери составят 0,000015, что представляется ничтожной величиной. При самых оптимистичных темпах развития солнечной энергетики потери к середине XXI века составят менее чем полпроцента от общего производства энергии. Величина экономических потерь в этом случае будет несопоставимо мала с потерями в результате неприемлемого повышения глобальной температуры.

Негативное влияние самого процесса применения метода

Любой метод доставки предшественников аэрозоля в стратосферу будет так или иначе негативно влиять на окружающую среду. В первую очередь это связано с токсичностью доставляемых веществ – сероводорода или диоксида серы. Однако годовой оборот транспортируемых веществ для целей ГИК существенно ниже объемов переработки аналогичных веществ на крупных химических предприятиях. Возможное влияние на окружающую среду и человека будет носить локальный характер даже в случае аварийной ситуации, и радиус воздействия не превысит десяти километров.

В соответствии с большинством оценок (Израэль и др., 2009; Robock et al, 2009) использование авиации является наиболее легко реализуемым методом доставки необходимых веществ в стратосферу. Для выполнения работ по ГИК возможно строительство одного или нескольких аэродромов в удаленных ненаселенных

местах. На планете есть достаточно пустынных мест, где возможные негативные эффекты не скажутся ни на природные экосистемы, ни на человека.

Быстрый рост температуры при прекращении использования метода

Мгновенное обнуление аэрозольного форсинга ведет к появлению дисбаланса климатической системы. Глобальная температура начнет быстро расти, стремясь к величине, соответствующей накопленной за период реализации ГИК концентрации ПГ. Модельные расчеты подтверждают быстрый рост температуры, что может рассматриваться как опасное явление, присущее ГИК (Robock, 2008; Чернокульский и др., 2010).

Данная схема предполагает, что если прекращение геоинженерного воздействия произойдет по каким-либо причинам в самом начале его применения, существенного скачка глобальной температуры не будет, поскольку сумма абсолютных величин положительного и отрицательного форсингов будет ещё не велика. Если геоинженерная стабилизация температуры использовалась длительное время и не приводила к недопустимым негативным явлениям, трудно представить себе причины, которые потребовали бы мгновенного прекращения. Постепенное прекращение практики ГИК позволит избежать недопустимо быстрого роста температуры, что подтверждается модельными исследованиями (Израэль и др., 2013).

Неопределенность в представлении о возврате климата в исходное состояние

Исследования последствий вулканических извержений показали, что через 2-3 года после извержения охлаждающий эффект стратосферных аэрозолей прекращается. Например, после извержения Пинатубо в 1991г., вулканический аэрозоль наблюдался в стратосфере в течение 3 лет (Pyle et al, 1996). В историческое время даже самые мощные вулканические извержения вызывали эффект, длившийся не более 5 лет. Стратосферный сульфатный аэрозоль принципиально ничем не отличается от сульфатного аэрозоля вулканического происхождения. Трудно представить себе механизм, в соответствие с которым через 3-4 года после прекращения

воздействия ГИК климатическая система не пришла бы в исходное состояние.

Возможность человеческой ошибки при использовании метода

Безусловно, возможны аварии, вызванные человеческим фактором. Риски здесь сопоставимы с рисками при промышленном крупнотоннажном производстве токсичных веществ или при рутинных полетах самолетов с оружием массового поражения на борту. Для снижения риска массового поражения места проведения ГИК работ вполне могут быть выбраны в безлюдных районах.

Подрыв политики снижения выбросов парниковых газов

Предполагается, что добившись стабилизации глобальной температуры за счет применения методов ГИК, человечество прекратит заботиться о необходимости снижения выбросов ПГ. Данный негативный эффект не связан с особенностями геоинженерного воздействия.

Стоимость

Грубую оценку капитальных и текущих затрат в расчете на ежегодную доставку в стратосферу 2 Мт сероводорода выполнила А. Ревокатова (2012). Считая, что стоимость пропорциональна доставляемой массе, находим, что для поддержания массы стратосферного аэрозоля на уровне 27 Мт (Израэль и др., 2013) капитальные затраты составят 6-10 млрд. долларов США, а текущие затраты 3 – 6 млрд. долларов США в год. В сравнении с военными бюджетами стран (1,2 триллиона долларов в год) эти цифры представляются незначительными. Они тем более незначительны в сравнении с затратами на декарбонизацию мировой экономики.

Коммерческий контроль технологии, военное использование технологии

Коммерческий и технологический контроль должны осуществляться международной уполномоченной организацией. Начало применения ГИК возможно лишь при достижении международного консенсуса. Возможно достижение соглашений на уровне ООН о компенсации потерь индивидуальной страны мировым сообществом ради получения выгоды для большинства стран. Геоинженерная база не будет находиться во владении одной

страны, и контроль над техникой исполнения должен проводиться экспертами из разных стран. Таким образом, можно исключить враждебное или иное использование ГИК.

Конфликт с действующими соглашениями

Существует целый ряд действующих соглашений, которые, не упоминая напрямую ГИК, могут препятствовать его применению. Например, часто упоминается Конвенция 1976 года «…о запрете военного или любого другого враждебного использования средств воздействия на окружающую среду» как фактор, препятствующий использованию ГИК. Однако, цель ГИК не имеет военного значения, и не направлена на враждебное воздействие. Над юридическими аспектами применения ГИК в настоящее время работают десятки квалифицированных юристов, что дает основание предполагать возможность скорого разрешения данного вопроса.

Контроль терморегулятора

А.Робок (Robock, 2008) ставит вопрос о том, кто будет решать, какую температуру должна иметь Земля. Проще всего эту проблему решить, выбрав эталонной определенную температуру. Например, температуру середины 20 века или температуру доиндустриальной эпохи. Возможно принятие решения о стабилизации глобальной температуры на определенном уровне (например, на уровне +2°С от глобальной температуры в прединдустриальный период). ГИК предназначена для решения общемировой проблемы. Выбор желательного уровня средней глобальной температуры будет производиться совместно всеми странами исходя из разумных предпосылок. В таком случае эта проблема вряд ли может стать негативным эффектом применения ГИК.

Непредсказуемые последствия

Для предсказания возможных последствий ГИК используются климатические модели, которые в силу своей несовершенности не могут точно отразить состояние климатической системы Земли спустя несколько десятилетий. Но те же самые климатические

модели используются и для прогноза будущего изменения климата. Безусловно, человек не способен предусмотреть абсолютно все эффекты, которые могут возникнуть в исключительно сложной климатической системе Земли при масштабном применении методов ГИК. Данный вопрос представляется исключительно общим и не имеющим ответа в принципе. С равным успехом его можно адресовать любой новейшей технологии.

Ранжирование возможных негативных эффектов использования ГИК

В таблице представлена классификация степени опасности побочных эффектов ГИК по четырем критериям (по трехбальной шкале) – охват территории возможным негативным воздействием; охват количества населения Земли возможным негативным воздействием; степень опасности для человека и экосистем; количество целевых исследований данного негативного эффекта. Из таблицы следует, что основная часть рассмотренных потенциальных опасностей имеют глобальный характер, как по площади воздействия, так и по количеству подвергаемого воздействию населения. Это обусловлено глобальностью воздействия самого метода. В тоже время, степень опасности практически всех побочных эффектов очевидным образом преувеличена. Наиболее вероятно, что негативное воздействие ГИК может проявиться на уровне отдельных регионов и оказывать влияние на жизнь больших групп населения, например, в юго-восточной Азии, в Индии, в центральной Африке (Robock et al, 2008; Володин и др., 2011).

Уровень знаний о предмете и о путях предотвращения угроз дают возможность с уверенностью говорить том, что основная часть поставленных А.Робоком вопросов носит надуманный характер. В этом случае можно говорить о том, что уровень угроз явно преувеличен. Однако некоторые побочные эффекты (воздействие на региональный климат, влияние на озон в стратосфере и др.) требуют дальнейшего изучения оценки величины и характера потенциального ущерба.

Таблица

Ранжирование степени опасности побочных эффектов геоинженерии климата

Побочный эффект	По пространственному охвату	По охвату количества населения	По степени опасности	Количество целевых исследований
Воздействие на региональный климат	*	**	**	***
Закисление Мирового океана	***	-	-	***
Разрушение озоносферы	***	***	*	***
Влияние на растительность	***	***	-	*
Увеличение кислотности осадков	***	***	-	**
Влияние на перистые облака	**	**	-	**
Помутнение неба	***	***	*	*
Ухудшение астрономических наблюдений	***	-	-	*
Снижение эффективности солнечной энергетики	*	*	-	*
Негативное влияние процесса применения метода	-	-	*	*
Опасность быстрого прекращения использования	***	***	*	***
Возможность невозврата в исходное состояние	***	***	-	*
Возможность человеческой ошибки	*	-	*	*
Подрыв политики снижения выбросов ПГ	***	***	-	*
Стоимость	-	-	-	**
Коммерческий контроль технологии	-	-	*	*
Военное использование технологии	***	***	-	*
Конфликт с действующими соглашениями	***	***	-	**
Контроль терморегулятора	***	***	-	*
Непредсказуемые последствия	***	***	*	*

Примечание. *Прочерк в таблице означает отсутствие связи между конкретным побочным эффектом и соответствующим критерием. Экспертные оценки степени проявления возможных негативных эффектов представлены возрастающим количеством звездочек.*

Заключение

Возможность стабилизации глобальной температуры путем воздействия на климатическую систему Земли (геоинженерия климата) находит среди научного сообщества, как сторонников, так и противников. Противники данного подхода изыскивают аргументы,

подтверждающие их точку зрения о недопустимости вмешательства в климатическую систему, поскольку такое вмешательство приведет к появлению негативных последствий для человека и природных экосистем. Наиболее полный набор таких аргументов был обобщен в работе А.Робока (Robock, 2008).

Анализ возможности появления нежелательных эффектов при геоинженерии климата с использованием стратосферных сульфатных аэрозолей показывает, что наиболее вероятно возникновение региональных климатических аномалий. Открытым остается вопрос о возможности заметного влияния стратосферных сульфатных аэрозолей на состояние озонового слоя.

В литературе часто упоминается тот факт, что геоинженерия с использованием стратосферных аэрозолей не предотвращает растущее закисление Мирового океана. Это естественно – геоинженерия не предназначена для решения всех экологических проблем.

Многие из отмечаемых недостатков геоинженерии связаны с юридическими, экономическими, социальными и этическими аспектами. Они никак не связаны с физическими основами рассматриваемого метода. Не отрицая важности некоторых из этих аспектов, мы можем утверждать, что их нельзя рассматривать в качестве принципиальных ограничений использования геоинженерной стабилизации глобальной температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М.И. 1974. Метод воздействия на климат. Метеорология и Гидрология. № 2. С. 91-97.
2. Будыко М.И. 1984. Эволюция биосферы. – Л.: Гидрометеоиздат. 488 С.
3. Володин Е.М., Кострыкин С.В., Рябошапко А.Г. 2011. Моделирование изменения климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу. Известия РАН: Физика атмосферы и океана. Т. 47, № 4. С. 467-476.
4. Гройсман П.Я. 1985. Региональные климатические последствия вулканических извержений. Метеорология и Гидрология. № 4. С. 39-45.
5. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. 1999. Физика атмосферных аэрозольных систем. – С.-Пб.: НИИХ СПбГУ. 194 С.
6. Израэль Ю.А. 2005. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы. Метеорология и гидрология. № 10. С. 5-9.
7. Израэль Ю.А., Володин Е.М., Кострыкин С.В., Ревокатова А.П., Рябошапко А.Г. 2013. Возможность геоинженерной стабилизации глобальной

температуры в 21 веке с использованием стратосферных аэрозолей и оценка возможных негативных последствий. Метеорология и Гидрология. (В печати).
8. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапко А.Г., Филиппова Л.М. 1989. Кислотные дожди. –Л.: Гидрометеоиздат. 269 С.
9. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г. 2011. Геоинженерия климата: возможности реализации. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 24. –М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН. С. 11-24.
10. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г., Петров Н.Н. 2009. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата. Метеорология и Гидрология. № 6. С. 5-24.
11. Ильясов С.П. 2011. Комплексное исследование астроклимата Майданакской обсерватории. Дисс. на соис. уч. ст. д.ф.-м.н. Ташкент: Астрономический институт им. Улугбека.
12. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Никольский Г.А. 1974. Комплексные исследования стратосферного аэрозоля. Метеорология и Гидрология. № 9. С. 16-26.
13. Мошкалев В.Г. 1983. Резкое повышение поглощения в атмосфере в 1982 году. Астрономический циркуляр №1309.
14. Народонаселение 2011. Народонаселение мира в 2011 году. Доклад фонда Организации Объединенных Наций в области народонаселения UNFPA. ISBN 978-0-89714-994-5.
15. Ревокатова А.П. 2012. Сравнение методов и оценка стоимости создания стратосферного аэрозольного слоя для целей инженерии климата. В кн. Исследование возможностей стабилизации климата с помощью новых технологий. Труды Международной конференции «Проблемы адаптации к изменениям климата», Москва, 7-9 ноября 2011г. –М.: Росгидромет. С. 138-150.
16. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. 2010. Аналитическая оценка эффективности предотвращения потепления климата контролируемыми аэрозольными эмиссиями в стратосферу. Метеорология и Гидрология. № 5. С. 16-26.
17. Bala G. 2009. Problems with geoengineering schemes to combat climate change. Current Science. V. 96, № 1. P. 41-48.
18. Burki G., Rufener F., Burnet M. et al. 1995. The atmospheric extinction at the E.S.O. La Silla observatory. Astronomy and Astrophysics Supplement. V. 112. P. 383.
19. Crutzen P.J. 1974. Estimates of possible future ozone reductions from continued use of fluorochloromethanes (CF_2Cl_2, $CFCl_3$). Geophys. Res. Lett. V. 1, P. 205-208.
20. Crutzen P.J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: a contribution to resolve a policy dilemma? Climate Change. V. 77. P. 211-219.
21. Deshler T., Nardi B., Hofmann D.J., Johnson B.J. 1996. Correlation between ozone loss and volcanic aerosol at altitudes below 14 kilometers over McMurdo Station, Antarctica. Antarctic Journal of the United States. Review 1996. V. 25, № 2.
22. Groisman P.Y. 1992. Possible regional climate consequences of the Pinatubo eruption: An empirical approach. Geophys. Res. Lett. V. 19. P. 1603-1606.
23. Guerrero M., García-López R., Corradi R. 1998. Extinction over the Canarian observatories: the limited influence of Saharan dust. New Astronomy Reviews. V. 42. Issue 6-8. P. 529-532.

24. Jones A., Haywood J., Boucher O., Kravitz B., Robock A. 2010. Geoengineering by stratospheric SO_2 injection: results from the Met Office HadGEM2 climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE. Atmos. Chem. Phys. Discuss. V. 10. P. 7421-7434.
25. Keith D. W. 2000. Geoengineering the Climate: History and Prospect. Annual Review of Energy and the Environment. V. 25. P. 245-284.
26. Kravitz B., MacMartin D.G., Caldeira K. 2012. Geoengineering: Whiter skies? Geophys. Res. Lett. V. 39. L11801, doi: 10.1029/2012GL051652.
27. Kravitz B., Robock A., Oman L., Stenchikov G., Marquardt A.B. 2009. Sulfuric acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols. J. Geoph. Res. V. 114. D14109. doi: 10.1029/2009JD011918
28. Kyoto Protocol 1998. The Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change. http://unfccc.int/2860.php
29. Lane L., Caldeira K., Chatfield R., Longhoff S. 2007. Workshop Report on Managing Solar Radiation. Edited by L. Lane, K. Caldeira, R.Chatfield, S.Langhoff. Report NASA/CP-2007-214558, November 18-19, 2006. 40 P.
30. Lenton T.M., Vaughan N.E. 2009. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. Atmos. Chem. Phys. Discuss. V. 9. P. 2559-2608.
31. Minnis P., Harrison E.F., Stowe L.L., Gibson G.G., Denn F.M., Doelling D.R., Smith W.L. 1993. Radiative climate forcing by the Mt.Pinatubo eruption. Science. V. 259. P. 1411-1415.
32. Mitchell D.L., Finnegan W. 2009. Modification of cirrus clouds to reduce global warming, Environ. Res. Lett. V. 4. 045102, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045102.
33. Molina M.J., Rowland F.S. 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. Nature. V. 249. P. 810-812.
34. Morton O. 2007. Climate change: Is it what it takes to save the world? Nature. V. 447. P. 132-136.
35. NAS 1992. US National Academy of science. Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base. Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming. National Academies Press, Washington, DC. 994 P.
36. Orr J.C., Fabry V.J., Aumont O., et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, v. 437, pp. 681-686.
37. Pueschel R. 1996. Stratospheric aerosols: formation, properties, effects. J. Aerosol Sci. V. 27, № 3. P. 383-402.
38. Pueschel R., Russell P., Allen D., Ferry G., Snetsinger K., Livingston J., Verma S. 1994. Physical and optical properties of the Pinatubo volcanic aerosol: Aircraft observations with impactors and a Sun-tracking photometer. J. Geophys. Res. V. 99 (D6). doi: 10.1029/94JD00621. ISSN: 0148-0227.
39. Pyle D.M., Beattie P.D., Bluth G.J.S. 1996. Sulphur emission to the stratosphere from explosive volcanic eruptions. Bull. Volcanol. V. 57. P. 663-671.
40. Rasch P.J., Crutzen P.J., Coleman D.B., 2008. Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols: The role of particle size. Geophys. Res. Lett. V. 35. L02809.
41. Robock A., MacMartin G., Duren R., Christensen W. 2013. Studying geoengineering with natural and anthropogenic analogs. Climatic Change. DOI 10.1007/s10584-013-0777-5.

42. Robock A. 2002. Pinatubo eruption: The climate aftermath. Science. V. 295. P. 1242-1244.
43. Robock A. 2008. 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. Bulletin of the Atomic Scientists V. 64, №. 2. P. 14-18.
44. Robock A., Marquardt A., Kravitz B., Stenchikov G. 2009. The benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. Geophys. Res. Lett. V. 36. L19703. 9 P.
45. Robock A., Oman L., Stenchikov G.L. 2008. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO2 injections. J.Geoph. Res. V. 113. D16101. doi:10.1029/2008JD010050.
46. Solomon S. 1999. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and theory. Rev. Geophys. V. 37. P. 275-316.
47. Teller E., Hyde R., Wood L. 2002. Active Climate Stabilization: Practical Physics-Based Approaches to Prevention of Climate Change. Preprint UCRL-JC-148012, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA [www.llnl.gov/global-warm/148012.pdf]
48. The Royal Society 2009. Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. ISBN: 978-0-85403-773-5. 83 P.
49. Whelpdale D., Kaiser M. 1996. Global Acid Deposition Assessment. WMO Report 106. 241 P.
50. WMO 2007. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 5. Geneva. 572 P.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И СОСЕДНИХ СТРАН ПРИ ЗАДАННОМ УРОВНЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

С.М. Семенов, Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, И.О. Попов, С.Н. Титкина*

Россия, Москва 107258, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, *sergeysemenov1@yandex.ru

Реферат. Оценены климатические изменения параметров температурного режима на территории России и соседних стран, соответствующие глобальному потеплению на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг. Температурный режим характеризовался годовым ходом среднесуточной приповерхностной температуры в косинусоидальном приближении. Установлено, что на большей части территории России ожидается увеличение среднегодовой температуры и уменьшение амплитуды годового хода среднесуточной температуры. Наиболее сильно эта тенденция будет выражена на юге Сибири. В комбинации это приведет к наиболее выраженному росту средних температур холодного периода года. Время достижения максимума среднесуточной температурой в календарном году на территории России в основном сдвинется в сторону более ранних дат, но незначительно – до 1 недели.

Ключевые слова. Глобальное потепление, региональный отклик, территория России, температурный режим.

DISTRIBUTION OF SURFACE TEMPERATURE OVER TERRITORY OF RUSSIA AND NEIGHBORING COUNTRIES FOR GIVEN LEVEL OF GLOBAL WARMING

S.M. Semenov, G.V. Gruza, E.Ya. Ran'kova, I.O. Popov, S.N. Titkina*

Institute of Global Climate and Ecology, Glebovskaya str., 20B, Moscow 107258, Russia, *sergeysemenov1@yandex.ru

Abstract. Climatic changes in parameters of temperature regime in Russia and neighboring countries corresponding to the global warming by 1,5°C above the 1981-2000 level are assessed. Temperature regime is characterized by yearly course of daily mean surface temperature. Its cosine approximation is employed. It is found that over most of Russian territory an increase in the annual temperature and decrease in the

amplitude of yearly course of daily mean temperature are expected. This tendency will be mostly pronounced in the southern Siberia. In Russia, a moment when daily mean temperature reaches its maximum within calendar year will shift mainly to earlier dates. However, the shift will be small, up to one week.

Key words. Global warming, regional response, Russian territory, temperature regime.

Введение

Обеспокоенность современными тенденциями изменения глобального климата и их последствиями, существующая в обществах многих стран мира, привела к тому, что и на национальном, и на международном уровне делаются определенные шаги в направлении регулирования антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Для обоснования этих шагов необходимо, в частности, иметь информацию о возможных будущих климатах.

Изучение будущих климатов сейчас проводится чаще всего с помощью глобальных климатических моделей – совместных Моделей Общей Циркуляции Атмосферы и Океана (МОЦАО). Эти модели описывают основные процессы, участвующие в формировании климата: приход лучистой энергии от Солнца, массо- и энергоперенос в системе атмосфера−океан−земная поверхность и уход инфракрасной радиации в космос. Поскольку такие модели состоят из сотен и даже тысяч уравнений, имеют множество переменных и параметров, то в расчетах долговременных изменений гидрометеорологических величин в пространстве и во времени имеются значительные неопределенности.

Кроме того, существуют и внешние условия, которые надо задавать при расчете будущих климатов. Ведь в МОЦАО учитываются антропогенные воздействия на климатическую систему, а именно антропогенное обогащение атмосферы парниковыми газами в ходе хозяйственной деятельности. Такое изменение состава земной атмосферы приводит к потеплению вследствие усиления парникового эффекта. Однако, каковы будут антропогенные эмиссии парниковых газов (углекислого газа, метана, закиси азота и пр.) в атмосферу через несколько десятков лет, точно не известно. Это зависит от пути развития мирового хозяйства, а возможностями его точного предсказания наука пока не располагает.

Поэтому, обычно рассматриваются несколько возможных сценариев мирового хозяйственного развития. С каждым из них можно связать определенные технологии и соответствующие объемы антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу на перспективу. Подобные сценарии были построены и опубликованы самом начале XXI века при участии Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК (Special Report…, 2000). Недавно были разработаны новые сценарии для XXI века – семейство RCP, Representative Concentration Pathways (Moss et al., 2007).

Использование «полных» физико-математических динамических моделей (МОЦАО) в настоящее время основной метод изучения будущих климатов в условиях антропогенного воздействия на климатическую систему. В то же время необходимо отметить, что:

- ✓ результатам долгосрочного моделирования климата с помощью МОЦАО свойственна значительная неопределенность;
- ✓ каждый запуск МОЦАО требует большой подготовительной работы штата квалифицированных специалистов и значительного технологического ресурса;

Поэтому, в дополнение к технологиям изучения будущих климатов, основанным на применении МОЦАО, целесообразно иметь арсенал более простых инструментов, доступных широкому кругу специалистов. Такие модельные средства для изучения климата бывают двух типов:

- ✓ физико-математические динамические модели минимальной и промежуточной сложности (Елисеев и др., 2008; Елисеев, Мохов, 2008; Семенов, 2004); это – методологические аналоги МОЦАО, но малопараметрические и сильно агрегированные;
- ✓ физико-статистические модели, опирающиеся непосредственно на данные наблюдений за климатом (Груза, Ранькова, 2012); они основаны на статистическом анализе связей между разными параметрами климата и воздействующими факторами.

Данная работа посвящена описанию будущего климата, полученному с помощью одной моделей последнего типа. Эта модель связывает изменение глобальной температуры у поверхности земли с ее региональными изменениями (в координатных квадратах 5^{o}x5^{o})

годового и месячного разрешения. Для целей расчета некоторых прикладных статистических индексов (например, суммы эффективных температур и суммы активных температур) дополнительно получена МНК-оценка климатического годового хода среднесуточной температуры в форме косинусоидальной функции с тремя параметрами $[a + b \cos((2\pi/365)\ (t - t_0))]$, где t – время в сутках в пределах календарного года (значение $t = 0$ соответствует 0 часов 1 января).

С помощью развитой техники оценены климатические значения этих параметров температурного режима для территории России и соседних стран для базового периода 1981-2000 гг. и для ситуации, когда средняя глобальная температура превысит уровень 1981-2000 гг. на 1,5°С, что примерно соответствует превышению доиндустриального значения на 2°С.

Последняя цифра есть «глобальная цель», зафиксированная на Шестнадцатой конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Канкуне (Мексика) в 2010г. (Report of the Conference of the Parties…, 2011). Таким образом, полученное в данной работе описание будущего климата может помочь специалистам по воздействиям оценить его опасность или же благоприятность для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения. Эта оценка (в отличие от расчетов с помощью динамических моделей) основана на единственном «консервативном» предположении: статистические связи между глобальными и региональными изменениями температуры, имевшие место в XX веке, сохранятся в XXI веке.

Методы

Оценки для базового периода 1981-2000 гг.

Оценки абсолютных значений среднемесячной температуры в приповерхностном слое (на высоте 2 м над сушей и в среднем в слое 0 – 10 м в морях и океанах) в 1981-2000 гг. основаны на следующих данных, депонированных в сети ИНТЕРНЕТ Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии, Великобритания (Climate Research Unit, University of East Anglia, UK):

- ✓ глобальные поля норм за 1961-1990 гг. (файл abstem.dat, 12 полей с данными в 2592 боксах 5°x5°; http://www.cru.uea.ac.uk);

- ✓ глобальные поля аномалий относительно норм 1961-1990 гг. (файл hadcrut3.txt; данные для 2592 боксов 5°x5° за 12 месяцев календарного года за период 1850-2011 гг.; http://www.cru.uea.ac.uk);
- ✓ временные ряды глобально осредненных аномалий среднегодовых и среднемесячных значений за 1850-2011 гг. (файл hadcrut3.txt; http://www.cru.uea.ac.uk)

В заданном боксе для каждого месяца каждого года в пределах 1981-2000 гг. среднемесячное значение температуры рассчитывалось как сумма аномалии относительно нормы за 1961-1990 гг. и нормы. Если при этом отсутствовали данные о норме за 1961-1990 гг. или же об аномалии, то расчет для этого месяца не производился (констатировалось отсутствие данного).

Далее, для заданного бокса и календарного месяца рассматривался ряд значений температуры для 1981, 1982, …., 2000 гг. Если в ряду присутствовали менее трех данных, то оценка нормы за 1981-2000 гг. не производилась (констатировалось отсутствие данного). Если же в наличии было не менее трех данных, то строилась линейная регрессии температуры на время. Значение этой линейной функции в средней точке (t = 1990,5) принималось за норму для 1981-2000 гг.

Глобальное потепление за индустриальный период

За начало индустриального периода принято двадцатилетие 1881-1900 гг. Именно в это время начинает заметно расти антропогенная эмиссия углекислого газа в атмосферу.

Среднее значение глобально осредненной аномалии температуры земного шара за 1881-1900 гг. относительно уровня 1961-1990 гг. равно –0,34°C. Это значение характеризует доиндустриальный уровень температуры.

Среднее значение аномалии температуры за 1981-2000 гг. относительно уровня 1961-1990 гг. равно 0,17°C.

Таким образом, период 1981-2000 гг. теплее доиндустриального на ~0,5°C (оценка выполнена по данным файла hadcrut3.txt).

Следовательно, глобальное потепление на 2°C по отношению к доиндустриальному уровню эквивалентно потеплению на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.

Связь изменения глобальной температуры с региональными

Для того, чтобы оценить изменения температуры в региональном масштабе, соответствующие заданному глобальному изменению, в работе (Семенов и др., 2008) были получены оценки чувствительности региональных среднегодовых температур к изменению среднегодовой глобальной температуры. Оценки были выполнены статистически путем совместного анализа рядов среднегодовой температуры воздуха за 1910 – 2005 гг. – глобальной и для пространственных пятиградусных «боксов» 5°x5° (Brohan et al., 2005; http://www.cru.uea.ac.uk). При совместном анализе в каждой такой паре рядов ряд глобальной температуры – переменная X, а региональной – переменная Y.

В качестве оценки чувствительности для каждого такого «бокса» принимается значение коэффициента регрессии b:

$$b_{Y/X} = r_{Y,X} \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \quad ,$$

для которого оценкой стандартного отклонения является

$$s_b = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}$$

Здесь r – коэффициент корреляции, а σ_X, σ_Y – стандартные отклонения соответствующих переменных.

Значение b характеризует чувствительность региональной температуры (т.е. в данном случае – средней по соответствующему боксу 5°x5°) к изменению глобальной: это, в линейном приближении, есть изменение региональной среднегодовой температуры ΔT_{reg}, соответствующее изменению глобальной температуры $\Delta T = 1$°C. В общем случае:

$$\Delta T_{\text{reg}} = b\, \Delta T \, .$$

Доверительный интервал оценки ΔT_{reg} можно получить, заменив значение b его квантилями $b \pm k\, s_b$, где k зависит от назначенной доверительной вероятности. Границами 95%-го доверительного интервала являются 2,5-й и 97,5-й процентили, которым при нормальном распределении соответствуют значения $k = \pm 1{,}96$. Для уменьшения статистического шума проводится дополнительно 9-точечное сглаживание с помощью фильтра

$$B_{ij} = \left(\sum_{k=-1}^{1}\sum_{l=-1}^{1} w_{kl} b_{i+k,j+l}\right) \Big/ \left(\sum_{k=-1}^{1}\sum_{l=-1}^{1} w_{kl}\right) \quad .$$

Здесь i и j – номера боксов в соответствии с широтой и долготой (от 1 до 18 и от 1 до 72 для сетки 5-градусных боксов в Северном полушарии); b_{ij} – расчетное значение чувствительности; а w – весовые коэффициенты: $w_{0,0}$ = 2 (коэффициент для центральной точки), $w_{\pm1,0} = w_{0,\pm1} = 1$ (коэффициенты для центральных точек на соседних параллелях и меридианах) и $w_{\pm1,\pm1} = 0{,}5$ (коэффициенты для угловых точек).

Результаты применения такой процедуры для оценки чувствительности региональных среднегодовой температуры и среднемесячных температур к изменению среднегодовой глобальной температуры по данным за 1909-2008 гг. изложены в работе (Груза и др., 2009). Это сделано как для средних значений B, так и для их доверительных интервалов. Оценки значений B выполнены для каждого календарного месяца, т.е. для каждого бокса (i, j) получены 13 оценок чувствительности B_{ij}^{0}, B_{ij}^{1}, B_{ij}^{2}, …, B_{ij}^{12} – для года и каждого календарного месяца. На рис. 1 приведена результирующая карта-схема этих оценок чувствительности.

Оценка будущего температурного режима

Для каждого пространственного бокса 5°x5° с номерами (i, j) климатическое значение среднемесячной температуры T_{ij}^{n} за n-й месяц календарного года, соответствующее увеличению глобальной среднегодовой температуры на ΔT по отношению к уровню T_0 в 1981-2000 гг., принимается равным

$$T_{ij}^{n} = T_{ij0}^{n} + B_{ij}^{n} \Delta T, \quad (1)$$

где n – порядковый номер месяца в календарном году, B_{ij}^{n} – оценка чувствительности среднемесячной температуры за n-й месяц в этом боксе к 1-градусному увеличению глобальной среднегодовой температуры, T_{ij0}^{n} – климатическое значение температуры за n-й месяц в боксе (i, j) в 1981-2000 гг.

Для оценки реакции климатических значений среднемесячных температур на увеличение среднегодового значения глобальной температуры на 1,5°C надо в формуле (1) положить ΔT = 1,5°C.

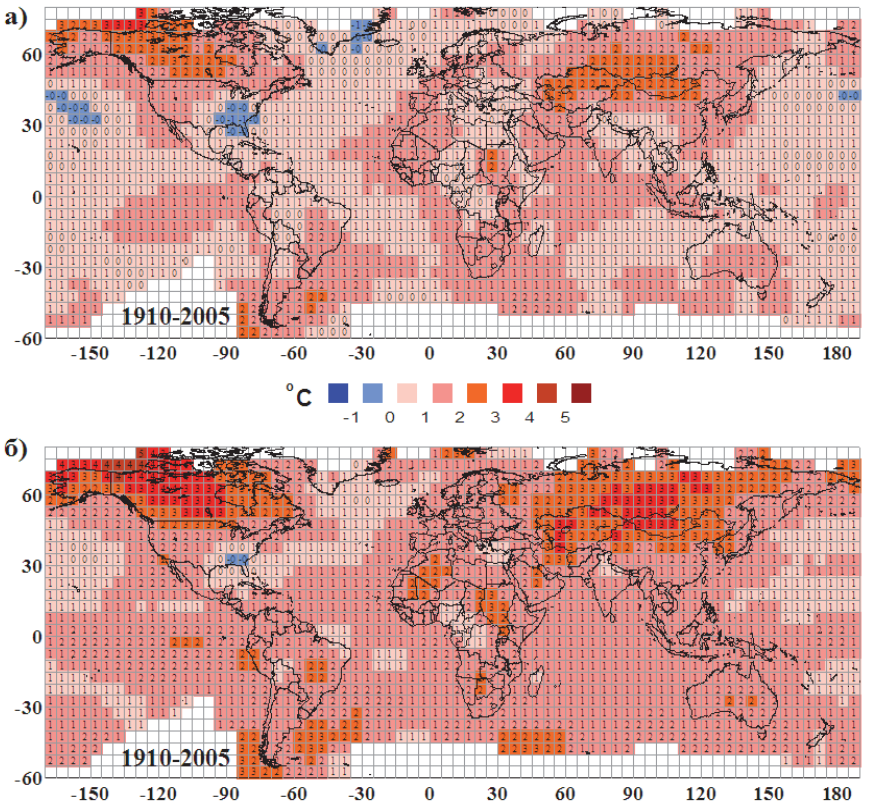

Рис. 1. *Оценки чувствительности региональной температуры к изменению глобальной, построенные по данным за 1909-2008 гг. (Груза и др., 2009): а) среднее значение, б) верхняя граница 95%-го доверительного интервала. Белый цвет – недостаток данных.*

Переход к среднесуточным значениям

При исследовании возможных последствий изменения климата часто необходимо знать не только климатические значения среднемесячной температуры для какого-либо периода, но и климатические характеристики годового хода среднесуточной температуры.

Эта задача решается в косинусоидальном приближении годового хода $f(t) = [a + b \cos((2\pi/365)\ (t - t_0))]$, где t – время (в сутках) в пределах года, считая с нуля часов 1 января. Параметры этой функции имеют следующий физический смысл: a – среднегодовая

температура, b – амплитуда годового ходя среднесуточной температуры, t_0 – время достижения среднесуточной температурой годового максимума.

По заданным 12-ти значениям годового хода среднемесячной температуры параметры a, b и t_0 определяются с помощью метода наименьших квадратов. А именно, их значения должны обеспечивать минимум суммы:

$$\sum_{n=1}^{12} \frac{(T^n - f^n)^2}{S_n^2}$$

Здесь для простоты номера бокса (i, j) опущены; T^n – среднемесячная температура n-го календарного месяца, f^n – среднее значение функции $f(t)$ за этот месяц, а S_n – среднеквадратическое отклонение для T^n. Если среднеквадратические отклонения неизвестны, то они считаются одинаковыми для всех месяцев. Год всегда считается невисокосным.

Результаты и обсуждение

Оценки чувствительности региональной температуры к изменению глобальной

В целом, данные о чувствительности региональной температуры к изменению глобальной, приведенные на рис. 1а, можно обобщить следующим образом. При переходе на региональный уровень минимальная чувствительность (не более единицы) отмечается на океанах. Здесь сигнал глобального потепления, как правило, существенно не усиливается. Исключения составляют регионы, расположенные к западу и к востоку от южной оконечности Южной Америки, к юго-востоку от южной оконечности Африки, а также прибрежные зоны на северо-западе Северной Америки, где наблюдается особенно высокая чувствительность (2 – 3[1]).

В северной части Северной Америки – на территории Канады (кроме восточной части) и на Аляске (США) – наблюдается обширная зона высокой чувствительности (2 − 3). В Южной Америке небольшая зона высокой чувствительности (2) расположена на территории Бразилии.

---

[1] *Здесь и далее при обобщении данных о региональной чувствительности в скобках приводятся ее оценки, округленные до целых градусов.*

В Евразии (в средней и южной части Западной и Восточной Сибири), на территории Монголии и на севере Китая, в Центральной Азии и на территории Ирана выявлена обширная область высокой чувствительности (в основном, 2).

В Африке отмечены две зоны высокой чувствительности (2): на северо-западе (на территории Алжира, Мали и Мавритании) и на востоке (на территории Судана).

В Австралии обнаружена лишь одна небольшая зона высокой чувствительности (2) – на востоке.

Следует отметить, что прибрежные зоны континентов (включая арктическое побережье) практически нигде не обнаружили высокой чувствительности, за исключением северо-запада Северной Америки.

Изменения температурного режима на территории России и соседних стран при глобальном потеплении на 1,5°С относительно уровня 1981-2000 гг.

На рис. 2, 3 и 4 приведены, соответственно, изменения при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг.:

- ✓ климатического значения среднегодовой температуры при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг.;
- ✓ климатического значения амплитуды годового хода среднесуточной температуры при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг.;
- ✓ времени достижения среднесуточной температурой своего максимального значения в календарном году (климатический годовой ход аппроксимирован косинусоидальной функцией).

Представленные оценки предстоящих изменений климатических характеристик температурного режима на территории России и соседних стран при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг. (или на 2°С по отношению к доиндустриальному уровню) можно кратко охарактеризовать следующим образом.

В соответствии с полученными оценками, можно ожидать, что в России на всей территории в среднегодовом аспекте произойдет потепление на 1 – 4°С в зависимости от региона. Увеличение среднегодовой температуры будет наиболее выраженным (до 3 –

4°C) на севере Якутии и на юге Сибири. Последняя область есть часть обширной области потепления, охватывающей Казахстан, страны Центральной Азии, Монголию и примыкающие к ним районы Китая.

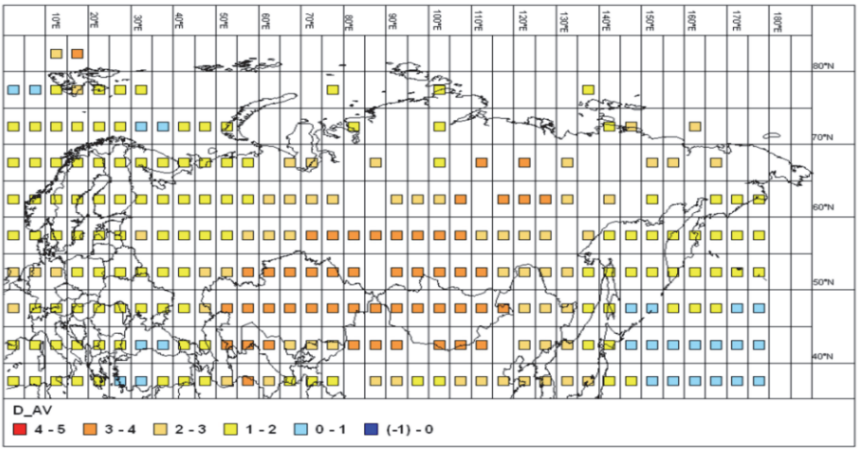

Рис. 2. *Ожидаемое среднее изменение климатического значения среднегодовой температуры при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг.*

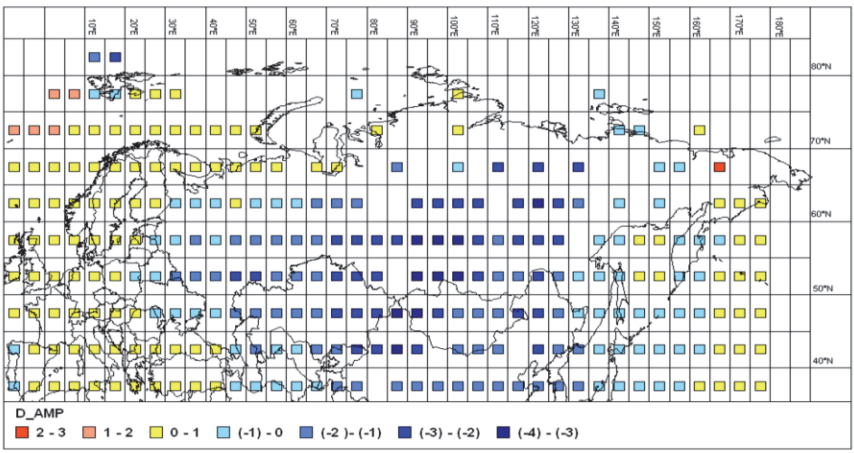

Рис. 3. *Ожидаемое среднее изменение амплитуды климатического годового хода среднесуточной температуры при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг.*

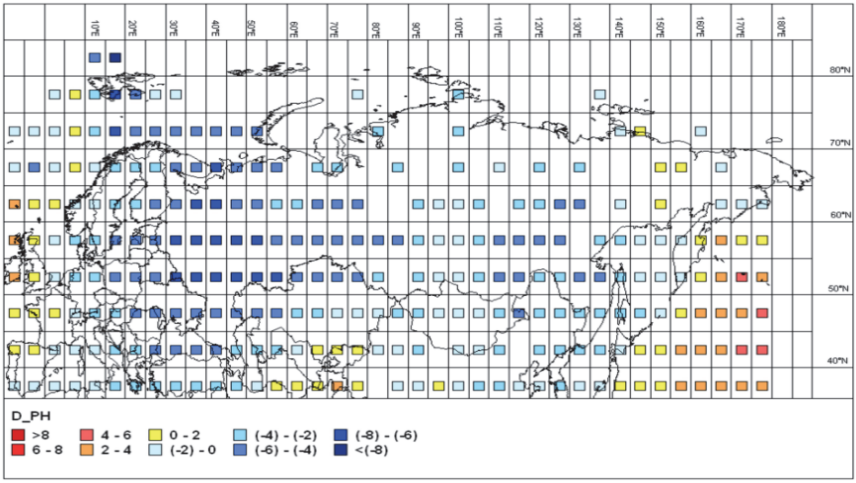

Рис. 4. *Ожидаемое среднее изменение времени максимума в климатическом годовом ходе среднесуточной температуры (климатический годовой ход аппроксимирован косинусоидальной функцией) при глобальном потеплении на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000 гг.*

При этом, на большей части территории – кроме Чукотки и примыкающих к океаническому побережью северных районов, расположенных западнее 110° в.д., − произойдет уменьшение амплитуды годового хода среднесуточной температуры. Оно будет наиболее выражено (до −3 … −2°С) примерно там же, где ожидается наибольшее увеличение среднегодовой температуры. Это означает, что наибольший рост температуры ожидается в холодное время года.

И, наконец, время достижения среднесуточной температурой максимального значения (для косинусоидального приближения климатического годового хода среднесуточной температуры) будет сдвигаться в сторону ранних дат практически на всей рассматриваемой территории. Исключения – некоторые районы Камчатки и районы на юге Центральной Азии. Максимальные значения сдвига – до 1 недели – произойдут в центральных областях европейской части России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2012. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. – М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». 293 С.
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Платова Т.В. 2010. Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Т. 23, С.11-22.
3. Елисеев А.В., Мохов И.И. 2008. Влияние вулканической активности на изменение климата последних нескольких веков: оценки с климатической моделью промежуточной сложности. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 44, № 6. С. 723-746.
4. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. 2008. Взаимодействие метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 44, № 2. С. 147-162.
5. Семенов С.М. 2004. Парниковые газы и современный климат Земли. – М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 175 С.
6. Семенов С.М., Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2008. Изменения глобальной температуры и региональные риски при некоторых стабилизационных сценариях антропогенной эмиссии диоксида углерода и метана. В кн.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6. Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов. Отв. ред. Г. С. Голицын. – М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН. С. 24-36.
7. Brohan P., Kennedy J.J., Haris I., Tett S.F. B., Jones P.D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. J. Geophysical Research. V. 111. D12106, doi:10.1029/2005JD006548
8. Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T. et al. 2007. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report. 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands. 124 P.
9. Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010. Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/2010/7/Add.1/, 15 March 2011. 31 P.
10. Special Report on Emission Scenarios (N. Nakićenovićh et al.). 2000. A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 599 P.

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ ОСРЕДНЕНИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА КЛИМАТА

Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, Л.К. Клещенко, В.Д. Смирнов*

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, *ggruza@yandex.ru

Реферат. Для избранных регионов России по данным реанализа NCEP/NCAR выполнено сравнение рядов пространственно осредненных аномалий температуры воздуха. Ряды рассчитаны с использованием доступных процедур осреднения в условиях существующей сети станционных наблюдений и реальной полноты исторических данных. Данные реанализа выбраны как наиболее соответствующие статистической структуре наблюдаемых полей температуры приземного воздуха и не содержащие пропусков. Приводятся оценки неопределенности результатов осреднения в условиях, максимально приближенных к реально доступным данным наблюдений (по освещенности территории, плотности станций и полноте наблюдений).

Ключевые слова. Климат, климатическая норма, аномалия температуры, пространственное осреднение, региональные средние, неопределенность.

ON SPATIAL AVERAGING IN CLIMATE MONITORING PROBLEMS

G.V. Gruza, E.Ya. Rankova, L.K. Kleschenko, V.D. Smirnov*

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, *ggruza@yandex.ru

Abstract. Spatially averaged series of surface air temperature are inter-compared for selected regions of Russia. The series are calculated from NCEP/NCAR reanalysis data with averaging procedures applicable to conditions of existing station network and actual completeness of observational data. Reanalysis outcomes are chosen as the most relevant to statistical structure of the observed surface air temperature fields, with no data missing. Uncertainties of regional means are assessed under conditions similar to real observational data as much as possible (in relation to spatial coverage, density and missing data).

Key words. Climate, climatic norm, temperature anomaly, spatially averaging, regional means, uncertainty.

Введение

Климатические исследования, имеющие большое научное и практическое значение, в качестве одной из важнейших задач включают мониторинг климата. На протяжении двух последних десятилетий регулярный мониторинг климатических изменений на территории Российской Федерации осуществляется ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» (ИГКЭ). Оценки текущих изменений климата в бюллетенях ИГКЭ (http://climatechange.igce.ru) представлены как в виде полей точечных (станционных) значений, так и для избранных регионов, по данным пространственно осредненных аномалий температуры воздуха и осадков. В статье (Анисимов, Жильцова, 2012) были подняты вопросы, связанные с неопределенностью региональных оценок изменений температуры воздуха и осадков на территории России, и выполнено сравнение оценок, полученных двумя различными методами пространственного осреднения данных метеостанций. Результаты авторов прокомментированы в (Ранькова, Груза, 2012). В дополнение к сделанному комментарию была проведена серия расчетов, позволившая получить методическое решение ряда вопросов, связанных с пространственным осреднением данных. Описанию основных результатов проведенного эксперимента и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи

Цель описываемого эксперимента – оценить ошибку пространственного (регионального) осреднения аномалий температуры воздуха по данным станционных наблюдений на территории России в условиях существующей сети станций, доступных массивов наблюдений и процедур осреднения. Весь анализ выполнен на данных о среднесуточной температуре воздуха на уровне 2м из обновленного массива реанализов NCEP/NCAR за период 1948-2011 гг. (Kistler et al., 2001). Данные реанализа выбраны как наиболее соответствующие статистической структуре наблюдаемых полей температуры приземного воздуха. С другой стороны, эти данные обеспечивают возможность количественно оценить эффект использования различных процедур

пространственного (по площади регионов) осреднения в условиях, максимально приближенных к реально доступным данным наблюдений (по освещенности территории, плотности станций и полноте наблюдений).

Логика анализа состоит в следующем. Сначала выполняется сравнение обсуждаемых методик пространственного осреднения («моделей») в применении к собственно данным реанализа, т.е. к данным, равномерно и достаточно плотно размещенным на территории регионов, не содержащим пропусков и серьезных выбросов (Задача 1). Представляется, что «межмодельные» различия региональных средних в этом случае можно полностью отнести за счет различия самих моделей (методов осреднения).

Далее необходимо перейти от сеточных данных к данным в точках расположения станций, что, естественно, вносит некоторую неопределенность в используемые данные, зависящую от метода интерполяции. Поэтому следующая задача – сравнить результаты осреднения для разных методов интерполяции, но при прочих равных условиях (Задача 2).

Можно предположить, что эффект перехода от сеточных данных к неравноточным наблюдениям (каковыми и являются реально доступные станционные данные) существенно зависит от плотности и конфигурации используемой сети станций, которые определяют степень освещенности территории данными наблюдений и, как результат, репрезентативность региональных оценок. Эффективность доступных сетей станций в сочетании с методом пространственного осреднения исследуется в Задаче 3.

Наконец, постоянным дополнительным источником неопределенности региональных оценок при практическом мониторинге (и особенно при анализе долгопериодных тенденций в изменении климата!) являются пропуски наблюдений, как в данных за прошлые годы, так и в текущих оперативных данных, поступающих с каналов связи иногда с существенной задержкой. Эффект реальных пропусков наблюдений в базовых массивах данных, используемых в ИГКЭ в технологии мониторинга климата, исследуется в Задаче 4, где приводятся заключительные оценки неопределенности результатов осреднения в условиях реально доступных наблюдений и методов осреднения.

Исходные данные и методика исследования

Массив реанализов содержит данные о глобальных полях температуры воздуха в узлах гауссовой сетки 92×194 (шаг 1,875° долготы) суточного разрешения. Для проведения расчетов были получены поля среднемесячной температуры, из которых извлечены данные внутри квадранта [33,4-88,5º с.ш.; 15-195º в.д.], покрывающего территорию РФ (2910 узлов сетки). Полученная таким образом «вырезка» T_{2910} использовалась в настоящем эксперименте в качестве базового массива.

В соответствии с задачей, месячные данные T_{2910} в каждом узле сетки были преобразованы в аномалии vT_{2910} (отклонения от средних за 1961-1990 гг.) и затем интерполированы в точки расположения станций. Так были получены массивы «станционных» аномалий среднемесячной температуры для трех сетей станций (*s455, s674* и *s926*) и трех методов интерполяции (*bi* – билинейная, *sp* – сплайновая и *st* – сплайновая с предварительной триангуляцией). Обозначим их как vT_{NNN_ii}, где *NNN* указывает размерность используемой сети (455, 674 или 926), а *ii* – вариант интерполяции (*bi*, *sp*, *st*). Для определенности отметим, что сеть станций *s455* соответствует массивам станционных наблюдений в базе данных ИГКЭ, используемым для мониторинга климата России, а варианты сетей *s674* и *s926* отражают ближайшую перспективу их расширения на основе данных, размещенных на портале ВНИИГМИ-МЦД (http://www.meteo.ru). Более подробно о сетях станций и методах интерполяции см. ниже.

Для сети *s455* дополнительно получен массив vT_{455_miss}, который по полноте наблюдений в точности соответствует реальному базовому массиву T_{455} в базе данных ИГКЭ (станционные данные о среднемесячной температуре приземного воздуха для мониторинга климата России). Для этого пропуски наблюдений в массиве T_{455} были «спроецированы» на массив vT_{455_bi}, т.е. для всех позиций «год-месяц-станция» с отсутствием реальных наблюдений в T_{455} значения в vT_{455_bi} заменялись константой отсутствия (*missing value*).

Каждый массив включает 768 полей (64 года по 12 месяцев). Результаты приводятся ниже для января, июля и для года в целом (последние получены по среднегодовым аномалиям). Ниже описываются более детально все факторы, влияющие на результаты осреднения и исследуемые в настоящей работе.

Регионы осреднения. Для анализа выбраны три региона: вся территория РФ, европейская часть России и Западная Сибирь. В бюллетене мониторинга климата ИГКЭ их границы задаются координатами вершин огибающих ломаных линий. Понятно, что осреднение по площади регионов с «криволинейными» границами требует решения ряда дополнительных задач (выделение «внутренних» точек региона и расчет их вклада в результирующее среднее), усложняющих оценку точности собственно процедур осреднения. Поэтому на данном этапе предпринятого анализа регионы были введены в форме широтно-долготных прямоугольников в широтном поясе 55-66º с.ш., примерно соответствующих (по долготной протяженности) названным выше регионам (рис. 1), а именно: *zRF* – [30-140º в.д.], *zERF* – [30-60º в.д.], *zWSi* – [60-90º в.д.]. Названия регионов условные, введены для удобства описания результатов. Представляется, что такие «прямоугольные» регионы в большей мере соответствуют решению методических вопросов, связанных с пространственным осреднением станционных данных (влияние плотности сети станций, их размещения на территории РФ, наличия пропусков в рядах наблюдений и др.), включая сравнение существующих алгоритмов осреднения.

Сети станций. В оперативно действующей в ИГКЭ системе мониторинга климата России используется сеть 455 станций на территории бывшего СССР *s455* (российских станций 310). В середине 1980-х, к моменту создания массива, это были практически все доступные гидрометеорологические станции СССР, передающие по каналам связи телеграммы КЛИМАТ (кодовая форма FM 71-XII CLIMAT), для которых удалось собрать документированные данные инструментальных наблюдений за температурой воздуха и осадками, начиная, по крайней мере, с 1951 года.

В настоящее время на сервере ВНИИГМИ-МЦД (http://www.meteo.ru/data) размещены исторические данные о среднемесячной температуре приземного воздуха на 518 станциях России (за период инструментальных наблюдений). Соединив два списка станций s_{455} и s_{518} и исключив из них станции, непригодные к исследованию изменений климата (закрытые станции и станции с длительными пропусками наблюдений, особенно в течение 1990-2000 гг.), получаем сеть 674 станций – s_{674}. Общее число российских станций, данные которых, по существующим оценкам, могут быть

подготовлены во ВНИИГМИ-МЦД в ближайшем будущем, составляет 926 (сеть *s926*). Однако среди них есть как длиннорядные станции (наблюдения с середины XIX столетия), так и открытые позже 1980 года. Географическое положение станций *s455* и *s674* показано на рис. 1.

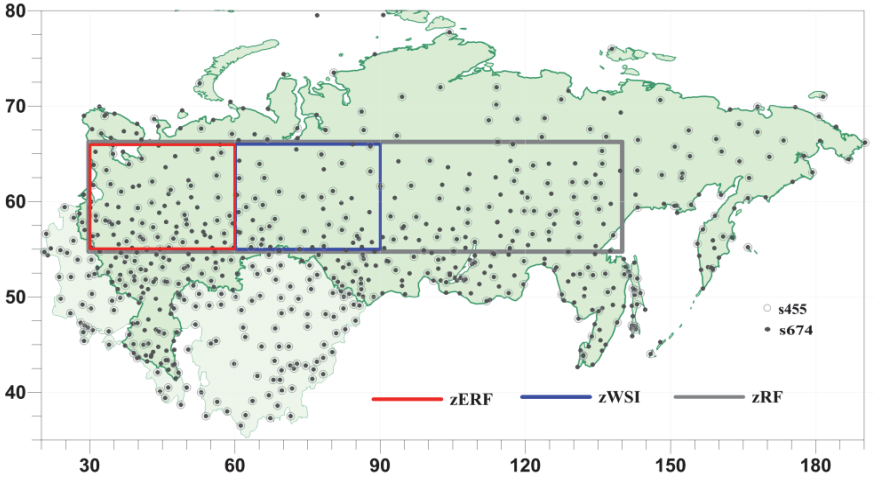

***Рис. 1**. Сети станций s455 и s674 и регионы осреднения: zRF [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]; zERF [55-66° с.ш., 30-60° в.д.]; zWSi [55-66° с.ш., 60-90° в.д.]*

Количество станций, по которым проводилось пространственное осреднение в каждом из трех рассматриваемых регионов с использованием сетей *s455, s674, s926* составляет соответственно: *zRF* {127, 214, 301}; *zERF* {44, 82, 114}; *zWSi* {36, 53, 76}.

Методы интерполяции. В данной работе сравниваются три метода интерполяции: билинейная (*bi*) и сплайн-интерполяция (*sp, st*).

Билинейная интерполяция основана на 2-ступенчатой линейной интерполяции (вдоль широтного круга и вдоль меридиана) с использованием четырех ближайших узлов сетки; в вырожденных случаях, когда искомая точка попадает на линии сетки (параллель и/или меридиан), используются два или даже один узел сетки.

Сплайн-интерполяция реализована в данном эксперименте средствами пакета NCAR Graphics (Cline, 1984), с использованием комплексов процедур Fitgrid и Cssgrid. С помощью первого

выполнена кубическая интерполяция (*sp*), второго – кубический сплайн (*st*) с предварительной триангуляцией Делоне на сфере (Renka, 1997a,b).

Методы пространственного осреднения. Рассматриваются три методики, обозначенные здесь как *Grads, Box и Ties*.

Grads – процедура AAVE в системе GRADS (Doty, Kinter, 1992, 1993), реализующая взвешенное осреднение сеточных данных внутри широтно-долготного прямоугольника (вес пропорционален длине широтного круга).

Box – методика двухступенчатого осреднения произвольно размещенных точечных данных, реализованная в технологии мониторинга климата в ИГКЭ. На первом этапе данные приводятся к широтно-долготной сетке путем осреднения точечных значений внутри каждой ячейки сетки («бокса»), а на втором – выполняется осреднение ячеечных средних с учетом площади пересечения ячейки с территорией региона. Аналогичный подход используется в ведущих метеорологических центрах мира при расчете временных рядов глобальной температуры (Peterson, Vose 1997; Brohan et al., 2006; Smith et al., 2008, Hansen et al., 2010). В настоящей работе рассматриваются две реализации данной методики, различающиеся характером вводимой широтно-долготной сетки: *Box1* (программа *eRegion*) – сетка регулярная, с разрешением 2,5º×5,0º (равнопромежуточные боксы); и *Box2* (программа *BoxAver*) – сетка «равноплощадных» боксов, площадь которых равна площади ячейки 2,5×2,5 градуса на экваторе.

Thies – методика осреднения с использованием полигонов Тиссена (Thiessen), реализованная в ФГБУ «Государственный гидрологический институт» Росгидромета на основе ГИС IDRISI-32 (Clark Labs, 2008). Временные ряды региональных средних с использованием методики Thies получены непосредственно авторами этой методики (ФГБУ ГГИ, Анисимов О.А.) и любезно предоставлены ими для данного эксперимента.

Для удобства дальнейшего описания введем дополнительные однобуквенные обозначения для каждого из методов: *G (Grads)*, *R (Box1 = eRegion*), *B (Box2=BoxAver*), *T (Thies)***.** Для обозначения результатов осреднения используем аббревиатуры вида: $G07_{2910}$. Здесь первая буква указывает метод осреднения (G-R-B-T), следующие две цифры – календарный период (00 – год, 01 – январь, 07 – июль) и далее – вариант использованных данных (нижний

индекс). В этом случае $G07_{2910}$ означает временной ряд июльских аномалий, регионально осредненных по сеточным данным vT_{2910} с помощью процедуры *Grads*. Аналогичный ряд среднегодовых значений будет обозначен как $G00_{2910}$ и т.д. Напомним, что и интерполяция, и пространственное осреднение выполняются по данным о точечных аномалиях.

Оценки. В качестве оценок различий между двумя методами в конкретных вариантах эксперимента (данные, календарные периоды и др.) будем рассматривать многолетние статистические характеристики ряда разностей (*dif*) соответствующих результатов осреднения, а именно:

$e_{dif} = E(dif)$ – среднее значение (здесь E – оператор временного осреднения);

$q_{dif} = sqrt\ (E(dif^2))$ – среднее квадратическое различие;

$\sigma_{dif} = sqrt\ (q^2 - e^2)$ – стандартное отклонение различий (для оценки доверительного интервала).

Дополнительно рассматриваются статистические характеристики самих рядов региональных средних аномалий температуры (vT), полученных по каждому методу:

σ_{vT} – стандартное отклонение региональных аномалий (ºС);

b_{vT} – коэффициент линейного тренда (ºС/10 лет);

d_{vT} – доля дисперсии, учтенная трендом (%);

corr – коэффициент корреляции сравниваемых рядов.

Все перечисленные оценки приводятся ниже за период 1948-2011 гг. Сравниваемые пары рядов в таблицах, как правило, указаны в заголовках столбцов. При расчете разностей в качестве уменьшаемого всегда выступает ряд, указанный вторым.

Результаты и обсуждение

Сравнение результатов осреднения при использовании непосредственно сеточных данных реанализа vT_{2910}

В данном разделе исследуется вопрос: в какой мере различаются результаты разных методов осреднения в применении непосредственно к сеточным данным реанализа? В качестве сравниваемых методов рассматриваются: *Grads* (*G*), *Box1* (*R*) и *Box2* (*B*). Метод *Thies* в этом случае не рассматривается, т.к. он практически совпадет с методом *Grads* (центры полигонов Тиссена совпадут с узлами сетки реанализа, а форма полигонов в точности совпадет с ячейками сетки).

В соответствии с принятыми обозначениями, для каждого временного среза (год-январь-июль) и каждого региона сравниваются временные ряды G_{2910}, R_{2910} и B_{2910}. В таблице 1 приводятся многолетние статистики этих рядов за 1948-2011 гг., в том числе средние (*e*), стандартные отклонения (σ), минимумы (*min*), максимумы (*max*) и оценки трендов (*b, d*). В последней строке таблицы приведены обобщенные значения стандартных отклонений (*S*), рассчитанные для каждого варианта эксперимента по выборке, объединяющей все три сравниваемых ряда. Эти величины можно рассматривать как усредненную (по методам пространственного осреднения) оценку изменчивости региональных средних и, следовательно, как характеристику их неопределенности.

Можно видеть, что во всех вариантах эксперимента статистики рядов для трех методов осреднения практически совпадают – различия между одноименными оценками находятся в пределах сотых долей градуса, а оценки линейных трендов просто одинаковы (с точностью до 0,01 ºС за 10 лет). Для примера, на рис. 2 приведены временные ряды региональных среднегодовых аномалий температуры для всех трех рассматриваемых регионов и трех методов осреднения. Рисунки для январской и июльской температур аналогичны.

Более детальные результаты попарного сравнения методов пространственного осреднения приведены в таблице 2, которая содержит оценки взаимной корреляции соответствующих временных рядов и статистики их попарных разностей (средние, стандартные отклонения, экстремумы). Пары сравниваемых методов указаны в названиях столбцов. Все приведенные оценки получены за 1948-2011 гг. Как следует из таблицы, межгодичные колебания регионально осредненной температуры всеми тремя методами отображаются синхронно – оценки корреляции рядов во всех случаях близки к единице. «Межмодельные» (между разными методами осреднения) различия оценок региональных среднегодовых температур для всех рассмотренных регионов колеблются в интервале от –0,06 до +0,08ºС. Аналогичный интервал для января и июля составляет соответственно [–0,25; +0,34ºС] и [–0,14; +0,13ºС]. Стандартные отклонения попарных «межмодельных» различий практически во всех случаях меньше 0,1ºС (для среднегодовой температуры – меньше 0,03ºС) и составляют лишь 2-3% от стандартного отклонения самих региональных средних (см. σ, *S* в табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным данным за 1948-2011 гг. с использованием методов Grads, Box1 и Box2

Оценки	Год			Январь			Июль		
	Grads	*Box1*	*Box2*	*Grads*	*Box1*	*Box2*	*Grads*	*Box1*	*Box2*
Регион [55-66º с.ш., 30-140º в.д.]									
e	0,307	0,306	0,309	0,819	0,821	0,815	0,240	0,239	0,247
σ	0,859	0,865	0,852	3,034	3,065	3,014	0,716	0,719	0,712
min	−2,22	−2,23	−2,21	−7,29	−7,31	−7,34	−1,20	−1,20	−1,20
max	1,88	1,89	1,87	7,71	7,77	7,67	1,75	1,76	1,77
b	0,12	0,12	0,12	-0,03	-0,03	-0,02	0,13	0,13	0,13
D	6,6	6,5	6,4	0,0	0,0	0,0	10,9	11,0	10,9
S	0,854			3,022			0,712		
Регион [55-66º с. ш., 30-60º в. д.]									
e	0,269	0,267	0,272	1,072	1,067	1,084	0,266	0,269	0,261
σ	0,894	0,897	0,893	3,299	3,318	3,295	1,452	1,460	1,434
min	−2,14	−2,14	−2,14	−6,62	−6,62	−6,63	−2,79	−2,79	−2,78
max	1,79	1,79	1,77	7,56	7,58	7,54	5,00	5,03	4,91
b	0,08	0,08	0,08	0,17	0,17	0,18	0,26	0,26	0,25
D	2,7	2,8	2,7	0,9	0,9	1,0	10,8	11,0	10,6
S	0,890			3,287			1,441		
Регион [55-66º с.ш., 60-90º в.д.]									
E	0,252	0,50	0,254	0,753	0,757	0,760	0,022	0,021	0,029
Σ	1,014	1,017	1,001	3,699	3,715	3,659	1,454	1,464	1,442
min	−2,32	−2,33	−2,31	−8,62	−8,63	−8,54	−3,74	−3,76	−3,73
max	2,52	2,53	2,49	8,45	8,44	8,46	3,36	3,40	3,33
B	0,14	0,14	0,14	-0,06	-0,06	-0,06	0,01	0,01	0,01
D	6,7	6,7	6,5	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
S	1,005			3,672			1,446		

Условные обозначения: e – среднее (°С), *σ* – стандартное отклонение (°С), *min*, *max* – экстремумы (°С), *b* – коэффициент линейного тренда (°С/10 лет), *D* – вклад тренда в дисперсию ряда (*%*), *S* – обобщенное (по методам осреднения) стандартное отклонение (°С).

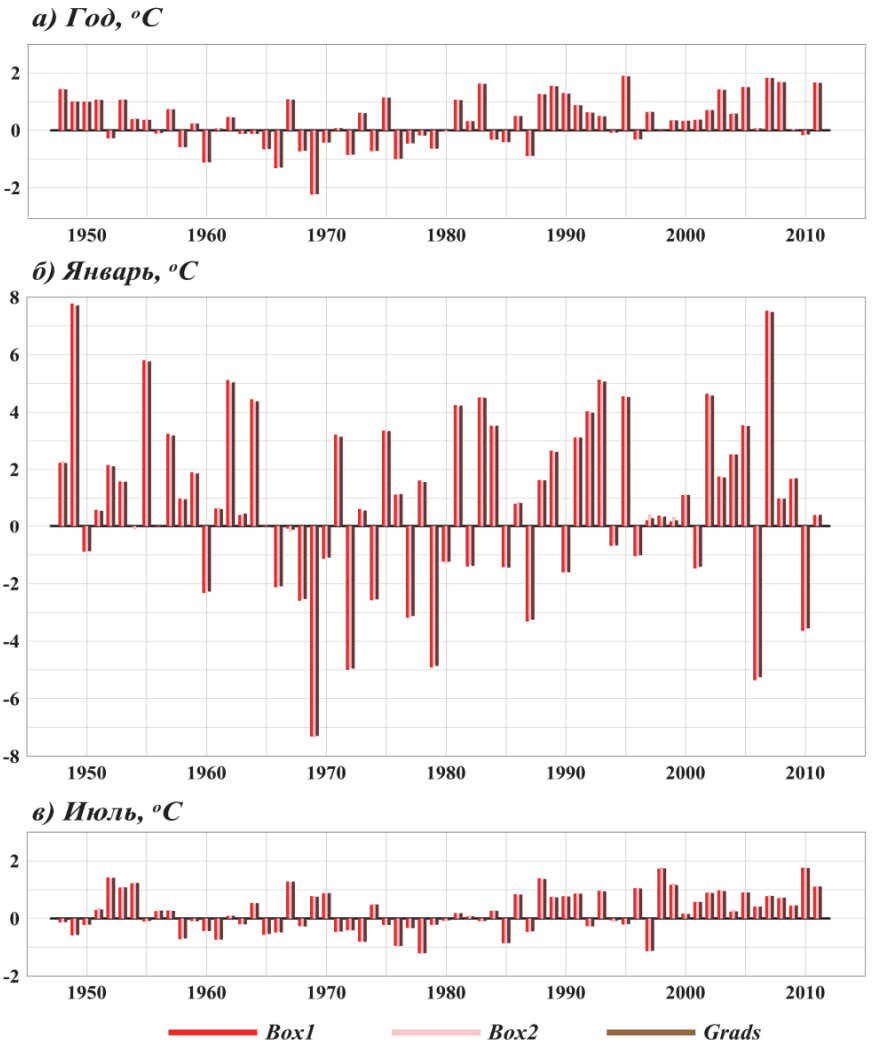

Рис. 2. *Временные ряды среднегодовых (а), январских (б) и июльских (с) аномалий температуры воздуха, осредненных по региону zRF [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]. Ряды рассчитаны по сеточным полям реанализа vT2910 за 1948-2011 гг. с использованием трех методов пространственного осреднения (Box1, Box2, Grads – см. легенду). Аномалии рассчитаны относительно средних за период 1961-1990 гг.*

Дополнительно отметим, что стандартное отклонение S_{dif} (см. S в табл. 2) можно рассматривать как общую (для рассмотренных методов) оценку неопределенности результатов регионального осреднения для соответствующего региона и календарного периода. Получаем, что 95% доверительный интервал ошибок осреднения ($\pm 1{,}96\ S_{dif}$) в зависимости от региона колеблется в интервале ±[0,03-0,04°C] для среднегодовой температуры, ±[0,12-0,17ºC] для температуры января и ±[0,04-0,09°C] для температуры июля. Соответственно, диапазон возможной ошибки осреднения составляет от 0,03 до 0,06 сигмы рассчитываемой величины.

Вывод: при использовании данных, равномерно и достаточно плотно размещенных на территории региона (таковой является сетка реанализа с разрешением менее двух градусов), различия между рассматриваемыми методами осреднения не выходят за пределы точности измерений температуры воздуха. Оценки трендов регионально осредненных аномалий температуры за исследуемый период практически одинаковы для всех трех методов осреднения.

Сравнение результатов осреднения «станционных» данных, полученных с использованием разных методов интерполяции

Задача данного раздела: оценить неопределенность результатов регионального осреднения, вносимую интерполяцией сеточных данных в точки расположения станций. Анализ выполнен на примере метода *Box1* и сети *s455*. Сравниваются временные ряды регионально осредненных аномалий, рассчитанные по четырем массивам данных: vT_{2910}, vT_{455_bi}, vT_{455_sp} и vT_{455_st}. В соответствии с принятыми обозначениями, это ряды R_{2910}, R_{455_bi}, R_{455_sp}, R_{455_st}. Напомним, что первый из них получен по сеточным данным, а три остальных – по данным 455 станций, полученным с помощью трех методов интерполяции.

Как и ранее, анализ выполнен для трех регионов и трех календарных периодов (год, январь, июль) по данным за 1948-2011 гг. Задача предполагает исследование двух вопросов: как влияет на результат осреднения метод интерполяции? и как влияет переход от данных в узлах регулярной сетки к неравномерно размещенным данным в точках сети *s455*?

Таблица 2

Статистические характеристики различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным данным за 1948-2011 гг. с использованием методов Grads, Box1 и Box2

Оценки	Год			Январь			Июль		
	(Grads, Box1)	*(Grads, Box2)*	*(Box1, Box2)*	*(Grads, Box1)*	*(Grads, Box2)*	*(Box1, Box2)*	*(Grads, Box1)*	*(Grads, Box2)*	*(Box1, Box2)*
Регион [55-66º с.ш., 30-140º в.д.]									
e	0,000	0,003	0,003	0,002	−0,004	−0,006	−0,001	0,006	0,008
σ	0,009	0,015	0,021	0,041	0,053	0,082	0,012	0,021	0,027
min	−0,02	−0,03	−0,04	−0,10	−0,12	−0,17	−0,03	−0,04	−0,04
max	0,02	0,04	0,06	0,08	0,13	0,20	0,02	0,06	0,07
corr	1,0000	0,9999	0,9998	1,0000	0,9999	0,9998	0,9999	0,9996	0,9993
S	0,016			0,061			0,021		
Регион [55-66º с.ш., 30-60º в.д.]									
e	−0,003	0,003	0,006	−0,005	0,012	0,016	0,003	−0,005	−0,008
σ	0,010	0,018	0,024	0,039	0,070	0,095	0,019	0,035	0,048
min	−0,03	−0,03	−0,04	−0,10	−0,14	−0,15	−0,04	−0,12	−0,14
max	0,02	0,07	0,08	0,07	0,24	0,34	0,06	0,05	0,07
corr	0,9999	0,9998	0,9997	0,9999	0,9998	0,9996	0,9999	0,9998	0,9996
S	0,018			0,072			0,036		
Регион [55-66º с.ш., 60-90º в.д.]									
e	−0,002	0,002	0,004	0,003	0,007	0,003	0,000	0,007	0,008
σ	0,012	0,024	0,029	0,049	0,086	0,115	0,29	0,047	0,050
min	−0,03	−0,04	−0,06	−0,15	−0,18	−0,25	−0,07	−0,07	−0,13
max	0,03	0,05	0,06	0,12	0,31	0,32	0,07	0,13	0,12
corr	0,9999	0,9998	0,9997	0,9999	0,9998	0,9996	0,9998	0,9995	0,9995
S	0,023			0,087			0,043		

Условные обозначения: e, σ, min, max, S – см. табл. 1, но для попарных разностей рядов; corr – коэффициент корреляции рядов.

На первый вопрос отвечают данные таблицы 3, на второй – данные таблицы 4. Оценки приведены в терминах ранее описанных статистических характеристик *e, σ, min, max, corr, S.*

Результаты попарного сравнения региональных рядов R_{455_bi}, R_{455_sp}, R_{455_st}, отличающихся лишь методом интерполяции (табл. 3), показали, что для всех сезонов и регионов различия между региональными средними, рассчитанными по разным массивам интерполированных данных, остаются внутри диапазона от −0,04 до +0,07°С. Смещение оценок отсутствует, ряды идеально коррелированы, а стандартное отклонение исследуемых различий лишь в отдельных вариантах достигает 0,02°С. Таким образом, различия региональных средних не выходят за пределы точности измерений и выбор метода интерполяции (из трех рассмотренных) при переходе от сеточных данных к «станционным» практически не влияет на результаты осреднения. В дальнейшем анализе предпочтение отдано билинейной интерполяции как более простой и очевидной. Сами ряды различий аномалий январской и июльской температуры приведены на рис. 3 для европейского и западно-сибирского регионов.

В таблице 4 анализируются различия между рядами регионально осредненных аномалий температуры R_{2910} и R_{455_bi} (осреднение методом *Box1* по данным в регулярной сетке и по данным в точках размещения 455 метеостанций). Можно видеть, что среднее значение разностей сравниваемых рядов во всех вариантах составляет менее 0,03°С, а стандартное отклонение меняется в зависимости от сезона и составляет 0,1-0,2°С для января и 0,07-0,11°С для июля. Для среднегодовых аномалий температуры эта величина существенно ниже (0,04-0,06°С). Во всех случаях диапазон ошибок при использовании «станционных» данных выше, чем при осреднении значений в узлах регулярной сетки. Коэффициенты корреляции сравниваемых рядов во всех случаях равны 1.

Вывод: переход от регулярной сетки реанализа (разрешение менее 2°) к данным в точках расположения 455 станций (сеть климатического мониторинга) значительно увеличивает ошибку осреднения, но не влияет на оценки региональных трендов. Диапазон ошибок осреднения практически не зависит от метода интерполяции, но существенно зависит от календарного периода. Межгодичные колебания регионально осредненных рядов R_{455_bi}, как и оценки линейных трендов, хорошо согласуются с соответствующими результатами, полученными по полной сетке данных R_{2910}.

Таблица 3

Оценки различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по интерполированным данным R_{455_bi}, R_{455_sp}, R_{455_st} за 1948-2011 гг. Метод осреднения: Box1. Методы интерполяции: bi, sp, st.

Оценки	Год			Январь			Июль		
	(bi, sp)	*(bi, st)*	*(sp, st)*	*(bi, sp)*	*(bi, st)*	*(sp, st)*	*(bi, sp)*	*(bi, st)*	*(sp, st)*
Регион [55-66º с.ш., 30-140º в.д.]									
e	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01
min	−0,01	−0,01	0,00	−0,03	−0,04	−0,01	−0,01	−0,01	−0,01
max	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,04	0,03
corr	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
S	0,00			0,01			0,01		
Регион [55-66º с.ш., 30-60º в.д.]									
e	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
min	−0,01	−0,01	−0,01	−0,04	−0,05	−0,03	−0,03	−0,02	−0,02
max	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02	0,07	0,07
corr	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
S	0,00			0,02			0,02		
Регион [55-66º с.ш., 60-90º в.д.]									
e	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
min	−0,01	−0,01	−0,01	−0,05	−0,05	−0,01	−0,03	−0,03	−0,02
max	0,01	0,02	0,01	0,05	0,05	0,02	0,03	0,03	0,01
corr	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
S	0,01			0,02			0,01		

Условные обозначения см. в табл. №2.

Таблица 4

Оценки различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным данным реанализа R_{2910} и по интерполированным данным R_{455_bi} за 1948-2011 гг. Метод осреднения Box1.

Оценки	[55-66° с.ш., 30-140° в.д.]			[55-66° с.ш., 30-60° в.д.]			[55-66° с.ш., 60-90° в.д.]		
	год	*январь*	*июль*	*год*	*январь*	*июль*	*год*	*январь*	*июль*
e	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	-0,02	0,01
σ	0,04	0,12	0,07	0,05	0,17	0,09	0,06	0,22	0,11
min	−0,09	−0,25	−0,13	−0,09	−0,39	−0,18	−0,14	−0,44	−0,28
max	0,08	0,28	0,21	0,12	0,50	0,20	0,09	0,59	0,26
corr	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Условные обозначения см. в таблице 2.

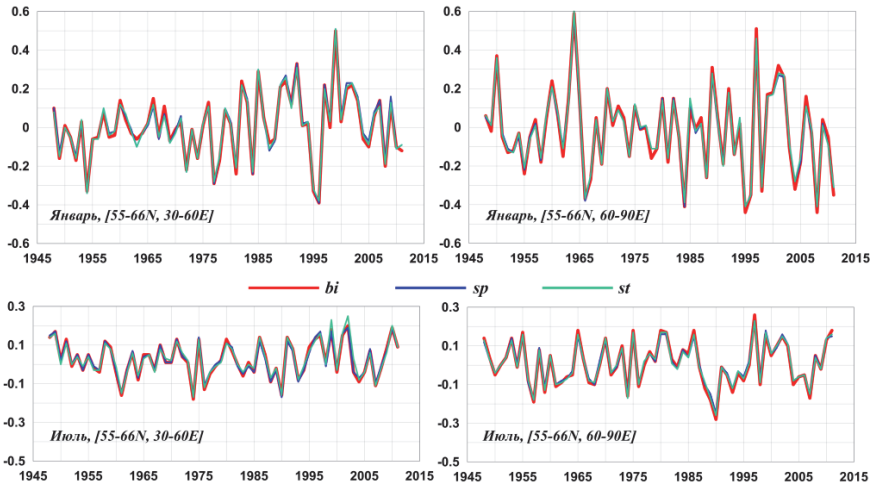

Рис. 3. *Временные ряды различий между средними региональными аномалиями температуры воздуха в январе (вверху) и июле (внизу), рассчитанными по сеточным полям реанализа vT_{2910} и интерполированным данным vT_{455} для европейского (слева) и западносибирского (справа) регионов за 1948-2011 гг. Метод пространственного осреднения: Box1. Методы интерполяции: bi – билинейная, sp – кубический сплайн, st – кубический сплайн с триангуляцией*

Сравнение результатов осреднения «станционных» данных для сетей станций разной плотности

В данном разделе сравниваются (при прочих равных условиях) региональные средние, полученные по исходным сеточным полям реанализа и по данным реанализа, интерполированным в точки расположения станций *s455, s674, s926*. Цель такого сравнения – оценить влияние плотности размещения точечных данных на результаты осреднения. К сожалению, в данном случае расширение сети станций никак не связано с равномерным увеличением ее плотности, а всего лишь отражает исторически сложившуюся ситуацию с доступными данными наблюдений на территории России.

Учитывая предыдущие выводы, «прочие равные условия» представлены здесь билинейным методом интерполяции (*bi*) и принятым в мониторинге методом регионального осреднения (*Box1*). В результате, временные ряды региональных средних R_{455_bi}, R_{674_bi} и R_{926_bi} сравниваются с рядом R_{2910} (табл. 5) и между собой (табл. 6). В таблицах соответствующие варианты сетей обозначены как s_{455}, s_{674}, s_{926} и s_0. Данные столбца (s_0, s_{455}) повторяют оценки табл. 4 и приведены здесь для удобства сопоставления. Результаты сравнения приведены (аналогично табл. 3) в терминах статистик *e, σ, min, max, corr, S* для трех календарных периодов (год, январь, июль) и трех регионов. В таблице 5 дополнительно приведен коэффициент линейного тренда рядов попарных разностей (*b*, °С/10 лет), который равен разности коэффициентов трендов самих сравниваемых рядов.

В таблице 6 представлены обобщенные оценки, рассчитанные по объединенной выборке для всех трех пар сетей. Таким образом, разности в табл. 5 означают «ошибку» осреднения за счет перехода от исходных сеточных данных к данным в точках расположения станций конкретной сети (чем меньше σ, тем лучше сеть описывает поле на территории региона). С другой стороны, оценка S_{dif} в таблице 6 характеризует усредненную ошибку при использовании любой из трех рассматриваемых сетей вместо исходного сеточного поля реанализа (чем меньше S_{dif}, тем меньше результат осреднения зависит от выбора сети).

Для иллюстрации эффекта каждой из сетей на рис. 4 для трех регионов показаны временные ряды соответствующих различий между пространственно осредненными среднегодовыми аномалиями

температуры. Как видно из этого рисунка и подтверждается оценками таблицы 5, расширение сети от *s455* до *s674* заметно улучшает результаты осреднения: уменьшается стандартное отклонение рядов разностей (*s*) и сужается диапазон их изменения [*min* , *max*]. Однако дальнейшее расширение сети до *s926* в целом для рассматриваемого широтного пояса и для западносибирского региона оказывается менее эффективным.

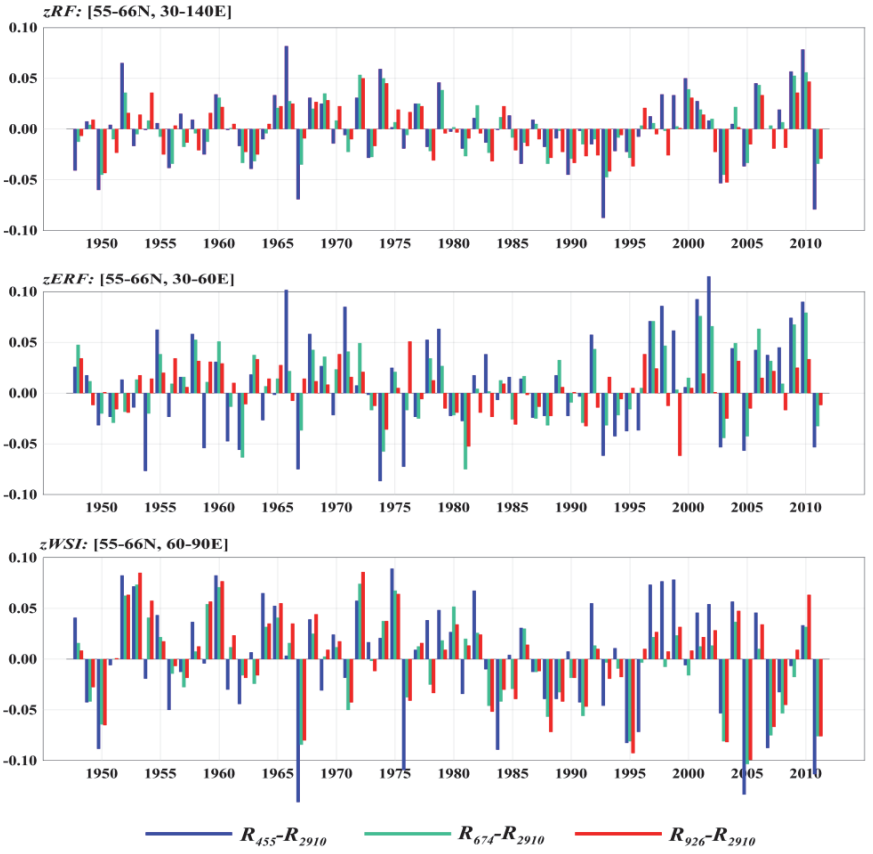

Рис. 4. *Временные ряды различий между средними годовыми региональными аномалиями температуры воздуха, рассчитанными по сеточным полям реанализа vT_{2910} и по интерполированным данным в точках расположения станций s455, s674, s926. Метод интерполяции: билинейная. Метод пространственного осреднения: Box1.*

Таблица 5

Оценки различия рядов региональных аномалий температуры, рассчитанных по полным полям реанализа и по интерполированным данным в точках s455, s674 и s926. Метод интерполяции: bi. Метод осреднения: Box1. Период оценивания: 1948-2011 гг.

Оценки	Год			Январь			Июль		
	(s_0, s_{455})	(s_0, s_{674})	(s_0, s_{926})	(s_0, s_{455})	(s_0, s_{674})	(s_0, s_{926})	(s_0, s_{455})	(s_0, s_{674})	(s_0, s_{926})
Регион [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]									
e	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
σ	0,04	0,03	0,02	0,12	0,09	0,09	0,07	0,04	0,05
min	−0,09	−0,05	−0,05	−0,25	−0,17	−0,16	−0,13	−0,09	−0,09
max	0,08	0,06	0,05	0,28	0,22	0,31	0,21	0,10	0,08
corr	0,999	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000	0,995	0,998	0,998
b	0,001	0,002	−0,002	0,009	0,010	0,012	0,008	0,004	−0,001
S	0,03			0,10			0,06		
Регион [55-66° с.ш., 30-60° в.д.]									
e	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	-0,01
σ	0,05	0,04	0,02	0,17	0,14	0,11	0,09	0,06	0,04
min	−0,09	−0,08	−0,06	−0,39	−0,33	−0,23	−0,18	−0,11	−0,13
max	0,12	0,08	0,05	0,50	0,37	0,24	0,20	0,13	0,06
corr	0,999	0,999	1,000	0,999	0,999	1,000	0,998	0,999	1,000
b	0,006	0,002	−0,002	0,016	0,009	−0,004	0,002	−0,001	−0,009
S	0,04			0,14			0,07		
Регион [55-66° с.ш., 60-90° в.д.]									
e	0,00	0,00	0,00	−0,02	−0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
σ	0,06	0,04	0,05	0,22	0,17	0,18	0,11	0,10	0,10
min	−0,14	−0,10	−0,10	−0,44	−0,32	−0,31	−0,28	−0,19	−0,20
max	0,09	0,07	0,09	0,59	0,42	0,43	0,26	0,19	0,21
corr	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999	0,999	0,998	0,999	0,998
b	−0,004	−0,007	−0,007	−0,014	−0,004	0,001	0,002	−0,003	−0,002
S	0,05			0,19			0,10		

Условные обозначения см. в табл. №2; b (°C/10 лет) – разность коэффициентов линейного тренда сравниваемых рядов.

Таблица 6

Обобщенные оценки различия рядов регионально осредненных аномалий температуры за 1948-2011 гг., в среднем для сетей станций s_{455}, s_{674} и s_{926}

Оценки	[55-66° с.ш., 30-140° в.д.]			[55-66° с.ш., 30-60° в.д.]			[55-66° с.ш., 60-90° в.д.]		
	год	*январь*	*июль*	*год*	*январь*	*июль*	*год*	*январь*	*июль*
e_{dif}	−0,002	0,003	−0,014	−0,003	0,003	−0,027	0,000	0,009	−0,005
S_{dif}	0,021	0,079	0,040	0,039	0,145	0,081	0,029	0,103	0,044
$1{,}96*S_{dif}$	0,041	0,155	0,078	0,077	0,284	0,158	0,057	0,203	0,086
S_{vT}	0,845	2,994	0,717	0,883	3,258	1,443	0,985	3,604	1,399
S_{dif}/S_{vT}	0,025	0,026	0,055	0,045	0,044	0,056	0,030	0,029	0,031

Условные обозначения: e_{dif}, S_{dif} – средние и сигма рядов попарных разностей, S_{vT} – сигма самих рядов

В то же время для европейского региона просматривается определенное преимущество сети *s926* – такая ситуация может указывать на то, что расширение сети *s926* произошло в большей мере за счет европейских станций. Этот результат согласуется с оценками таблицы 6, согласно которой стандартное отклонение S_{dif} для европейского региона на 30% выше, чем для западносибирского, во все рассмотренные «сезоны» (год, январь, июль).

Визуальное сравнение рядов регионально осредненных аномалий температуры, рассчитанных по сеточным и интерполированным данным (здесь не приведены) убедительно подтверждает синхронность их межгодовых колебаний, которая отражена коэффициентами корреляции в таблице 5. Достаточно устойчивые оценки линейных трендов в рядах регионально осредненных аномалий температуры обеспечиваются уже при использовании сети *s674* – ожидаемая ошибка для всех трех регионов и трех календарных периодов ниже 0,01°С/10лет. Но даже при использовании сети *s455* различия оценок линейного тренда по сеточным и интерполированным данным не превышают 0,016°С/10лет.

Вывод: расширение сети от 455 до 674 станций (в рамках рассматриваемой конфигурации) заметно улучшает результаты осреднения, т.е. уменьшает ожидаемую ошибку, вносимую использованием неравномерно размещенных точечных данных (в точках расположения станций) вместо сеточных данных реанализа (с разрешением менее 2°). Однако дальнейшее расширение сети до 926 станций дает лишь локальный эффект (в европейском регионе). В целом, можно считать, что расширение сети эффективно при условии сопутствующего улучшения освещенности территории региона данными наблюдений. Отметим, что подобный анализ позволяет априори оценить (по данным реанализа) эффективность любой проектируемой конфигурации сети станций для заданной методики осреднения и территории региона. В частности, можно видеть, что даже при использовании сети 926 станций (следовательно, и двух других) освещенность данными в азиатском секторе России (особенно в северных районах) остается определенно недостаточной и заметно ниже, чем на европейской территории России.

Оценка неопределенности результатов осреднения в условиях реально доступных наблюдений и методов осреднения

Следующий результат касается оценки ожидаемой ошибки осреднения в условиях практического мониторинга климата, выполняемого в ИГКЭ в настоящее время. Напомним, что базовый массив мониторинга климата содержит данные о среднемесячной температуре воздуха на 455 станциях территории бывшего СССР, которые, как было показано выше, недостаточно полно и неравномерно освещают территорию РФ, особенно ее азиатскую часть. Серьезным источником дополнительной неопределенности принято считать наличие эпизодических пропусков наблюдений, охватывающих иногда весьма большие территории и нарушающие однородность длиннорядных наблюдений.

С учетом результатов предыдущих сопоставлений, в данном эксперименте проведено сравнение рядов региональных средних, полученных по массиву vT_{455_bi} (данные реанализа, интерполированные в точки сети *s455* посредством билинейной интерполяции) с использованием трех методов пространственного

осреднения: *Box1, Box2* и *Thies*. Метод *Grads* в этом случае не рассматривался, поскольку он не предусматривает взвешенного осреднения неравноточных данных. Для анализа влияния пропусков наблюдений аналогичные комплекты оценок рассчитаны по массиву vT_{455_miss}, который получен из массива vT_{455_bi} исключением значений, соответствующих пропускам данных в реальных наблюдениях (далее массив vT_{455_bi} будем обозначать просто vT_{455}). Сравнение выполнено, как и во всех других экспериментах, для трех регионов и трех календарных периодов.

Результаты сравнения приведены в таблице 7 для одного региона [55-66º с.ш., 30-140º в.д.], но для всех пар рассматриваемых методов (указаны в заголовках столбцов). Для полной картины и удобства анализа в таблице представлены все три варианта входных данных: vT_{2910} – сеточные поля реанализа, vT_{455} – данные на сети 455 станций (билинейная интерполяция) без пропусков наблюдений и vT_{455_miss} – те же данные на сети 455 станций, но с реальной полнотой наблюдений. Оценки для vT_{2910} повторяют таковые из верхней строки таблицы 2. Таким образом, приведенные в таблице 7 результаты позволяют судить о масштабах «межмодельных» (между методами осреднения) различий в зависимости от количества и размещения данных (2910 узлов регулярной сетки или сеть 455 станций), полноты наблюдений и календарного периода.

Временные ряды пространственно осредненных аномалий средней годовой температуры по региону [55-66º с.ш., 30-140º в.д.] приведены на рисунке 5. Смежными столбиками здесь показаны результаты осреднения тремя сравниваемыми методами *Box1, Box2* и *Thies*. Уже из рисунка видно, что «межмодельные» различия (между столбиками) очень малы в сравнении с масштабом изменчивости самих регионально осредненных аномалий. Это наблюдение согласуется с оценками *S* (табл. 7), которые колеблются в диапазоне 0,019 – 0,025ºС для годовой аномалии температуры в регионе *zRF* (по данным vT_{455}). Для январских температур этот диапазон составил 0,07-0,09ºС, для июльских – 0,04-0,06ºС. Аналогичные оценки по массиву с пропусками данных vT_{455_miss} несколько выше, но даже в январе они не превышают точности наблюдений 0,1ºС.

Таблица 7

Оценки различия рядов регионально осредненных аномалий температуры при использовании разных методов пространственного осреднения (Box1, Box2, Thies) и разных наборов входных данных (vT_{2910}, vT_{455}.vT_{455_miss}). Регион осреднения: [55-66º с.ш., 30-140º в.д.]. Период оценивания: 1948-2011 гг.

Оценки	vT_{2910}			vT_{455}			vT_{455_miss}		
	(Box1, Box2)	*(Grads, Box1)*	*(Grads, Box2)*	*(Box1, Box2)*	*(Thies, Box1)*	*(Thies, Box2)*	*(Box1, Box2)*	*(Thies, Box1)*	*(Thies, Box2)*
Год									
e	0,003	0,000	−0,003	0,002	−0,002	−0,003	0,002	0,001	−0,001
q	0,021	0,009	0,015	0,022	0,019	0,025	0,021	0,028	0,028
δ	0,025	0,011	0,017	0,026	0,022	0,029	0,025	0,033	0,033
corr	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999
b	−0,003	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,003	0,003
Январь									
e	−0,006	−0,002	0,004	−0,005	−0,007	−0,002	−0,012	−0,015	−0,003
q	0,083	0,041	0,053	0,087	0,074	0,089	0,083	0,104	0,099
δ	0,027	0,014	0,018	0,029	0,025	0,030	0,028	0,035	0,033
corr	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999
b	0,010	0,005	−0,004	−0,010	−0,004	0,006	−0,011	−0,006	0,005
Июль									
e	0,008	0,001	−0,006	−0,002	−0,017	−0,014	−0,003	−0,014	−0,011
q	0,028	0,012	0,022	0,042	0,053	0,061	0,046	0,068	0,074
δ	0,039	0,016	0,031	0,058	0,074	0,086	0,063	0,094	0,103
corr	0,999	1,000	1,000	0,998	0,998	0,997	0,998	0,996	0,995
b	−0,002	−0,001	0,001	−0,001	−0,008	−0,007	0,000	−0,009	−0,009

Условные обозначения: e, q, b – среднее значение, среднеквадратическое различие и коэффициент линейного тренда «межмодельных» различий; $\delta = q/\sigma_{vT}$ – относительное различие; corr – коэффициент корреляции сравниваемых рядов (см. заголовок столбца)

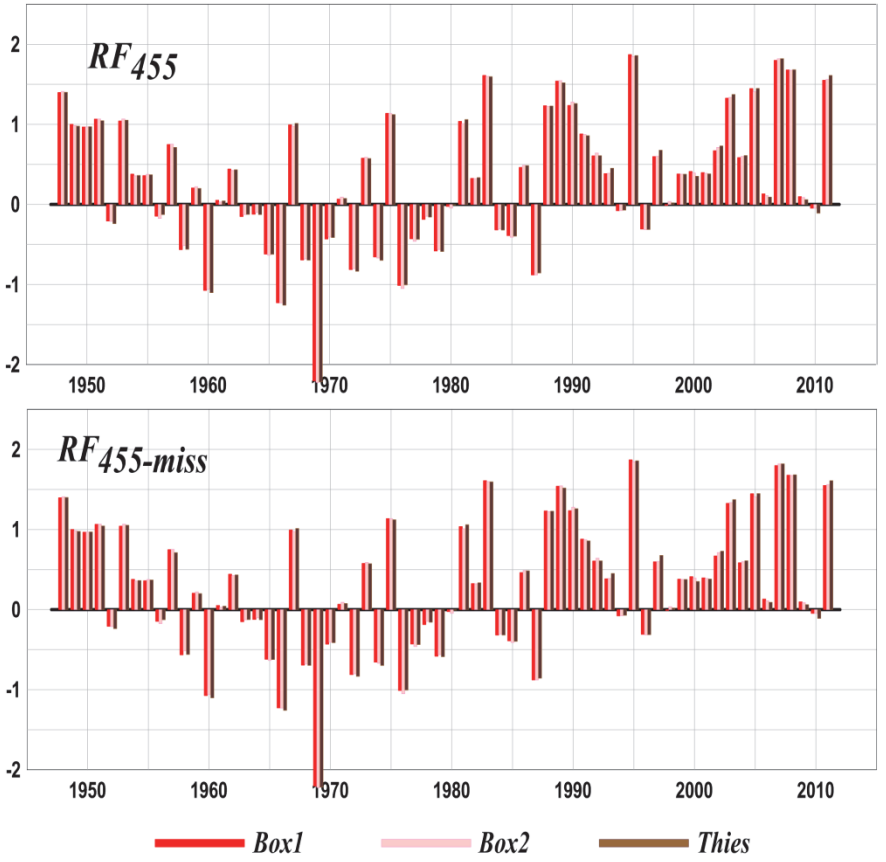

Рис. 5. *Временные ряды среднегодовых аномалий температуры воздуха, осредненных по территории региона zRF [55-66° с.ш., 30-140° в.д.]. Ряды рассчитаны по интерполированным данным vT_{455_bi} (вверху) и vT_{455_miss} (внизу) за 1948-2011 гг. с использованием трех методов пространственного осреднения: Box1, Box2 и Thies.*

«Межмодельная» корреляция рядов для всех наборов данных и всех сравниваемых методов близка к 1, а различия в оценках линейного тренда практически не выходят за пределы 0,01°С/10 лет.

На рисунке 6 более детально показаны различия между методами *Thies* и *Box1* для разных регионов и сезонов в двух вариантах расчета: по полным данным vT_{455} и по данным с реальными пропусками наблюдений vT_{455_miss}. Хорошо видно, что с

середины 1990-х годов при наличии пропусков данных в исходном массиве различия увеличиваются и, соответственно, точность оценок региональных средних уменьшается. Отсутствие данных наблюдений в этот период вследствие закрытия метеорологических станций составляет в регионах до 22%. Этот фактор особенно четко проявляется в оценках для региона *zWSi* (Западная Сибирь).

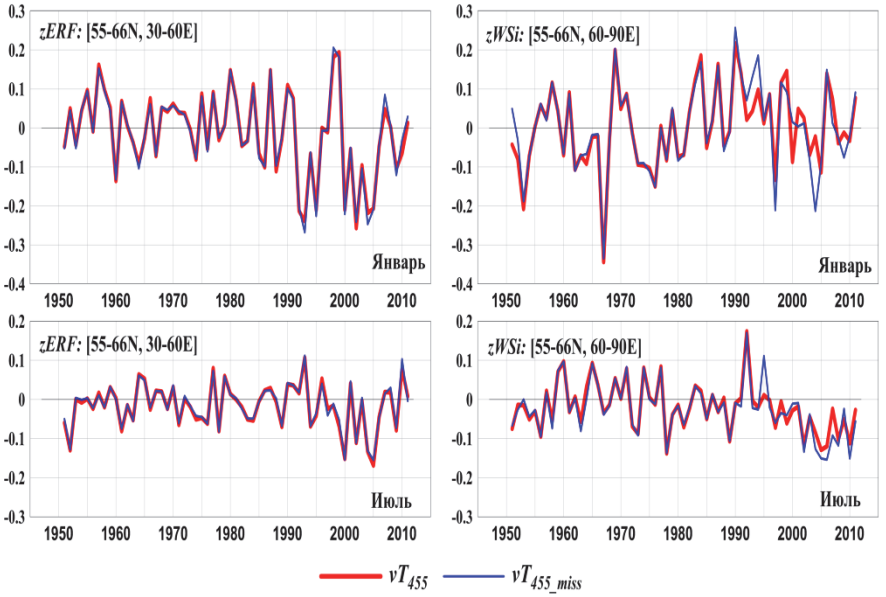

Рис. 6. *Временные ряды «межмодельных» различий (между методами осреднения Box1 и Thies) для январских и июльских аномалий температуры в европейском (zERF) и западносибирском (zWSi) регионах. Осреднение выполнено по интерполированным данным* vT_{455} *и* vT_{455_miss} *за 1948-2011 гг.*

В таблице 8 приведены оценки попарного сопоставления рядов средних аномалий температуры для каждого из трех регионов и каждого из исходных массивов, но в среднем по четырем рассмотренным методам пространственного осреднения. Эти оценки позволяют выявить зависимость результатов от региона осреднения, плотности и полноты данных и от календарного периода (сезона).

Таблица 8

Обобщенные (по парам методов Box1, Box2, Grads и Thies) оценки «межмодельных» различий результатов регионального осреднения в зависимости от региона осреднения, календарного периода и используемого входного массива

Оценки	[55-66° с.ш., 30-140° в.д.]			[55-66° с.ш., 30-60° в.д.]			[55-66° с.ш., 60-90° в.д.]		
	vT_{2910}	vT_{455}	vT_{455_miss}	vT_{2910}	vT_{455}	vT_{455_miss}	vT_{2910}	vT_{455}	vT_{455_miss}
Год									
E	0,000	−0,001	0,001	0,002	−0,004	−0,004	0,001	−0,008	−0,008
Q	0,016	0,022	0,026	0,018	0,027	0,027	0,023	0,050	0,052
Δ	0,018	0,026	0,031	0,021	0,030	0,030	0,023	0,051	0,052
corr	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999
b	0,000	0,001	0,002	−0,001	−0,003	−0,003	0,000	0,001	−0,001
Январь									
e	−0,001	−0,005	−0,010	0,003	−0,009	−0,010	−0,002	0,001	0,002
q	0,062	0,084	0,096	0,073	0,105	0,103	0,088	0,160	0,167
δ	0,020	0,028	0,032	0,022	0,032	0,031	0,024	0,044	0,046
corr	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999
b	0,004	−0,003	−0,004	−0,001	−0,011	−0,011	−0,001	0,009	0,006
Июль									
e	0,001	−0,011	−0,009	−0,002	−0,013	−0,012	0,000	−0,015	−0,018
q	0,022	0,053	0,064	0,036	0,064	0,064	0,043	0,088	0,099
δ	0,030	0,074	0,088	0,025	0,044	0,044	0,030	0,063	0,070
corr	1,000	0,998	0,997	1,000	0,999	0,999	1,000	0,998	0,998
b	−0,001	−0,005	−0,006	−0,002	−0,003	−0,004	−0,002	−0,007	−0,009

Условные обозначения см. в таблице 7.

Так, при переходе от полных сеточных данных vT_{2910} к сети станций vT_{455} среднеквадратическое различие региональных средних q (потенциальная ошибка осреднения) увеличивается, т.е. точность осреднения уменьшается. Уменьшается она и при переходе от среднегодовых аномалий к месячным и от европейского региона к западносибирскому. Тем не менее, во всех вариантах оценка q не

превышает 0,1ºС, за исключением варианта «западносибирский регион, январь», в котором она достигает 0,16ºС.

Зависимость результатов осреднения от наличия пропусков во входных данных (оценки для vT_{455_miss} в сравнении с vT_{455}) не столь однозначна: в Западной Сибири точность осреднения по данным с пропусками уменьшилась (ошибка увеличилась), тогда, как в европейском регионе точность оценок практически не изменилась.

Такой результат вполне согласуется с конфигурацией сети 455 станций (см. рис. 1), указывающей на избыточную плотность станций в европейской части России. Понятно, однако, что полноценный анализ данного эффекта требует более тщательного учета реальной освещенности территории региона данными обоих входных массивов.

Что касается оценок трендов, то все оценки таблицы 8 указывают на отсутствие сколько-нибудь заметных различий в них для всех методов и массивов. То же следует отметить в отношении межгодичных колебаний аномалий температуры – корреляция рядов во всех экспериментах близка к единице.

Заключение

Сопоставление рядов регионально осредненных аномалий температуры воздуха, полученных различными методами пространственного осреднения для трех избранных регионов РФ, показало, что между методами нет систематического смещения – среднее различие во всех экспериментах составило менее 0,01-0,02ºС.

Межгодичные колебания в рядах регионально осредненных аномалий температуры при использовании различных методов пространственного осреднения отображаются синхронно – оценки корреляции между сравниваемыми рядами во всех вариантах (сеточные и станционные входные данные, разные регионы и сезоны) близки к 1. Практически одинаковы для всех методов и массивов и оценки трендов – расхождения находятся в пределах 0,01°С/10лет.

Оценки стандартного отклонения «межмодельных» (между методами осреднения) различий регионально осредненных годовых аномалий температуры, рассчитанных по полным сеточным данным реанализа NCEP/NCAR, составляют менее 0,02ºС.

По данным 455 станций эти оценки для разных регионов колеблются в интервале 0,019-0,024ºС при полном отсутствии пропусков наблюдений и в интервале 0,021-0,028ºС в условиях реальной полноты данных в базовом массиве мониторинга климата. Соответственно, доверительный 95%-й интервал ожидаемых ошибок осреднения (при использовании аномалий температуры на сети 455 станций) можно оценить в ±0,04ºС для среднегодовых значений, ±0,17ºС для января и ±0,08ºС для июля.

Влияние пропусков наблюдений в базовом массиве мониторинга климата стало заметно с середины 1990-х годов и сохраняется до текущего времени. До середины 1990-х годов полнота данных вполне приемлемая.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00326а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. 2012. Об оценках изменений климата регионов России в XXв. и начале XXIв. по данным наблюдений. Метеорология и гидрология. № 6. С. 95-107.
2. Ранькова Э.Я., Груза Г.В. 2012. Комментарий к статье Анисимова О.А., Жильцовой Е.Л. «Об оценках изменений климата регионов России в XX в. и начале XXI в. по данным наблюдений». Метеорология и гидрология. № 7. С. 100-103.
3. Brohan P., Kennedy J.J., Haris I., Tett S.F.B., Jones P.D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. J. Geophysical Research V. 111. 35 P. D12106, doi:10.1029/2005JD006548
4. Clark Labs. 2012. Геоинформационная система Idrisi 32. – http://clarklabs.org/
5. Cline A.K. 1984. FITPACK: A Software Package for Curve and Surface Fitting Employing Splines Under Tension. Pleasant Valley Software, Austin.
6. Doty B., Kinter J.L. III. 1992. The Grid Analysis and Display System (GrADS): A practical tool for earch science visualization. Eighth International Conference on Interactive Information and Procession Systems. Atlanta, Georgia, 5-10 January 1992.
7. Doty B., Kinter J.L. III 1993. The Grid Analysis and Display System (GrADS) and update. Ninth International Conference on Interactive Information and Processing Systems. Anaheim, CA, 17-22 January 1993.
8. Hansen J.R., Ruedy R., Sato M., Lo K. 2010. Global surface temperature change. – Rev. Geophys. Vol. 48 RG4004, doi:10.1029/2010RG000345. 1-29 P.

9. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S. et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 82, №2. P. 247-267.
10. Peterson T.C., Vose R.S. 1997. An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database. Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 78. P. 2837-2849.
11. Renka R.J. 1997a. Algorithm 772: STRIPACK: Delaunay Triangulation and Voronoi Diagram on the Surface of a Sphere. ACM Transactions on Mathematical Software. V. 23, №3. P. 416-434.
12. Renka R.J. 1997b. Algorithm 773: SSRFPACK: Interpolation of Scattered Data on the Surface of a Sphere with a Surface under Tension. ACM Transactions on Mathematical Software. V. 23, №3. P. 435-442.
13. Smith T.M., Reynolds R.W., Peterson T.C., Lawrimore J. 2008. Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). J. Climate. V. 21. P. 2283-2293.

ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОГОВ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ПЕРИОД ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

М.Ю. Бардин, Т.В. Платова*

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН; Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., 29, Институт географии РАН, *mick-bardin@yandex.ru.

Реферат. Исследованы изменения сезонных порогов, т.е. сезонных экстремальных значений суточных средней, минимальной и максимальной температуры и суточных сумм атмосферных осадков на территории России в зимний и летний сезоны за период 1976-2009 гг. Пороговые значения экстремальных температур для каждого сезона определяются как 5- и 95-й процентили для полной выборки суток этого сезона. Показано, что в оба сезона пороги экстремальных положительных и отрицательных аномалий температуры растут на большей части территории России. Однако, имеются регионы, где наблюдаются отрицательные тренды. Наблюдаемые изменения квантилей температуры качественно в основном объясняется изменениями средних (среднесезонных величин и годового хода) и внутрисезонной изменчивости, которая ответственна за региональные отличия в величине скорости и даже знаке изменений экстремумов от изменений средних сезонных величин. Только изменения средних недостаточно для объяснения изменения экстремальных процентилей: имеются регионы с выраженными отличиями изменений экстремумов от изменения средних, в особенности зимой. Получены численные оценки вклада изменения средних и внутрисезонной изменчивости в изменение экстремальных процентилей в предположении гауссовости распределения для среднесуточной температуры. Такая модель вполне успешно численно описывает изменения летних экстремумов, но не адекватна для зимних (хотя и является несмещенной); обсуждаются возможные причины. В отличие от температуры распределение осадков не является непрерывным, а имеет дискретную часть (отсутствие осадков). Изменение сезонных процентилей осадков зависит от изменения функции распределения выпавших осадков и вероятности их отсутствия. Поэтому рассматриваются изменения 95-го процентиля полной сезонной выборки и отдельно – вероятности отсутствия осадков (которая к тому же является единственно

возможным индексом «экстремально малых» осадков) и 95-го процентиля выборки дней с осадками. Рост сезонных порогов экстремальных осадков наблюдается на большей части территории страны, как зимой, так и летом. Напротив, число дней без осадков зимой преимущественно растет, а летом – убывает. Обсуждаются возможные причины изменения характеристик внутрисезонной изменчивости температуры и осадков.

Ключевые слова. Изменения климата, изменчивость, пороговые значения, экстремумы, функция распределения, процентиль, тренд, температура воздуха, осадки, средняя суточная температура, минимальная суточная температура, максимальная суточная температура.

CHANGES IN THRESHOLDS OF EXTREME TEMPERATURES AND PRECIPITATION ON TERRITORY OF RUSSIA WITH GLOBAL WARMING

M.Yu. Bardin, T.V. Platova*

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia; Institute of Geography RAS, 29, Staromonetny per., 109017 Moscow, Russia, *mick-bardin@yandex.ru.

Abstract. Changes in thresholds of seasonal extreme daily mean, minimum and maximum temperatures and daily precipitation totals over Russia in winter and summer for the period 1976-2009 are investigated. The thresholds for temperatures are defined for each season as 5^{th} and 95^{th} percentiles of a sample of all days in the season. It is demonstrated that thresholds of both positive and negative extreme temperature anomalies increase over most of Russia for both seasons. However, in some regions negative trends are observed. Changes in temperature quantiles are explained qualitatively mainly by changes in means (seasonal mean and annual cycle) and intra-seasonal variability, which is responsible for the change rate and even sign. Changes in means alone are not sufficient to explain changes in extreme percentiles, because there exist regions where distinctions between changes in means and extremes are well-marked, especially in winter. Estimates of the contribution of changes in means and intra-seasonal variance are calculated assuming the Gaussian probability function for the daily mean temperature. This model successfully explains changes in summer extremes, but it is not adequate for winter (although it is

unbiased). Possible causes are discussed. In contrast with temperature, the probability function for precipitation is not continuous; it contains a discrete component (lack of rain). Therefore changes in seasonal percentiles of precipitation depend both on the changes in the probability function of precipitation on rainy days, and probability of a dry day. Accordingly, changes in the 95th percentile for the total seasonal sample are considered along with the 95th percentile for the sample of rainy days and with the probability of a dry day (which is also the only possible index for "extremely small" precipitation). Seasonal thresholds of extreme daily precipitation grow over most of the country both in winter and summer. On the contrary, the number of dry days mainly grow in winter, but decrease in summer. Possible causes of changes in intra-seasonal variability are discussed.

Key words. Climate change, variability, threshold, extremes, probability function, percentile, trend, air temperature, precipitation, mean daily temperature, minimum daily temperature, maximum daily temperature.

Введение

В настоящей статье рассматриваются изменения порогов экстремальных температур и осадков на территории РФ в зимний и летний сезоны. Специальный интерес к изменениям статистики экстремальных значений климатических переменных (Climate Change, 2001, 2007; WCE, 1999), Рабочая группа по экстремумам CLIVAR: http://cccma.seos.uvic.ca.ETCCMDI/) вызван несколькими причинами. С одной стороны, этих изменений естественно ожидать в условиях общего изменения климата («глобальное потепление»). Это непосредственно ясно для температуры, так как потепление означает сдвиг функции распределения температуры в область более высоких значений: в том числе и «экстремальных», т.е. квантилей распределения, соответствующих близким к 0 или к 1 вероятностям. Что касается ситуации с осадками, она совсем не так очевидна, но соображения, связанные с изменением при потеплении содержания в атмосфере водяного пара и цикла водяного пара в атмосфере (Trenberth, 1999), различных параметров устойчивости атмосферы (Held, 1993; Мохов, Акперов, 2006), перераспределением частот основных форм атмосферной циркуляции и определенных региональных режимов (Corti et al., 1999; Бардин, 1996 и т.д.) и некоторые другие свидетельствуют в пользу того, что глобальные

изменения температуры могут вызывать изменения в режиме осадков (в том числе, в функциях распределения). Хотя даже общий характер этих изменений неочевиден, а их пространственно-временные особенности, по всей видимости, значительно более сложны, чем в случае изменения температуры и плохо воспроизводятся современными моделями климата, обобщение данных наблюдений позволяет получить эмпирическое описание этих изменений, а подобные приведенным выше общефизические или более специфические соображения – их объяснить.

Коль скоро изменяются функции распределения климатических переменных, а с ними и статистика экстремальных значений, возникает вопрос о возможных последствиях этих изменений. Здесь как всегда следует иметь в виду, что последствия эти могут быть как негативными (например, увеличение частоты и интенсивности засух), так и позитивными (снижение суровости зим), однако их эффект как правило существенно превосходит эффект изменения средних значений. Например, в ситуации, связанной с медициной: повышение на 1°С средней летней температуры само по себе не сильно скажется на здоровье населения, а соответствующее ему увеличение повторяемости максимальных суточных температур выше 30°С (например, для Москвы в среднем на 60%) приведет к значительному росту риска для людей, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями. Таких примеров можно привести множество (засухи, наводнения, и т.п.), но в целом на современном жаргоне ситуация такова: риски, связанные с изменением климатических экстремумов значительно превосходят риски, связанные с изменением средних. Еще одно соображение связано с относительной величиной изменения средних и экстремальных значений: имеются соображения, позволяющие предположить, что рост экстремумов может значительно превосходить рост средних, что усугубляет соответствующие риски.

В настоящей работе рассматриваются экстремумы внутри календарных сезонов. В качестве показателей экстремальности рассматриваются экстремальные, т.е., соответствующие близким к 0 или 1 вероятностям, процентили сезонных выборок суточных средней, минимальной и максимальной температуры и суточных сумм атмосферных осадков, и анализируются временные изменения этих процентилей. В литературе чаще рассматриваются изменения частот значений, превышающих заданные фиксированные пороги (Киктев и

др. 2012; Платова, 2007, Bulygina et al., 2007, Alexander et al., 2006, и др.). Это во многом связано с активной деятельностью рабочей группы по экстремумам МГЭИК: значительная часть предложенных этой группой индексов экстремумов определяется именно таким образом; многие из этих индексов несомненно практически полезны (некоторые – после определенной адаптации к региональным климатическим условиям). Однако, они не дают непосредственной характеристики изменения функции распределения климатической переменной на ее «хвостах». Поэтому был использован подход, использующий непосредственно величины экстремальных квантилей, который должен давать достаточно ясное и последовательное описание изменений экстремумов в терминах функции распределения.

Данные и методы обработки

Данные. Использовались данные архива суточных средней, минимальной и максимальной температуры и сумм осадков на 600 станциях РФ, подготовленного и периодически пополняемого во ВНИИГМИ-МЦД (http://meteo.ru/climate/d_temp.php). Реально, с учетом требований к полноте данных для расчета статистик и трендов (см. ниже), представленные результаты основаны на данных более 300 станций (до 350 для большинства величин). Анализировались тренды за период, начинающийся 1976 годом; с этого времени не происходило существенных изменений в инструментах и регламенте наблюдений: таким образом, ряды не содержат неоднородностей, вызванных этими причинами. На отдельных станциях возможны неоднородности, вызванные переносом станции (документированы в каталоге архива) и/или изменениями окружающего ландшафта. В любом случае, следует с большой осторожностью относиться к особенностям трендов на отдельных станциях, считая обоснованными лишь согласованные результаты по крайней мере на нескольких соседних станциях. В нескольких случаях нам пришлось исключить станции, где имеющиеся пропуски были все сосредоточены в одной половине ряда, что, при наличии данных на концах интервала приводило к ложным трендам, резко выделяющимся на фоне соседних станций.

Аномалии. Аномалии переменных рассчитывались относительно полного периода, для которого выполнялся анализ, т.е., 1976-2009 гг. Нормы для каждого дня рассчитывались следующим образом:

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{C}}{}_{\mathrm{d}*}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{yd}*}) = \boldsymbol{F}^{30} N^{-1} \Sigma^{\mathrm{N}}{}_{\mathrm{y}=1} \boldsymbol{X}_{\mathrm{yd}*}$$

Здесь N – число лет в выборке; d* = 1…365 – «порядковый день для годового хода»: в обычном году d* = d – порядковый день в году, а в високосном 29 февраля выбрасывается, т.е. до этой даты d* = d, а после нее − d* = d − 1. Таким образом, 29 февраля не входит в выборку для зимнего сезона. $\boldsymbol{F}^{30}$ – фильтр, отсекающий колебания с периодом менее 30 дней: т.е, годовой ход сглаживается (использовался улучшенный с учетом конечной ширины окна фильтр низких частот (Отнес, Эноксон, 1982). Чтобы получить надлежащие оценки на концах (около d=1 и 365), фильтр применялся к ряду из 3 повторяющихся экземпляров годового хода (т.е., длиной 3х365 дней), и из сглаженного ряда затем выбирался средний отрезок длиной в год (с 366 дня). Аналогично рассчитываются стандартные отклонения $\boldsymbol{S}^*_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*})$ (также сглаженные).

Аномалии, нормированные аномалии и (для осадков) относительные аномалии

$$\boldsymbol{V}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*}) = \boldsymbol{X}_{yd^*} - \boldsymbol{E}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*})$$
$$\boldsymbol{W}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*}) = \boldsymbol{V}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*}) / \boldsymbol{S}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*})$$
$$\boldsymbol{R}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*}) = \boldsymbol{X}_{yd^*} / \boldsymbol{E}^{C}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*})$$

относительно такого годового хода называются в дальнейшем аномалиями относительно постоянного годового хода (или С-годового хода).

Одной из целей работы является раздельный анализ вклада в изменение экстремальных процентилей изменения средних и внутрисезонной изменчивости. При использовании для анализа аномалий относительно постоянного годового хода остаются изменения средних, связанные с изменениями амплитуды и формы (включая календарные даты минимума и максимума) годового хода. Чтобы исключить эти межгодовые изменения годового хода, здесь рассматриваются аномалии относительно «переменного» (или V-) годового хода:

$$\boldsymbol{E}^{V}_{d}(\boldsymbol{X}_{yd}) = \boldsymbol{F}^{90}\boldsymbol{X}_{yd}$$

т.е., за годовой ход принимаются вариации внутри года с периодами от сезона и более (в годовом ходе остаются гармоники с периодами более четверти года). Сезонные статистики отклонений $\boldsymbol{V}^{V}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*}) = \boldsymbol{X}_{yd^*} - \boldsymbol{E}^{V}_{d^*}(\boldsymbol{X}_{yd^*})$ от такого «переменного годового хода» для каждого года можно интерпретировать, как описание

внутрисезонной изменчивости для этого года (мы по-прежнему исключаем из выборок 29 февраля: отсюда употребление d*).

Сезонные статистики. Здесь рассматриваются сезоны длиной 90 дней: зимний с 1 декабря и летний с 1 июня. Для каждого сезона 1976-2009 гг. оценивались выборочные статистики по выборке длиной NwX_y, $NsX_y \leq 90$ (с учетом пропусков, различных для разных переменных) для каждой из 4 переменных: Te, Tmin, Tmax – суточная средняя, минимальная и максимальная температура, R – суточная сумма осадков. Статистики температуры: E – среднесезонное значение, S – стандартное отклонение, Sk – коэффициент асимметрии, P5 – 5-й процентиль, P95 – 95-й процентиль, Min, Max – сезонные минимум и максимум. Набор статистик для осадков несколько иной: E, S, Sk, Po – доля дней без осадков (точнее, с нулевыми измеренными осадками), P95 − 95-й процентиль полной сезонной выборки, PR95 − 95-й процентиль выборки дней с осадками, Max.

В дальнейшем для краткости мы будем называть процентили, близкие к левому «хвосту» распределения (в данном случае, P5), «отрицательными экстремумами», а близкие к правому «хвосту» (P95) – «положительными экстремумами».

Статистики рассчитывались для сезонов с наличием не менее 95% данных.

Тренды сезонных статистик. Для зимы и лета на каждой станции для каждой переменной X рассчитывались оценки линейного тренда каждой статистики $\Psi_y = \boldsymbol{a}_{\Psi} + \boldsymbol{b}_{\Psi}\, y$ (y – год): коэффициент $\boldsymbol{b}_{\Psi}$, доля объясненной трендом дисперсии R^2, а также оценка «значимости тренда»: минимальный уровень из стандартного набора {1%, 2,5%, 5%}, при котором коэффициент $\boldsymbol{b}_{\Psi}$ значимо отличен от 0, или «∞», если тренд незначим на уровне 5% (используется двусторонний критерий, основанный на статистике $\mathbf{T^2 = (n\text{-}2)R^2 / (1\text{-}R^2)}$, имеющей при $\boldsymbol{b}_{\Psi} = 0$ распределение Стьюдента с n−2 степенями свободы). Сам термин «значимость» используется, таким образом, довольно формально, поскольку не учитываются отклонения от «основных предположений»: независимость и гауссовость остатков; тем не менее, если оценки вероятностей и неточны, все же «значимые» величины тренда указывают на достаточно большие значения отношения «сигнал-шум» для него. Это обычная практика; попытки улучшить оценки вероятностей с использованием различных техник статистического моделирования оказываются односторонними: либо учитывается негауссовость остатков (используется обычно

«бутстрэп»), либо последовательная корреляция (моделируется авторегрессией). Поскольку принципиально вопрос о «правильных» вероятностях этим не решается, и выводы остаются прежними (отношение сигнал-шум достаточно велико), по нашему мнению для качественного анализа эти усложнения излишни: значительно важнее наличие крупномасштабных областей с когерентными изменениями.

Тренд оценивался за период 1976-2009 гг., т.е., с условного начала современного потепления. Оценки тренда рассчитывались, если в ряду сезонных статистик имелось не менее 80% данных и имелись данные в начальных и конечных 3-летиях периода.

Наблюдаемые изменения экстремумов температуры воздуха

Функция плотности распределения суточной температуры близко напоминает классическую колоколообразную кривую нормального (Гауссова) распределения: она «почти» унимодальна и симметрична (хотя для отдельных географических локализаций возможны вторичные моды и отклонения от симметрии, связанные с наличием выраженных циркуляционных режимов) и примерно так же быстро спадает с удалением от центра распределения. Процентили нормального распределения однозначно определяются значениями первых 2 моментов: среднего и дисперсии. Можно ожидать, что изменения процентилей суточной температуры в основном определяются изменениями тех же моментов. Отметим, что увеличение (уменьшение) среднего вызывает смещение распределения в целом и, соответственно, рост (убывание) экстремальных процентилей обоих знаков, а изменение дисперсии – того же знака изменение положительных экстремумов и противоположного знака – отрицательных. Одновременные изменения среднего и дисперсии может, таким образом, приводить к различным результатам в зависимости от соотношения знаков и величины этих изменений.

На рис.1 показано географическое распределение коэффициентов линейного тренда 95-го процентиля (P95) и 5-го процентиля (P5) для зимы и лета ежегодных внутрисезонных нормированных аномалий средней суточной температуры воздуха ***WT***, полученных относительно «постоянного» годового хода, рассчитанного для полного периода оценки 1976-2009 гг. Мы рассматриваем здесь нормированные аномалии, чтобы исключить по возможности климатические внутрисезонные изменения как средних, так и дисперсии, весьма выраженные для температуры. Таким образом

обеспечивается обоснованность объединения в единую сезонную выборку величин, относящихся к различным календарным датам внутри сезона.

Сезонные различия изменений экстремальных процентилей очень велики. Наблюдается также и «асимметрия» в изменениях положительных и отрицательных экстремумов, значительно более явно выраженная для зимнего сезона.

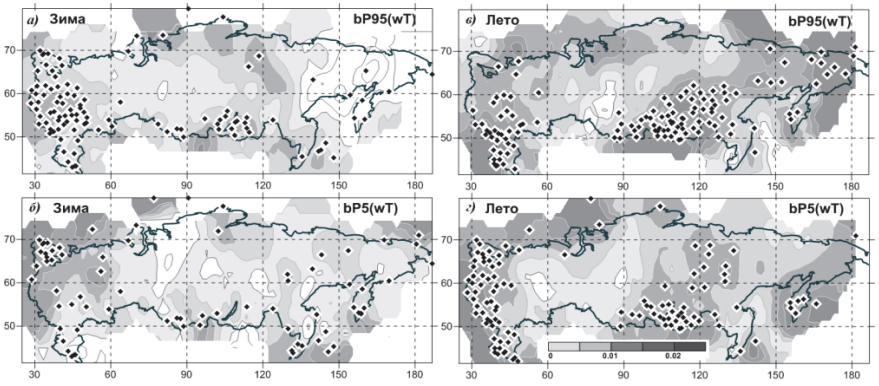

Рис. 1. *Изменения процентилей P5 (б, г) и P95 (а, в) нормированной аномалии температуры (линейный тренд 1976-2009 гг.). Зима (а, б). Лето (в, г). Аномалии рассчитаны относительно «постоянного» годового хода за 1976-2009 гг. Положительные тренды показаны градациями серого, отрицательные – изолиниями без заливки (шаг изолиний: 0,005 • год$^{-1}$). Выделены станции, где тренд значим на уровне 5%.*

Сравнение с изменениями среднесезонных значений ***WT*** (рис. 2) показывает, что география изменения пороговых значений экстремумов качественно в основных чертах определяется общим смещением распределения температуры. Летом это выраженный рост почти на всей территории РФ с максимумами на западе страны (в особенности – на юго-западе ЕЧР), вокруг Байкала и на дальнем Северо-Востоке (Камчатка, Чукотка); зимой – менее выраженный рост с максимумом на западе и обширная область убывания температур на дальнем Северо-Востоке. Однако сезонные и географические особенности в величинах и даже знаках изменения для положительных и отрицательных экстремумов требуют дальнейшего анализа, который должен включать изменения дисперсии.

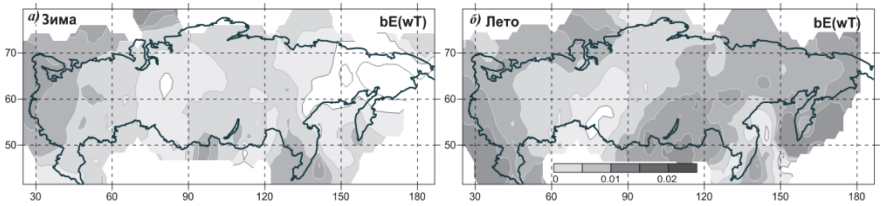

Рис. 2. *Изменение среднесезонной нормированной аномалии температуры (линейный тренд 1976-2009) для зимнего (а) и летнего (б) сезонов. Положительные тренды показаны градациями серого, отрицательные – изолиниями без заливки (шаг изолиний: 0,005 • год$^{-1}$).*

На рис. 3 представлен тренд сезонных стандартных отклонений температуры относительно постоянного годового хода, рассчитанного по выборке за 1976-2009 гг., и относительно «переменного» годового хода (см. раздел 2). В первом случае изменения внутрисезонной дисперсии включают также изменения средних, связанные с изменением формы и амплитуды годового хода (но не с изменением среднесезонных величин, поскольку последние исключаются при расчете внутрисезонной дисперсии). Во втором случае исключаются межгодовые изменения годового хода (т.е., полностью исключаются изменения *средних*): остаются «чистые» изменения *внутрисезонной изменчивости*.

Наиболее ярко выраженные отличия изменений экстремумов от изменения сезонных средних и асимметрия изменений положительных и отрицательных экстремумов наблюдаются для ***зимы***. Следует в первую очередь отметить отсутствие области отрицательного тренда на ***дальнем Северо-Востоке*** для величины 5-го процентиля: это значит, что общее выраженное зимнее похолодание в этой области не приводит к углублению экстремумов холода. Напротив, здесь наблюдается некоторое смягчение экстремальных холодов (рост P5). С другой стороны, величины экстремумов тепла (P95) снижаются здесь значительно быстрее средних температур. Эти особенности объясняются значительным уменьшением дисперсии температуры в данном регионе.

Также уменьшением дисперсии, но на фоне выраженного *роста* среднесезонных температур, объясняется то обстоятельство, что максимум роста на ***северо-западе Европейской России*** между 60-70° с.ш. наблюдается только для P5, а величины P95 там хотя и растут,

но намного медленнее (максимум роста положительных экстремумов южнее – на западе между 60-70° с.ш., причем тренды в этой области везде статистически значимые).

Важная особенность − усиление экстремумов холода на ***востоке Северного Кавказа***, не сопровождающееся уменьшением сезонных средних и снижением порога положительных экстремумов. Оно как будто объясняется ростом дисперсии в южной половине ЕЧР (рис. 3а): но здесь ситуация существенно отличается от рассмотренных выше. Рост дисперсии здесь (в отличие от Северо-Востока и Северо-Запада) исключается при рассмотрении аномалий относительно переменного годового хода (рис. 3б). Таким образом, это уменьшение P5 связано не с изменением внутрисезонной изменчивости, а, по-видимому, с изменением формы годового хода (для уточнения этого вывода необходим, конечно, непосредственный анализ изменений годового хода, что выходит за рамки настоящей работы). Похожая ситуация для P5 (усиление экстремумов холода) наблюдается на ***севере Западной Сибири***, но здесь все же изменения частично связаны с изменением внутрисезонной дисперсии и частично – годового хода.

Изменения границ экстремумов обоих знаков летом значительно более сходны между собой и с изменениями среднесезонных температур, нежели зимой. Ниже перечислены основные различия:

- Рост положительных экстремумов значительно превосходит рост отрицательных на юге ЕЧР, вокруг Байкала, на Северо-Востоке (объясняется ростом дисперсии в этих регионах).
- Наблюдается область усиления отрицательных экстремумов (убывание P5) на Урале, также связанная с ростом дисперсии.
- Максимум роста P5 наблюдается на западе ЕЧР (область убывания дисперсии), а не на юго-западе, как для P95 и среднесезонной температуры.

Обращает на себя внимание очевидная противофаза летних и зимних изменений *собственно* внутрисезонной дисперсии (рис. 3б и 3г) на большей части территории РФ, особенно ярко выраженная на Северо-Востоке, на Урале и севере ЕЧР и на юге России (но на западе ЕЧР и зимой, и летом наблюдается убывание межсуточной изменчивости). Преобладающая тенденция зимнего сезона – *убывание* изменчивости, тогда как летом преобладает *рост*.

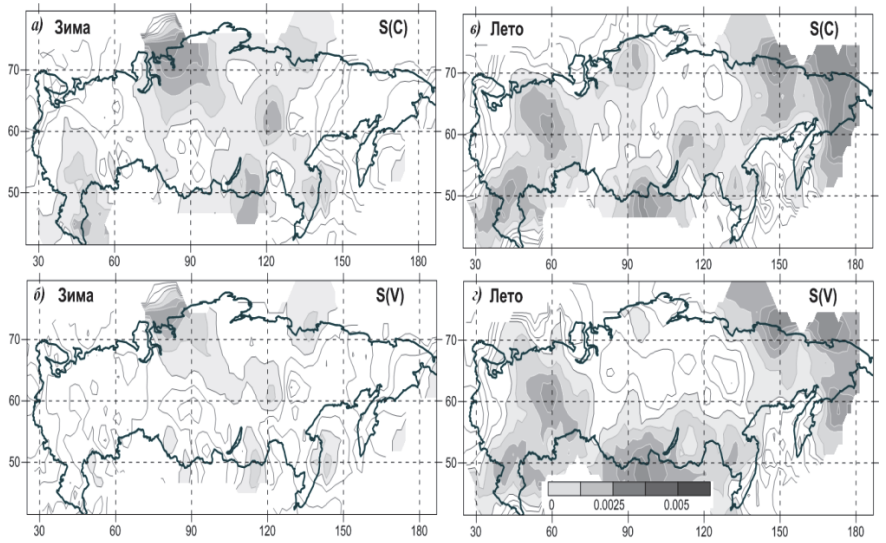

Рис. 3. *Изменение стандартного отклонения аномалий температуры, рассчитанных относительно постоянного годового хода (за 1976-2009 гг.) – а, в и «переменного» годового хода – б, г для зимы (а, б) и лета (в, г). Обозначения см. рис. 2; шаг изолиний: 0,00125 • год$^{-1}$*

Итак, большая часть наблюдаемых изменений экстремальных квантилей температуры *качественно* объясняется изменениями средних (среднесезонных величин и формы годового хода) и внутрисезонной изменчивости. Возникает вопрос, насколько хорошо это описание *количественно*. Здесь, однако, уже нужна модель, связывающая значения рассматриваемых квантилей с средним и дисперсией. Мы рассмотрим простейшую модель, основанную на аппроксимации распределения суточных аномалий внутри сезона Гауссовым распределением. В этом случае должно быть

$$\delta b5 = b(P5_y) - (b(E_y) - 1{,}65\,b(S_y)) \approx 0,$$

$$\delta b95 = b(P95_y) - (b(E_y) + 1{,}65\,b(S_y)) \approx 0;$$

здесь E_y, S_y − статистики суточных температур за анализируемый сезон года y, $b(X_y)$ – коэффициент линейного тренда ряда X_y ($X_y = E_y, S_y$) за фиксированный период $y_b \le y \le y_e$.

В таблице 1 представлены некоторые статистики ошибок $\{\delta \boldsymbol{b}\}_i$ аппроксимации тренда аномалии температуры ***VT*** (*не* нормированной), полученные по выборке станций ***i***, для которых были получены оценки этих величин с учетом полноты данных (более 350), и характеризующие «качество» аппроксимации. Как видно, для летнего сезона аппроксимация изменений обоих процентилей предложенной моделью вполне успешна: смещение можно считать пренебрежимым ($\boldsymbol{E}\delta \approx 0$: около 5% стандартного отклонения аппроксимируемых величин ***b(P)***), а дисперсия остатков («ошибок аппроксимации») в 19 (17) раз меньше разброса самих величин $\boldsymbol{b(P5_y)}$ ($\boldsymbol{b(P95_y)}$). Функции распределения величин $\delta \boldsymbol{b5}$ и $\boldsymbol{b(P5_y)}$ для летнего сезона представлены на рис. 4. Для зимы аппроксимация гораздо хуже. По-прежнему можно считать ее несмещенной для ***P95***, в то время как для ***P5*** имеется заметное отрицательное смещение. Величина же разброса ошибок аппроксимации лишь незначительно меньше разброса самих величин тренда: менее чем в 2 раза для ***P5***, и лишь на 20% для ***P95.*** Такое различие качества аппроксимации для зимы и лета может быть объяснено значительно большей интенсивностью зимних режимов циркуляции и, соответственно, их вклада в функции распределения температуры («изменчивость»). Поскольку распределения температуры являются смесями распределений при различных режимах циркуляции, их поведение на хвостах может значительно отличаться от нормального распределения (см. напр. (Хьюбер, 1984)): в частности, в аппроксимационных формулах вида $\boldsymbol{P} = \boldsymbol{E} \pm \mathbf{k}_{\pm} \boldsymbol{S}$ возможно $\mathbf{k}_{+} \neq \mathbf{k}_{-} \neq 1{,}65$ (это подтверждается значительным различием средних и медиан ошибок аппроксимации зимнего сезона: распределение несимметрично). Можно улучшить аппроксимацию, используя эмпирические (выборочные) оценки для $\mathbf{k}_{+}$ и $\mathbf{k}_{-}$. Хотя такая аппроксимация будет в известном смысле тавтологией, но она может быть полезна для оценки будущих изменений экстремальных процентилей по прогнозу изменения средних и дисперсии, поскольку трудно ожидать от существующих моделей адекватного воспроизведения всех составляющих климатической изменчивости, позволяющего непосредственно воспроизводить изменения на краях распределения.

Таблица 1.

Статистики трендов (°C • год$^{-1}$; период 1976-2009 гг.) процентилей P5, P95 аномалии температуры *VT* и их отклонений от модели $b(P_y) - (b(E_y) \pm 1{,}65b(S_y))$, объясняющей полный тренд трендами среднего и изменчивости в предположении гауссовости распределения *VT*. N – число станций, по которым получена оценка; Σ_i^2 – сумма квадратов; E – среднее; Med – медиана.

	лето				зима			
	P5		P95		P5		P95	
	b(P)	δ*b*	*b(P)*	δ*b*	*b(P)*	δ*b*	*b(P)*	δ*b*
Σ_i^2	58,47	3,07	93,24	5,42	186,56	108,09	135,02	106,94
E	0,342	−0,018	0,431	−0,034	0,518	−0,196	0,423	−0,018
Med	0,344	−0,018	0,431	−0,037	0,505	−0,216	0,469	−0,135

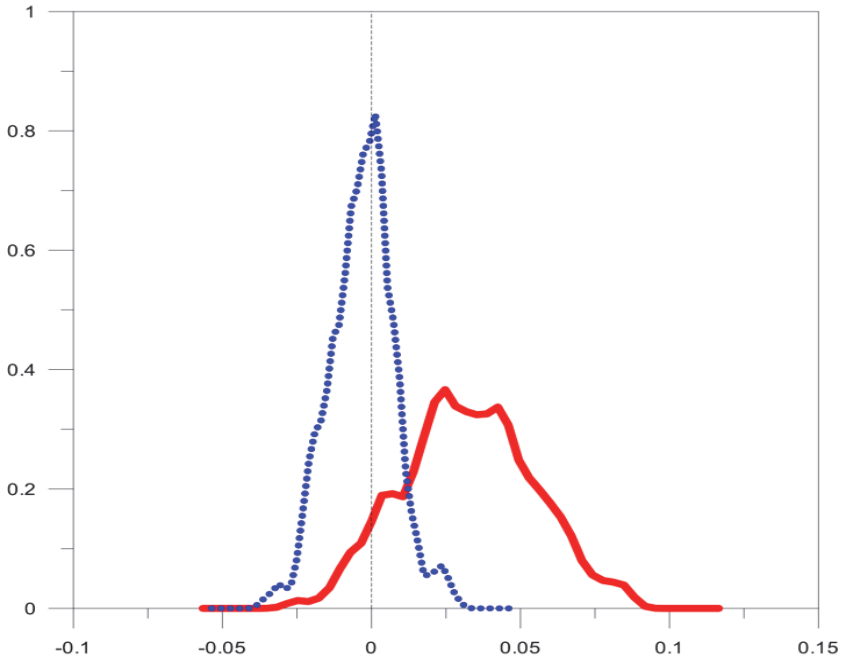

***Рис. 4.** ФПР δ**b5** (пунктир) и **b(P5$_y$)** (сплошная линия) для летнего сезона*

Наконец, мы рассмотрим изменения порогов экстремальных значений для минимальных и максимальных суточных температур (рис. 5), представляющие зачастую больший практический интерес, нежели изменения среднесуточных температур. В особенности это относится к летним температурам. Здесь мы рассмотрим только их и только в самых общих чертах.

Как и для среднесуточных температур, основной характер изменений экстремальных процентилей Tmin и Tmax определяется изменением среднесезонных температур. Ему соответствуют основные максимумы роста (на западе ЕЧР, в регионе вокруг Байкала, на дальнем Северо-Востоке) и область убывания в Западной Сибири.

В отличие от среднесезонных температур имеется область убывания на востоке ЕЧР для отрицательных экстремумов как максимальных, так и минимальных суточных температур (и, соответственно, среднесуточной температуры).

Отрицательные экстремумы максимальной температуры в восточной части страны растут незначительно; в частности, практически отсутствуют области роста вокруг Байкала и на дальнем Северо-Востоке. Напротив, экстремумы обоих знаков минимальной температуры значительно растут практически по всей восточной части РФ (восточнее 90° в.д.).

На севере ЕЧР наблюдается максимум роста порогов экстремумов обоих знаков минимальной суточной температуры: т.е. общее положительное смещение распределения минимальной температуры. Именно с этим (и отчасти с ростом порогов отрицательных экстремумов максимальной температуры) связан максимум роста положительных экстремумов среднесуточных температур в этом регионе, в то время как абсолютные экстремумы тепла (положительные экстремумы максимальной температуры) здесь не растут.

Изменения экстремальных осадков

Наглядное описание изменений экстремумов осадков, аналогичное тому, которое проводится для температуры (*изменение экстремумов = изменение средних + K × изменение изменчивости*), невозможно для осадков. Это связано со своеобразием функции распределения суточных осадков (скажем, для фиксированного сезона).

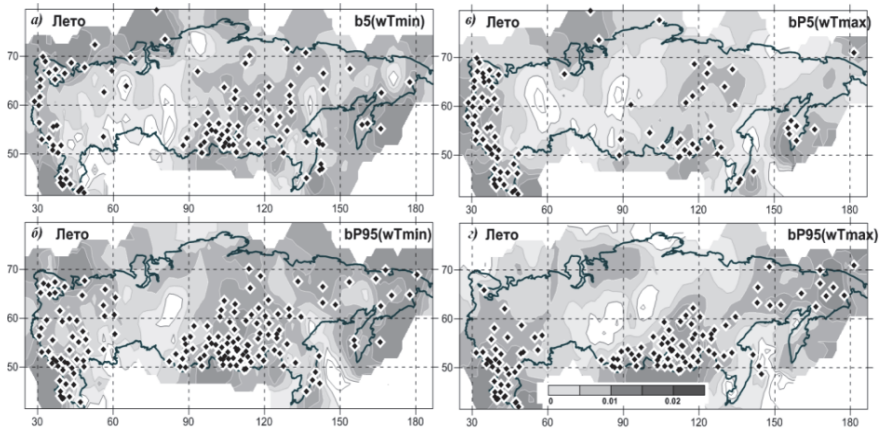

Рис. 5. *Изменения процентилей P5 (а, в) и P95 (б, г) нормированной аномалии максимальной (в, г) и минимальной (а, б) суточной температуры. Обозначения см. рис. 1.*

А. Эта функция распределения F(r) представляет собой смесь дискретного распределения с вероятностью P_o, сосредоточенной в единственной точке r = 0 («отсутствие осадков»), и непрерывного распределения Φ(r) на полупрямой r >0:

$$F(r) = F_{P_o}(r) = P_o + (1 - P_o)\Phi(r) \qquad (O).$$

Б. Максимум плотности вероятности Φ′(r) («мода») расположен не вблизи центра распределения (среднее, медиана), а всегда в 0. Изменение среднего не приводит к смещению всего распределения, но отражается в изменении его формы и/или масштаба.

В принципе, приняв подходящую модель для функции распределения Φ(r), можно выполнить анализ, аналогичный проведенному в предыдущем разделе. Часто ф.п.р. осадков Φ′(r) аппроксимируют Г-распределением: например, (Groisman et al., 1999). Однако в этом случае не удается получить такой простой линейной модели, объясняющей изменения экстремальных процентилей через изменения среднего и средней квадратической изменчивости, как для температуры. Поскольку цель настоящей статьи – анализ наблюдаемых изменений порогов экстремальных температур и осадков, а не статистическое моделирование осадков, мы не будем развивать эту тему.

Тем не менее, вероятностная модель (О) указывает на то, что «хвосты» распределения суточных осадков зависят (1) от P_o и (2) хвостов распределения ненулевых осадков Ф(r). Для положительных экстремумов (2) очевидно, а (1) при фиксированной функции Ф(r) следует из выражения для производной dr/dP_o для квантиля r функции распределения F, соответствующего фиксированной вероятности α: из (О) следует $P_o + (1 - P_o)\Phi(r) = \alpha$, откуда $r = r(P_o,\alpha)=\Phi^{-1}((\alpha-P_o)/(1-P_o))$, и по теореме об обратной функции $dr/dP_o= - [\Phi'(r(P_o,\alpha))]^{-1}(1-\alpha)/(1-P_o)^2$: все сомножители положительны (функция распределения Ф монотонно возрастает и $\alpha<1$), и знак «−» указывает, что *рост* P_o влечет *уменьшение* квантиля $F^{-1}{}_{Po}(\alpha)$, соответствующего фиксированной вероятности α (это непосредственно ясно из рис. 6: надо только заметить, что преобразование от $F_{Po}(r)$ к $F_{Po+\Delta P}(r)$ есть просто сжатие к оси r =1 с коэффициентом $[1-(P_o+\Delta P)] / (1-P_o)$). Таким образом, для понимания изменений порогов положительных экстремумов осадков (распределения F(r)) следует рассматривать изменения P_o и 95-го процентиля Ф(r). Что же касается левого хвоста, то по сути нулевые осадки и есть «отрицательные экстремумы»; на территории РФ P_o ~0,5 (Groisman et al., 1999), поэтому нет смысла рассматривать изменения фиксированного малого (в данном случае 5-го) процентиля суточных осадков, а вместо того надо рассматривать изменения P_o.

Есть еще проблема, связанная с интерпретацией малых осадков. В некоторых случаях регистрируются «следы» осадков, т.е., факт выпадения осадков был зафиксирован, но количество слишком мало, чтобы его можно было измерить при использовании стандартного осадкомера. Такая практика может привести к дальнейшим рассуждениям о «виртуальных» осадках (которые «должны были» выпасть или даже выпали в окрестности станции, но не попали в осадкомер, и т.д.). Это делает величину P_o довольно неопределенной, равно как и определение выборочных квантилей распределения выпавших осадков. Поэтому, во-первых, мы не будем делать различия между следами и отсутствием осадков, а во-вторых, будем все же наряду с квантилями распределения выпавших осадков Ф(r) рассматривать также квантили сезонной функции распределения суточных сумм F(r). При фиксированной длине сезона (и принятых нами ограничениях на допустимый процент пропусков данных) их

можно просто интерпретировать, как порядковые статистики $X^{(k)}$ фиксированного ранга *k*.

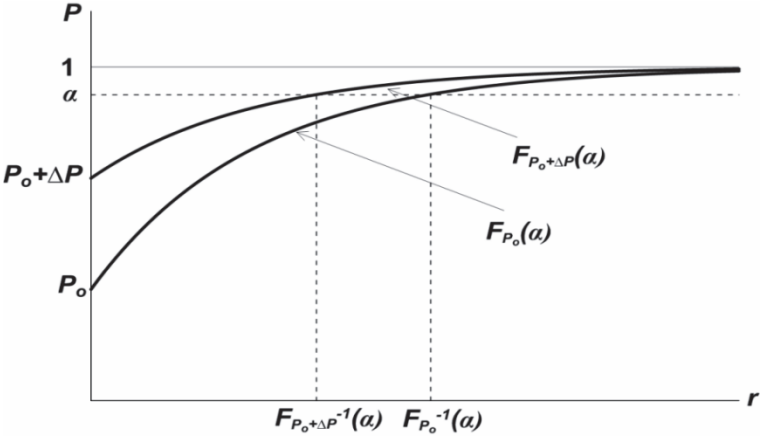

Рис. 6. *Изменение квантиля $F^{-1}(\alpha)$ распределения суточных сумм осадков при изменении вероятности отсутствия осадков и постоянной ф.п.р. ненулевых осадков. Показаны кумулятивные функции распределения F(r) при значениях вероятности отсутствия осадков P_o и $P_o+\Delta P$.*

На рис. 7 представлены изменения 95-х процентилей функций F(r) и Ф(r), а также величины $P_r = 1 - P_o$ (мы показываем число дней с осадками P_r вместо P_o для большей наглядности анализа изменений 95-го процентиля F(r), т.к. рост процентиля соответствует *росту* P_r). *Зимой* 95-й сезонный процентиль суточных осадков *растет* на большей части территории РФ, причем максимум роста наблюдается в северной половине ЕЧР, на севере Сибири, вокруг Байкала и в районе Сахалина. Большая область убывания – на дальнем северо-востоке, и меньшая – в южной части ЕЧР (исключая Северо-Кавказский ФО). Число *зимних дней с осадками* (P_r), напротив, *убывает* на большей части страны (т.е., растет число дней без осадков). Максимумы – на Дальнем Востоке (особенно на севере), Западной и Средней Сибири, северо-востоке ЕЧР.

Максимумы роста 95-го процентиля сезонной функции распределения связаны в основном непосредственно с ростом сильных осадков (95-й процентиль функции Ф(r). В то же время его убывание на Северо-Востоке объясняется преимущественно убыванием числа дней с осадками (на юге ЕЧР действуют оба фактора). Заметим, что рост сильных осадков на большей части территории перекрывает эффект,

связанный с ростом числа дней без осадков (особенно явно – на северо-востоке ЕЧР).

Летом также преобладает *рост сильных осадков* (рис. 7д) с максимумами так же, как зимой, в регионе вокруг Байкала и на севере ЕЧР (но исключая Кольский п-ов), и кроме того, на западе ЕЧР (граница с Белоруссией), на Урале, в Магаданской области. Убывание сильных осадков наблюдается на Южном Урале и в Нижнем Поволжье, на севере Западной Сибири, в Забайкалье и Приамурье. В отличие от зимы, летом на большей части территории РФ число дней *с* осадками *растет* (в особенности в Западной и Средней Сибири). Имеются три выраженные области роста числа дней *без* осадков: большая часть ЕЧР (особенно − южная половина; здесь результирующий эффект для Р95 суточных осадков всего сезона − убывание), Чукотка-Камчатка и Забайкалье – юг Якутии.

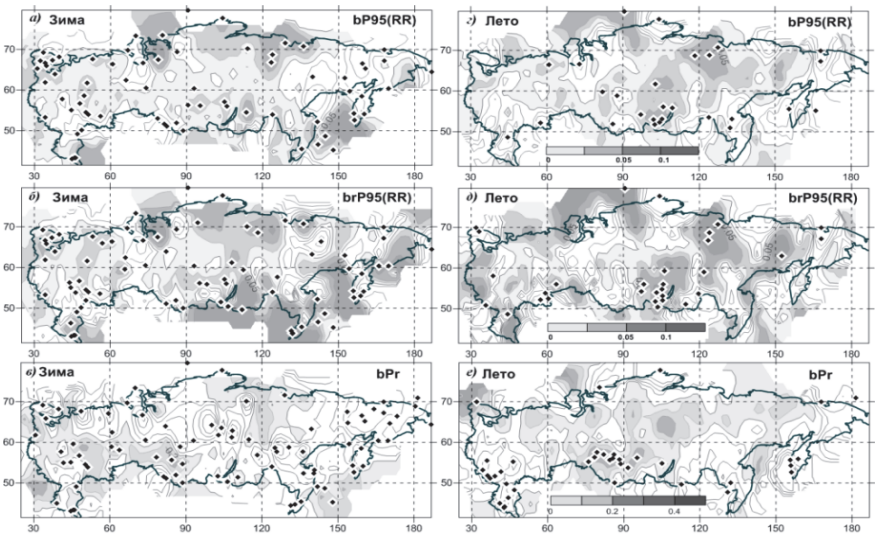

Рис. 7. *Изменения (линейный тренд 1976-2009 гг.) 95-го процентиля полной сезонной функции распределения относительной аномалии (доли суточной нормы) суточных сумм осадков (год$^{-1}$: **а, г**); то же, только для выборки дней с дождем **(б, д)**; изменения доли числа дней с дождем в сезоне (% • год^{1}: **в, е**). Зима **(а-в)**. Лето **(г-е)**. Положительные тренды показаны градациями серого (см. шкалы), отрицательные – изолиниями без заливки (шаг изолиний: а, б, г, д − 0,05 мм•год$^{-1}$; в, е − 0,1%•год$^{-1}$). Выделены станции, где тренд значим на уровне 5%.*

Заключение

Анализ изменений порогов экстремальных температур летнего и зимнего сезонов с середины 1970-х гг. (условное начало современного потепления) показывает, что, хотя на большей части территории страны пороги как положительных, так и отрицательных экстремумов растут (т.е., как самые холодные, так и наиболее теплые эпизоды становятся теплее) в соответствии с общим потеплением, но имеются важные региональные особенности. Часть этих особенностей является проявлением географической неоднородности изменения среднесезонных температур, наиболее выраженной зимой и связанной преимущественно с долгопериодными изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции (Wallace et al., 1996; Thompson, Wallace, 1998; для территории РФ: Попова и Шмакин, 2006; Бардин, 2011; Крыжов, 2004; и т.д.), которые в свою очередь являются проявлениями низкочастотной изменчивости в климатической системе (по крайней мере, в системе атмосфера – океан – криосфера). Такова, в частности, природа зимнего максимума потепления в западной части ЕЧР, связанного с долгопериодной изменчивостью Североатлантического колебания (САК; (Hurrell, vanLoon, 1997; Hurrell et al., 2003): это избыточное потепление, связанное с увеличенной адвекцией тепла из региона Северной Атлантики в положительной фазе САК, было особенно велико в период с 1960-х до середины 1990-х гг., когда наблюдался значительный положительный тренд САК. Другая устойчивая особенность зимних изменений температуры: похолодание на дальнем северо-востоке РФ – проявляется только в убывании положительных экстремумов температуры, что качественно объясняется значительным уменьшением внутрисезонной изменчивости в этом регионе. Причина этого явления не вполне ясна: вероятно, оно связано с Тихоокеанской декадной осцилляцией (Mantua et al, 1997; Mantua, Hare, 2002), возможно, как части Арктического колебания (Wallace et al., 1996). Вообще изменения внутрисезонной изменчивости температуры весьма значительны и ответственны за существенные региональные отличия в величине скорости и даже знаке изменений экстремумов от изменений средних сезонных величин (например, усиление экстремумов холода зимой – на Северном Кавказе и летом – на востоке ЕЧР).

Летние изменения порогов экстремальных температур в основном объясняются, в том числе – количественно, изменениями годового хода (по большей части даже только изменениями среднесезонных температур) и внутрисезонной дисперсии. Что касается зимы, то здесь можно говорить только о качественном согласии; количественно ошибка модели, связывающей изменения экстремальных квантилей с изменениями среднего и дисперсии, имеет масштаб величины, лишь немногим меньший такового для величины самих изменений. Причины этого явления неясны и требуют дальнейшего изучения.

Изменения экстремумов осадков значительно сложнее анализировать из-за необычного характера их распределения, являющегося смесью дискретного для случаев отсутствия осадков и непрерывного при их наличии; в результате возникают сложности уже при определении порогов экстремальных значений. В конце концов, мы имеем слишком мало дней с осадками за сезон, чтобы получить достаточно устойчивую оценку порогов экстремальных значений. Поэтому результаты для осадков имеют в основном описательный характер: мы можем при принятом подходе, как правило, делать лишь качественные заключения о том, что осадки, входящие в k наибольших за сезон (либо число дней без осадков – или с неизмеримо малыми осадками), демонстрируют ту или иную тенденцию.

Основной вывод относительно зимних осадков состоит в том, что экстремально сильные осадки растут на большей части территории страны; область, где они убывают – это в первую очередь дальний северо-восток. С другой стороны, также на большей части страны растет число дней без осадков. Летом также на большей части РФ наблюдается рост экстремально сильных осадков, хотя это и не так явно выражено, как зимой. В южных, центральных и западных районах ЕЧР, в Забайкалье, на Камчатке и Чукотке растет число дней без осадков.

Региональные особенности изменений межсуточной внутрисезонной изменчивости температуры и осадков и их причины изучены еще хуже, чем региональные особенности изменений средних сезонных величин и их причины. В первую очередь они могут быть следствиями изменений циклонической и антициклонической активности, как проявлений естественной внутренней изменчивости климатической системы, но также,

возможно, и глобального потепления – вследствие изменения ряда параметров климатической системы, таких, как общая бароклинность, радиус дефомации Россби и др. (Held, 1993; Trenberth, 1999; Голицын и др., 2007): в том числе, очень важны изменения атмосферной составляющей гидрологического цикла, проявляющиеся в изменениях распределения осадков. Очень вероятно, например, что зимние особенности изменения числа дней без осадков и изменчивости температуры на дальнем северо-востоке имеют общие причины, так же, как и летние особенности изменения экстремальных температур и осадков в том же регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардин М.Ю. 2011: Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов РФ до 2030г. с использованием эмпирических стохастических моделей климата. Метеорология и гидрология. № 4. С. 5-20.
2. Бардин М.Ю. 1996. Определение режимов зимней циркуляции в умеренных широтах Северного полушария по данным H500 в ключевых регионах. Метеорология и гидрология. №5. С. 29-49.
3. Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. 2007. Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952-2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата. Доклады АН. Т.413. №2. С. 254-256.
4. Киктёв Д.В., Сизе Д., Александер Л. 2009. Сравнение многолетних средних и тенденций изменения ежегодных экстремумов температуры и осадков по данным моделирования и наблюдений. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45, № 3. С. 305-315.
5. Крыжов В.Н. 2004: Связь средней годовой температуры воздуха в Северо-Западной Евразии с арктическим колебанием. Метеорология и гидрология. № 1. С. 5-14.
6. Мохов И.И., Акперов М.Г. 2006. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа. Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. Т. 42, № 4. С. 467-475.
7. Отнес Р., Эноксон Л. 1982. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир. 432 С.
8. Платова Т.В. 2007. Климатическая характеристика некоторых показателей экстремальности температуры приземного воздуха и атмосферных осадков на территории России. Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». № 1. М.: Изд-во НИА-Природа. С. 38-47.
9. Попова В.В., Шмакин А.Б. 2006. Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий зимней температуры воздуха в Северной Евразии в конце XX столетия. Метеорология и гидрология. №12. С. 15-24.
10. Хьюбер Дж.П. 1984. Робастность в статистике. М.: Мир. 304 С.
11. Alexander L, Zhang X, Peterson T.C., Caesar J, Gleason B. et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research-Atmospheres. V. 11. 42 P. D05109.

12. Bulygina O.N., Razuvaev V.N.,Korshunova N.N., Groisman P.Ya. 2007. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. Environ. Res. Lett. V. 2. №4. (October-December 2007) 045020. 7 P.
13. Climate Change 2001. 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Houghton J. T. et al., Editors). Cambridge University Press. 881 P.
14. Climate Change 2007. 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon S.D., Qin M., Manning Z., Chen M., Marquis K.B., Averyt M., Tignor M., Miller H.L. (Eds.)) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 P.
15. Corti S., Molteni F., Palmer T.N. 1999. Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. Nature. V. 398. P. 799-802.
16. Groisman P.Y., Karl T.R., Easterling D.R., Knight R.W. et al. 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. Climate Change. V. 42. P. 243–283.
17. Held I.M. 1993. Large-scale dynamics and global warming. Bull. Am. meteorol. Soc. V. 74. P. 228-241.
18. Hurrell J.W., van Loon H. 1997. Decadal Variations associated with the North Atlantic Oscillation. Climatic Change. V. 36. P. 301-326.
19. Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. 2003. An overview of the North Atlantic Oscillation. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact Geophysical Monograph 134. Amer. Geophys. U. Washington, DC. 35 P.
20. Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull. Am. Met. Soc. V. 78. P. 1069-1079.
21. Mantua N.J., Hare S.J. 2002. The Pacific Decadal Oscillation. J. Oceanogr. V. 58. P. 35-44.
22. Thompson D.W.J., Wallace J.M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geoph. Res. Lett. V. 25. P. 1297-1300.
23. Trenberth K.E. 1999. Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. Climatic Change. V. 42. №1. P. 327-339.
24. Wallace J.M., Zhang Y., Bajuk L. 1996. Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature. J. Climate. V. 9. P. 249-259.
25. WCE 1999. Weather and Climate Extremes: Changes, variations and a perspective from the insurance industry. Eds. T. Karl, N. Nicholls and A. Ghazi. Kluwer Academis Publishers. 349 P.

О ТЕНДЕНЦИЯХ В ИЗМЕНЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ «ВОЛН ТЕПЛА» НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*Э.В. Рочева, В.Д. Смирнов**

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, 20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, *vsmirnov327@gmail.com

Реферат. Волны тепла рассмотрены как эпизоды длительных положительных аномалий температуры в широтной зоне 45°-55° с.ш. Рассчитаны основные характеристики «волн тепла» − интенсивность, повторяемость и продолжительность − в летний период. Проанализированы тенденции в изменении этих характеристик в условиях современного глобального потепления. Получены оценки связи продолжительности волн тепла с макроциркуляционными индексами, характеризующими основные моды колебаний в атмосфере, с индексом антициклональной циркуляции и с характеристиками теплового состояния Северной Атлантики. Сделан вывод о том, что долгоживущие летние аномалии тепла связаны с развитием в этих районах антициклональной циркуляции. Показано, что влияние теплового состояния Северной Атлантики в предшествующий холодный период проявляется в продолжительности крупных аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей этих аномалий меняется от месяца к месяцу: в мае это центральные районы Сибири (90°-95° в.д.), в июне-июле – дальневосточный сектор 100°-140° в.д. Области влияния зимней Северной Атлантики отмечаются в западных районах России (30° в.д.) в июле; в августе они охватывают всю Европейскую часть России (30°-60° в.д.) и сектор 120°-140° в.д. Предполагается, что в будущем выявленные связи можно будет использовать при разработке вероятностного прогноза длительных аномалий тепла в широтной зоне 45°-55° с.ш.

Ключевые слова. Климат, температура воздуха, волны тепла, атмосферная циркуляция, теплосодержание океана, тепловое состояние океана.

ON TENDENCIES IN THE OF DURATION «HEAT WAVES» IN RUSSIA

*E.V. Rocheva, V.D. Smirnov**

Institute of Global Climate and Ecology, Roshydromet and RAS, 20b, ul. Glebovskaya, 107258 Moscow, Russia, *vsmirnov327@gmail.com

Abstract. A «heat wave» is considered as an event of long-lived anomaly of temperature in latitudes 45°-55° N. The main characteristics of summer heat waves, namely, intensity, frequency and duration, are calculated. Trends in these characteristics under recent global warming are analyzed. Relationships of heat wave duration to macrocirculation indices describing main modes of atmospheric oscillations, to anti-cyclonic circulation index and to thermal status of the North Atlantic ocean are obtained. Long-lived summer anomalies of temperature were found dependent on anti-cyclonic circulation. It is shown that thermal status of the North Atlantic ocean in the previous cold season (December to April) noticeably influences the duration of large continental temperature anomalies in all summer months (May to August). However, spatial layout of the anomalies changes is month specific: in May the anomalies are located in central regions of Siberia (90°-95° E), while in June and July they are located in Far East sector 100°-140° E. «Winter» North Atlantic ocean influences western regions of Russia (30° E) in July, while in August it affects all European part of Russia (30°-60° E) and sector 120°-140° E. It is planned that the relationships obtained can be used in future for probabilistic prediction of long-lived temperature anomalies in latitudes 45°-55° N.

Key words. Climate, air temperature, heat waves, atmospheric circulation, ocean heat content, thermal status of the ocean.

Введение

Проф. Б.И.Срезневский в 1885 г. (http://alcala.ru/brokgauz-slovari/izbrannoe/slovar-S/S8088.shtml) впервые указал на поступательное, подобное волне, смещение воздушных масс в Европейской части России. Вначале были замечены волны холода, которые зарождались на крайнем северо-западе России и, обнаруживая поступательное, подобное волне, движение, смещались на юго-восток. Впереди волны наблюдалось повышение температуры, также обнаруживающее поступательное, подобное волне, движение. Это явление получило название *волн тепла*.

Для выделения волн тепла в разных работах применяют разные критерии. Так, в книге Л.Константинова «Погода и сад» (http://www.pogodaiklimat.ru/articles/article49.htm) волной тепла в Подмосковье в мае считается повышение среднесуточной температуры не менее чем на 4°С выше нормы в течение двух дней и более. В мае продолжительность волн тепла в среднем 8-10 дней (в отдельные годы − до 22-23 дней). В июле к волнам тепла отнесены случаи, когда средняя суточная температура воздуха не менее двух дней подряд отличается от нормы на 3°С и более. Продолжительность волн тепла в июле колеблется от 2 до 18 дней. При волнах тепла в июле средняя суточная температура воздуха иногда составляет 27-30°С.

В работе (Груза, Ранькова, 2011) для исследования уникальной летней жары 2010 года в России были получены временные ряды характеристик волн тепла в летний период вдоль широты 52,4° по данным реанализа для летнего сезона. Волной тепла считался отрезок времени внутри сезона, когда положительные аномалии температуры держались выше величины стандартного отклонения (std, ºС) в течение 7 дней и более, с возможными «откатами» не ниже уровня 0,5 std в течение не более 3 дней. Рассмотрены характеристики блокирующих ситуаций в том же широтном поясе (50°-57° с.ш.) и выявлена их связь с характеристиками волн тепла. Показано, что летом 2010г. на Европейской территории в секторе 30°-45° в.д. продолжительность блокирования достигла почти 70 дней. Устойчивая антициклоническая циркуляция наблюдалась также и в Восточной Сибири, однако здесь она продолжалась около 40 дней (местами до 45).

В статье (Мартазинова, Остапчук, 2004) резкими повышениями среднесуточной температуры воздуха считаются изменения средней суточной температуры воздуха на 6-10°С на более 80% территории Украины. Изменения температуры сохраняются в течение недели и более. Определены наиболее вероятные положения высотных барических полей тропосферы и стратосферы, формирующие длительные резкие изменения средней суточной температуры воздуха на территории Украины.

В метеорологическом словаре (Хромов, Мамонтова, 1974) под волной тепла понимается «значительное потепление, распространяющееся в определенном направлении, связанное с адвекцией теплой массы».

Области крупных аномалий тепла, длительное время сохраняющиеся в одном регионе, обычно связывают с малоподвижными антициклонами, блокирующими западный перенос воздушных масс (Шакина, Иванова, 2010).

Таким образом, существуют разные критерии и объяснения условий возникновения волн тепла.

Цель данной работы – оценка тенденций в изменении характеристик устойчиво сохраняющихся на большой территории длительных аномалий тепла, связь этих аномалий с особенностями атмосферной циркуляции и теплового состояния океана.

Данные и методы анализа

В данной работе волны тепла рассматриваются как эпизоды длительных аномалий тепла в широтной зоне 45°-55° с.ш.

Для расчета характеристик волн тепла используется массив с данными о температуре приземного воздуха суточного разрешения из базы данных NCEP/NCAR Reanalysis 1 http://www.esrl.noaa. gov/psd/ (Kalnay et al., 1996).

При анализе условий формирования длительных аномалий тепла на территории России учитывались особенности циркуляции с использованием макроциркуляционных индексов, характеризующих основные моды колебаний в атмосфере (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/).

Особое внимание уделено особенностям теплового состояния разных слоев Мирового океана в холодный период года. Для этой цели использовались:

- данные по теплосодержанию Мирового океана для слоя 0-700 м (в узлах сетки 5°×5° и осредненные по бассейнам океана (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/);
- аномалии температуры океана для слоев 0-100, 0-700, 0-2000 м, осредненные по бассейнам океана.

3-месячные данные аномалий температуры океана по бассейнам Мирового океана взяты рассчитанными, исходя из 3-месячных объективно проанализированных на сетке 1°×1° полей аномалий температуры для каждого стандартного («по NODC» (NOAA National Oceanographic Data Center)) уровня по глубине. Для расчета последних, в свою очередь, использованы данные из «World Ocean Database» (Boyer et al., 2009) для соответствующего 3-месячного

периода и климатические среднемесячные данные согласно «World Ocean Atlas 2009» (Locarnini et al., 2010).

Также использовались среднемесячные данные потенциальной температуры океана (°C) из океанских реанализов ECMWF ORAS4 (ftp://ftp.icdc.zmaw.de/EASYInit/ORA-S4/monthly_1x1/) с горизонтальным разрешением 1°×1°. Реанализы ECMWF ORAS4 базируются на модели океана NEMO (http://www.nemo-ocean.eu/) версии 3.0 и системе усвоения данных NEMOVAR (Mogensen et al., 2012). В модели океана NEMO используется приблизительно одноградусное горизонтальное разрешение и 42 уровня по вертикали, 18 из которых находятся в верхнем 200-метровом слое океана.

Основные определения. Будем считать, что на меридиане *L0* осуществилась аномалия интенсивности *w0*, если хотя бы в одном узле этого меридиана внутри широтного пояса 45°-55° с.ш. выполняется условие *Wt>w0.* Под волной тепла понимается факт осуществления аномалии заданной интенсивности *w0*, сохраняющейся в течение не менее *d0* дней в секторе протяжённостью не менее *L0* градусов долготы. Другими словами, в качестве волны тепла рассматривается период существования аномалии с характеристиками: *Wt>=w0, D>=d0, L>=L0.*

Участок волны тепла вдоль одного меридиана будем считать «эпизодом волны тепла», его главная характеристика – продолжительность, то есть число дней непрерывного существования на заданном меридиане аномалии, отвечающей критериям *(L0, d0, w0)*. К сезонным характеристикам волн тепла относятся: число волн тепла за сезон, их суммарная продолжительность и средняя за сезон продолжительность. Наиболее удобной календарной характеристикой волн, отвечающих заданным критериям *(L0, d0, w0)* на заданном меридиане в течение заданного периода (сезона, месяца) является, на наш взгляд их суммарная продолжительность N_{yL} (дни). Иной формой этой характеристики можно считать повторяемость f_{yL}(%) – суммарная продолжительность за сезон, деленная на число дней в сезоне (доля времени с аномалией соответствующей категории).

Анализ характеристик волн тепла выполнен для трех уровней интенсивности *w0 = 0,5, 1,0 и 2,0* (аномалия выше *0,5σ, 1σ и 2σ*), из которых наиболее удачным представляется *w0=1*. Для каждого меридиана рассчитаны временные ряды N_{yL} за каждый месяц и за первую половину лета (май-июнь) при критериях: *d0* = {4 | 8 | 10 | 15 |

25 дней и более} и *L0* = {10 | 15 гр. долготы и более} и получены их статистические характеристики за 1956-2010 и 1976-2010 гг.

Все приведенные ниже результаты соответствуют *w0=1* (аномалия выше σ), т.е. относятся к волнам с аномалиями не ниже σ. В табл. 1 приведены: повторяемость волн тепла за 55 лет (среднее число волн за сезон), их средняя продолжительность и суммарное число охваченных ими дней (в течение одноименных сезонов 55 лет).

Таблица 1

Многолетние характеристики эпизодов волн тепла заданной интенсивности, продолжительности и протяженности на долготе 37,5° в.д. в мае-июне 1956-2010 гг.

Критерии эпизода тепла			Среднее число эпизодов за сезон	Средняя продолжительность эпизода (дни)	Средняя сезонная продолжительность эпизодов тепла (дни)
Интенсивность	Минимальная протяженность, (сектор долготы)	Минимальная длительность (дни)			
Аномалия не менее σ °C	10°	4	1,5	8,9	13,4
		8	0,7	13,8	9,3
		10	0,5	15,9	7,8
	15°	10	0,5	13,6	6,4
		15	0,1	18,1	2,3

Суммарная (по каждому месяцу за все 55 лет) продолжительность волн тепла протяженностью не менее 10° долготы (L0 = 10) картирована на рис. 1, как функция календарного месяца (ось X) и долготы (ось Y). Оценки приведены для двух вариантов продолжительности: не менее 4 дней и не менее 10 дней.

На рис. 2 аналогичные данные представлены в виде долготного хода сезонной повторяемости (% дней с соответствующей аномалией) волн тепла разной продолжительности *d0* = {4 | 8 | 10 | 15 |25| и более дней} и протяженности L0 = {10 | 15 | и более градусов долготы}, но только для сезона первой половины лета (май-июнь).

Видно, что в рассматриваемой широтной зоне 45°-55° с.ш. наибольшее число дней, охваченных волнами тепла, отмечается в августе над Тихим океаном (140°-170° в.д.) и над Атлантикой (30° з.д.), а в июле − в Западной Европе и на Европейской части России. В сезон первой половины лета (май-июнь) максимум повторяемости отмечается на ЕЧР (35°-40° в.д.), а минимум – в

Западной Сибири (80°-85° в.д.). Выделяется также вторичный максимум вблизи 95°-100° в.д.

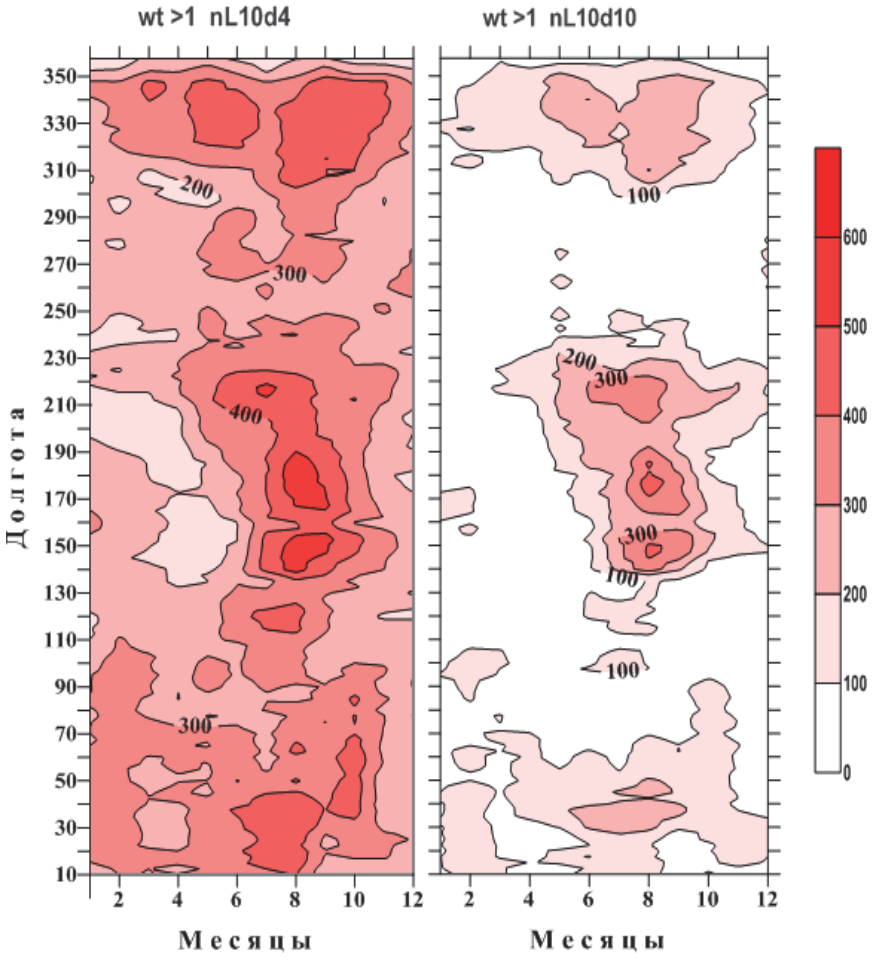

***Рис. 1**. Суммарная продолжительность волн тепла продолжительностью не менее 4 дней (слева) и 10 дней (справа) за 1956-2010 гг. в зоне 45°-55° с.ш., как функция месяца года (ось X) и долготы (ось Y).*

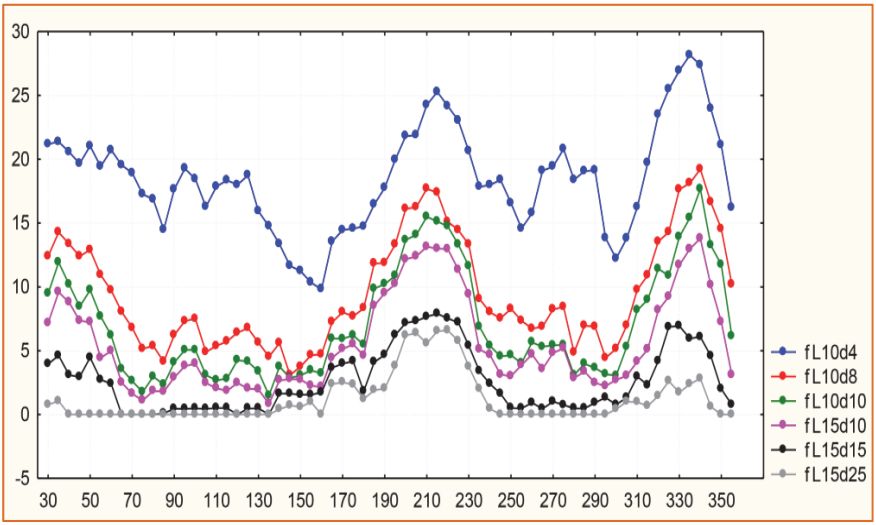

Рис. 2. *Средняя сезонная (май-июнь) повторяемость волн тепла разной продолжительности и протяженности как функция долготы (ось X) (за 1956-2010 гг.)*

По-видимому, указанные особенности в долготном распределении сезонной продолжительности летних волн тепла можно объяснить региональными особенностями циркуляции. Как известно, на юге Европейской территории России летом часто располагается отрог высокого давления Азорского антициклона. Возникают блокирующие ситуации, надолго устанавливается ясная жаркая, сухая погода − наступает засуха. Южные районы Сибири (80°-110° в.д.), напротив, находятся под влиянием летней азиатской депрессии. По западной периферии Азиатской депрессии поступает арктический воздух с низким влагосодержанием. В результате сильного прогревания воздуха ослабевают термические контрасты, убывают осадки − периодически наблюдаются засухи. Судя по полученным результатам, продолжительные эпизоды тепла наблюдаются при блокирующих ситуациях чаще, чем в условиях Азиатской депрессии.

Временные ряды сезонной (май-июнь) продолжительности эпизодов волн тепла на меридианах 37,5°, 82,5° и 97,5° в.д. приведены на рис. 3 для волн трех категорий: *L10d4* − волны

продолжительностью не менее 4-х дней на протяжении не менее 10 градусов долготы, *L10d10* − волны продолжительностью не менее 10 дней и протяженностью не менее 10 градусов долготы, *L15d10* − волны продолжительностью 10 и более дней и протяженностью 15 и более градусов долготы.

Временные ряды на рис. 3 указывают на определенное увеличение продолжительности волн тепла на меридиане 97,5° в.д. в 1996-2004 гг. Эта тенденция подтверждается и оценками трендов в табл. 2. Действительно, на меридианах 90°-100° в.д тренд за 1976-2010 гг. положительный и объясняет около 30% полной дисперсии ряда. Однако в других регионах существенных тенденций в изменении продолжительности и повторяемости волн тепла обнаружено не было. Тем не менее, можно, по-видимому, отметить, что длительные и обширные аномалии тепла чаще встречаются во второй половине рассматриваемого периода.

Анализ циркуляционных характеристик

Анализ карт *wH500* для сезонов с максимальной продолжительностью волн тепла (май 1979 и 2010 гг. на меридиане 37,5° в.д. и май 1982г. на 82,5° в.д.) показал, что всем трем случаям соответствует блокирование в поле H500. Для количественной оценки связи продолжительности волн тепла с сопутствующими (и предшествующими) циркуляционными условиями, привлечен индекс антициклоничности *IpH*, ранее введенный авторами (Рочева, 2012). Этот индекс учитывает долю площади, занятой крупными (выше сигмы) положительными аномалиями H500 в регионах: Европейская территория [ЕТ, 45°-60° с.ш., 30°-60° в.д.] и Западная Сибирь [ЗС, 50°-60° с.ш., 60°-90° в.д.]. В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции в мае, июне, июле между индексом *IpH* в указанных регионах и числом дней *N* с волнами тепла на соответствующих меридианах 45° и 75° в.д. Полученные корреляции (более 0,7-0,8 для ЕТР и более 0,5-0,6 для Западной Сибири) указывают, что в рассматриваемых регионах предложенные критерии и характеристики соответствуют масштабам летних аномалий тепла, связанных с развитием антициклональной циркуляции.

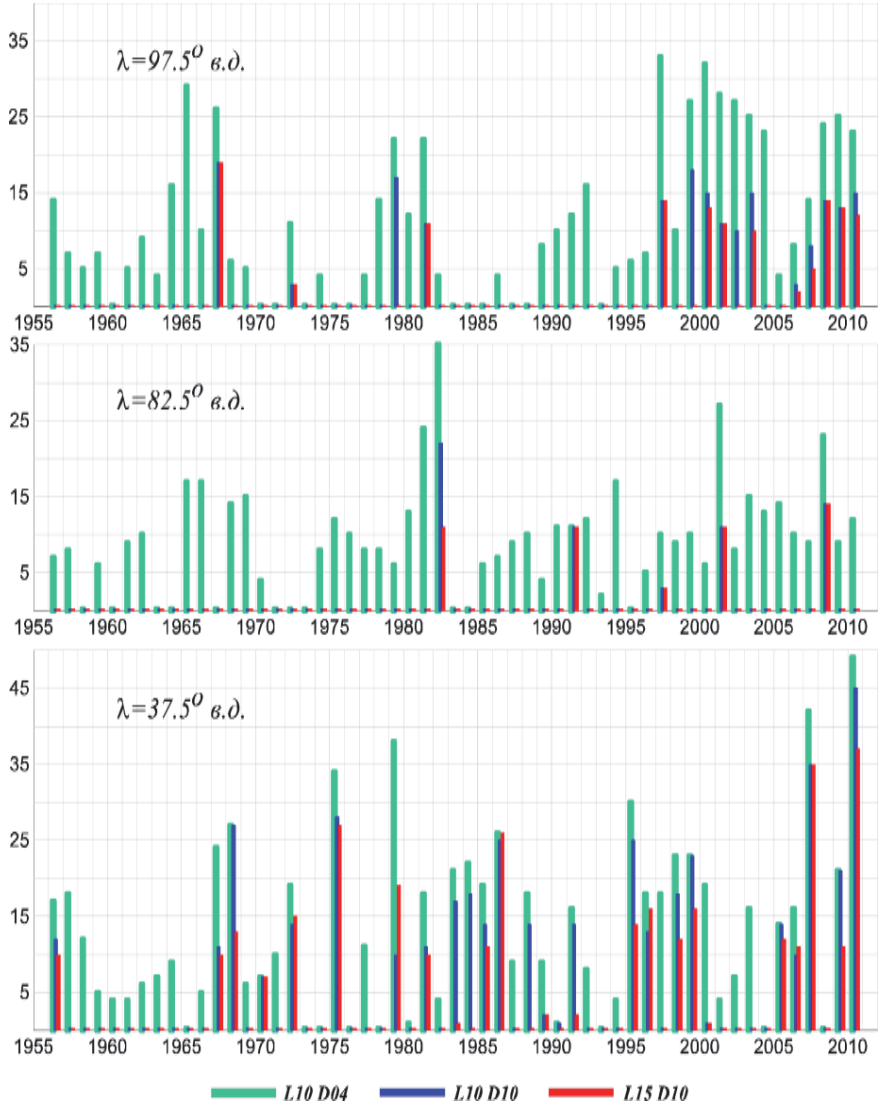

Рис. 3. *Временные ряды продолжительности волн тепла интенсивности w0=1, протяженности L0 = 10, 15 и более градусов долготы на меридианах (37,5°, 82,5°, 97,5° в.д.) за сезон май-июнь 1956-2010 гг.*

Таблица 2

Многолетние статистики волн тепла заданной категории (wt>1, L не менее 10 градусов долготы), продолжительностью не менее 4, 8, 10 дней за 1976-2010 гг. в зоне 45°-55° с.ш.

Категория волн тепла	Статистики	Долгота, градусов в.д.							
		30	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**
nL10d4	*mean*	14,5	13,3	13,8	13,2	13,9	12,5	11,5	12,6
	σ	12,1	10,3	10,5	11,9	8,7	8,2	7,5	10,4
	b	3,6	1,4	1,9	1,9	0,8	1,1	3,3	5,7
	D%	9,5	2,1	3,3	2,5	0,8	1,9	**20,7**	**31,0**
nL10d8	*mean*	8,8	9,2	9,1	6,8	5,5	4,6	4,5	5,9
	σ	12,2	9,5	10,1	10,8	7,3	7,1	6,2	7,5
	b	2,9	1,3	2,7	2,3	-0,3	0,3	2,1	4,1
	D%	6,0	1,9	7,5	4,9	0,2	0,2	**12,2**	**31,2**
nL10d10	*mean*	7,3	7,4	7,0	5,0	2,2	2,8	3,4	4,1
	σ	11,2	8,8	8,8	8,7	5,8	5,9	6,0	6,1
	b	2,1	1,3	1,8	2,2	-0,9	0,5	2,1	2,7
	D%	3,6	2,3	4,5	6,6	2,3	0,8	**13,4**	**20,1**

Примечание: *mean – средние сезонные (май-июнь) значения, дни; σ – стандартные отклонения, b – коэффициенты линейного тренда, D% – объясненная трендом дисперсия. Жирным шрифтом выделены значения, где вклад тренда в дисперсию более 10%.*

Аналогично проанализированы статистические связи продолжительности волн тепла с макроциркуляционными индексами, характеризующими основные моды колебаний в атмосфере (табл. 4), в том числе:

– восточно-атлантическое колебание (EA),
– западно-тихоокеанское колебание (WP),
– восточно-атлантическое – западно-российское колебание (EA/WR),
– скандинавское колебание (SCA),
– североатлантическое колебание (NAO).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции продолжительности эпизодов волн тепла N_{Ld} (λ=45° в. д., 75° в.д.) с индексом антициклоничности *Iph* и средней температурой Т в регионах ЕТ и ЗС в мае, июне, июле

Продолжительность эпизодов волн тепла *n(L10d4)* на меридиане N_λ		Индекс антициклоничности Iph (в регионе)			Средняя температура Т, °С (в регионе)		
		май	июнь	июль	май	июнь	июль
Регион: Европейская территория [45°-60°N, 30°-60°E]							
N, λ=45° в.д. (Поволжье)	Май	**0,79**	−0,02	−0,10	**0,77**	−0,06	−0,06
	Июнь	0,15	**0,81**	0,26	0,05	**0,79**	0,18
	Июль	−0,18	0,20	**0,72**	−0,08	0,23	**0,74**
Регион: Западная Сибирь [50°-60°N, 60°-90°E]							
N, λ=75°в.д. (юг западной Сибири)	Май	**0,59**	0,26	−0,12	**0,67**	0,27	−0,12
	Июнь	0,28	**0,59**	0,00	0,23	**0,63**	0,16
	Июль	0,20	0,24	**0,65**	0,02	0,06	**0,50**

Примечание. *1) Жирным шрифтом выделены коэффициенты с уровнем значимости α≤0,01*

Можно видеть, что в мае и июне формирование аномалий температуры на ЕТР, в основном, связано с развитием колебаний EA/WR,WP, а в Западной Сибири − EA/WR и SCA. Связи с индексами этих колебаний – синхронные и асинхронные – в отдельные месяцы прослеживаются на большом расстоянии.

Таким образом, рассмотренные характеристики продолжительности волн тепла при предложенных критериях отражают долгоживущие на большом пространстве крупные аномалии температуры воздуха, связанные с развитием антициклональной циркуляции (как минимум до уровня поверхности 500 гПа) и усилением колебаний EA/WR и SCA. Заметный положительный тренд во временных рядах продолжительности волн тепла обнаруживается восточнее 90° в.д., где объясненная трендом дисперсия в период 1976-2010 гг. превысила 30%.

В отдельные месяцы проявляется влияние Скандинавского (SCA, в мае) и Североатлантического (NAO, в июне) колебаний, с которыми связано формирование отрицательных аномалий температуры на Урале и в Сибири.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между индексами циркуляции и продолжительностью волн тепла N_{Ld} (L10d4, wt>1) на долготах от 40 до 100° E

	Долгота												
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Май													
EA5	0,21	0,11	−0,06	**−0,38**	**−0,46**	**−0,41**	**−0,31**	−0,19	−0,09	−0,05	0,12	0,16	0,15
WP5	**−0,30**	**−0,37**	**−0,39**	−0,26	−0,23	−0,07	0,02	−0,07	−0,03	−0,21	−0,20	−0,26	**−0,30**
EA/WR5	**−0,45**	**−0,40**	**−0,40**	**−0,36**	−0,27	−0,06	0,15	0,23	**0,41**	**0,54**	**0,45**	**0,47**	**0,51**
SCA5	0,05	0,05	−0,09	−0,09	−0,15	**−0,32**	−0,27	**−0,44**	**−0,45**	**−0,43**	**−0,43**	−0,28	−0,17
Июнь													
EA5	0,01	−0,01	−0,10	−0,15	**−0,33**	**−0,33**	**−0,33**	−0,21	−0,03	0,20	**0,28**	0,11	0,17
NAO6	−0,02	−0,10	**−0,28**	**−0,45**	**−0,47**	**−0,31**	−0,19	−0,21	−0,01	0,11	0,20	0,11	0,06
WP6	**−0,30**	**−0,28**	**−0,31**	−0,19	−0,12	−0,01	0,13	0,04	0,10	0,02	0,00	0,12	0,09
EA/WR6	**−0,29**	**−0,39**	**−0,42**	**−0,33**	**−0,43**	**−0,36**	**−0,30**	−0,17	0,01	0,23	0,25	0,00	0,08
Июль													
WP5	**−0,35**	**−0,39**	**−0,30**	−0,12	−0,16	0,01	0,11	0,07	0,01	0,00	0,03	−0,17	−0,25
SCA5	0,13	0,09	−0,12	−0,21	**−0,28**	**−0,31**	**−0,33**	−0,26	**−0,31**	**−0,30**	**−0,34**	-0,23	−0,18
EA/WR6	**−0,30**	−0,27	**−0,30**	−0,26	**−0,39**	**−0,30**	**−0,36**	**−0,35**	−0,21	−0,20	−0,15	−0,14	−0,12
EA7	0,26	0,22	0,18	0,07	0,09	0,05	0,00	0,13	−0,02	−0,02	0,07	**0,30**	**0,45**
WP7	**−0,33**	**−0,31**	−0,27	−0,13	−0,01	0,10	0,01	−0,11	−0,12	−0,22	**−0,35**	−0,19	**−0,27**
EA/WR7	**−0,35**	**−0,47**	**−0,58**	**−0,55**	**−0,51**	**−0,53**	**−0,47**	**−0,42**	−0,08	−0,13	−0,01	0,08	0,03

Примечание. *В первой колонке указано название индекса циркуляции и номер месяца (май − 5, июнь − 6, июль − 7), для которого рассчитан коэффициент корреляции. Жирным шрифтом выделены коэффициенты с уровнем значимости $\alpha \leq 0,05$. Расшифровку обозначений индексов см. в тексте выше.*

Анализ характеристик теплового состояния океана

Одним из факторов, определяющих характер циркуляции, является изменение теплового состояния океанов, особенно когда крупные аномалии температуры океана охватывают большие по площади и толщине слои воды и сохраняются по несколько месяцев. Влияет также взаимное и устойчивое в течение зимних и весенних месяцев расположение крупных очагов положительных и отрицательных аномалий температуры воды. Это «может содействовать и усилению и ослаблению меридиональной циркуляции с определенной локализацией тропосферных гребней (антициклонов) и ложбин (циклонов) и оказывать особенно большое влияние на характер адвекции воздуха в атмосфере» (Кац, 1973).

Ниже анализируются полученные количественные оценки связи продолжительности волн тепла в широтной зоне наиболее подвергнутой засухам (45°-55° с.ш.), на меридианах от 30° до 140° в.д. в мае, июне, июле и августе с особенностями теплового состояния океана в предшествующий холодный период.

На рис. 4 (а – г) приведен долготный ход коэффициентов корреляции между индексом продолжительности волн тепла в мае (а), июне (б), июле (в), августе (г) и осредненными по бассейну Северной Атлантики (включая Северный Ледовитый океан) предшествующими «зимними» (январь-март) аномалиями температуры для 3-х слоев океана (0-100 м, 0-700 м и 0-2000 м).

Как видно из рис. 4, особенности теплосодержания океана в слое 0-700 м и теплового состояния в разных слоях океана в предшествующий холодный период отражаются в продолжительности крупных летних аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей с наибольшими коэффициентами корреляции ($r>0,5$-$0,6$) меняется от месяца к месяцу: в мае эта область находится в центральных районах Сибири (90-95° в.д), в июне-июле – на 100°-120° в.д. В западных районах России (30° в.д.) область со значимыми корреляциями появляется лишь в июле, а в августе – на всей Европейской части России (30°-60° в.д.).

Здесь же приведены аналогичные оценки для теплосодержания океана в слое 0-700 м.

Понятно, что влияние особенностей теплового состояния Атлантики на возникновение длительных аномалий тепла на континенте осуществляется через циркуляцию атмосферы, на которую влияет не только Атлантика, а весь Мировой океан.

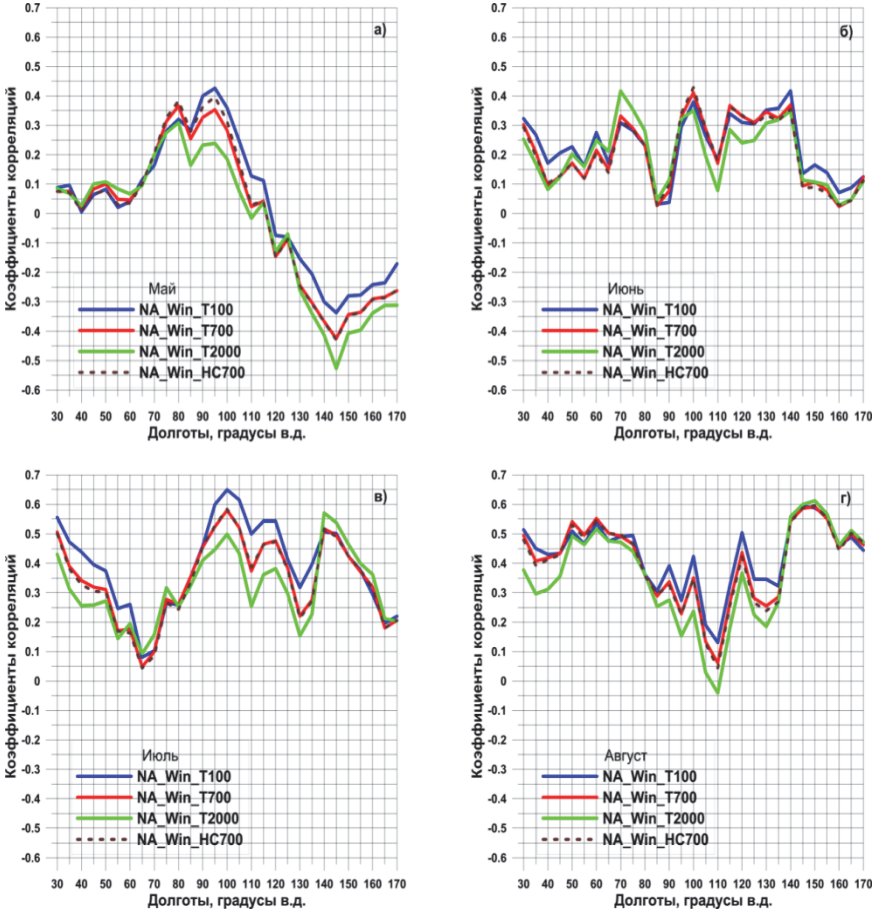

Рис. 4. *Долготный ход корреляций между индексом продолжительности волн тепла на текущем меридиане в широтном поясе 45°-55° с.ш. в мае (а), июне (б), июле (в), августе (г) и характеристиками теплового состояния Северной Атлантики (NA) в предшествующий период (январь-март, Win): HC700 – теплосодержание слоя 0-700 м; T100, T700, T2000 – средняя температура слоев 0-100 м, 0-700 м и 0-2000 м*

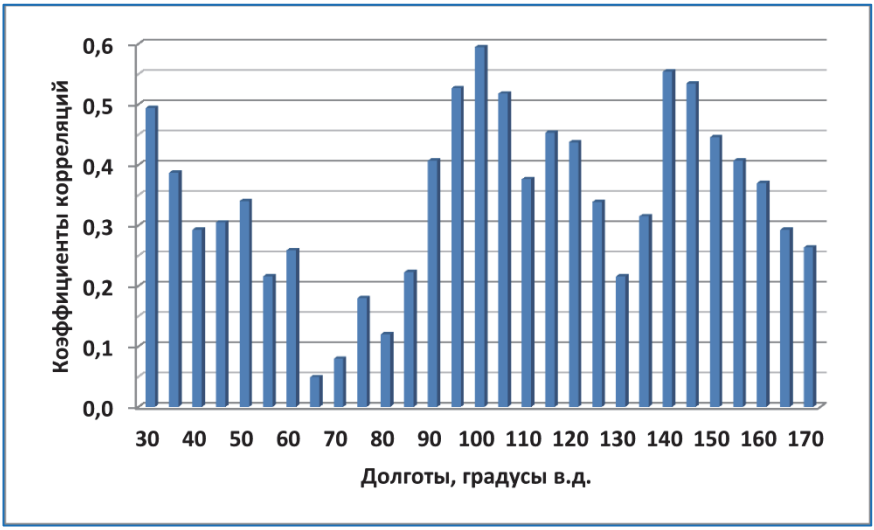

Рис. 5. *Долготный ход корреляций между индексом продолжительности волн тепла в широтном поясе 45°-55° с.ш. в июле и аномалиями температуры Мирового океана в январе-марте для слоя 0-700 м.*

Для примера рассмотрим коэффициенты временных корреляций между индексом продолжительности волн тепла на меридианах 30°-170° в.д. в июле и предшествующими (январь-март) аномалиями Мирового океана в слое океана 0-700 м (рис. 5). Так же, как на рис. 4, в этом случае максимальные коэффициенты корреляции обнаружены в июле в зоне меридианов 30° и 100° в.д.

Было проведено сопоставление результатов, полученных по данным бассейна Северная Атлантика, с результатами, полученными с использованием данных о температуре и теплосодержании океана в узлах сетки.

На рис. 6 приведены коэффициенты корреляции между теплосодержанием океана в слое 0-700 м за январь-март и продолжительностью эпизодов волн тепла в мае в зоне меридиана 90° в.д (а), в июле − в зоне 30° в.д (б) и в августе − в зоне 90° в.д. (в). Видны области статистически значимых положительных коэффициентов корреляции (>0,4, 0,5) в зоне Гольфстрима и Северо-Атлантического течений и даже в районе Баренцева моря вблизи Новой Земли. При таких условиях зимнего теплосодержания океана в

Северной Атлантике в слое 0-700 м, устойчивые длительные аномалии тепла возникают не только в Сибири, но и на Европейской части России в июле и августе.

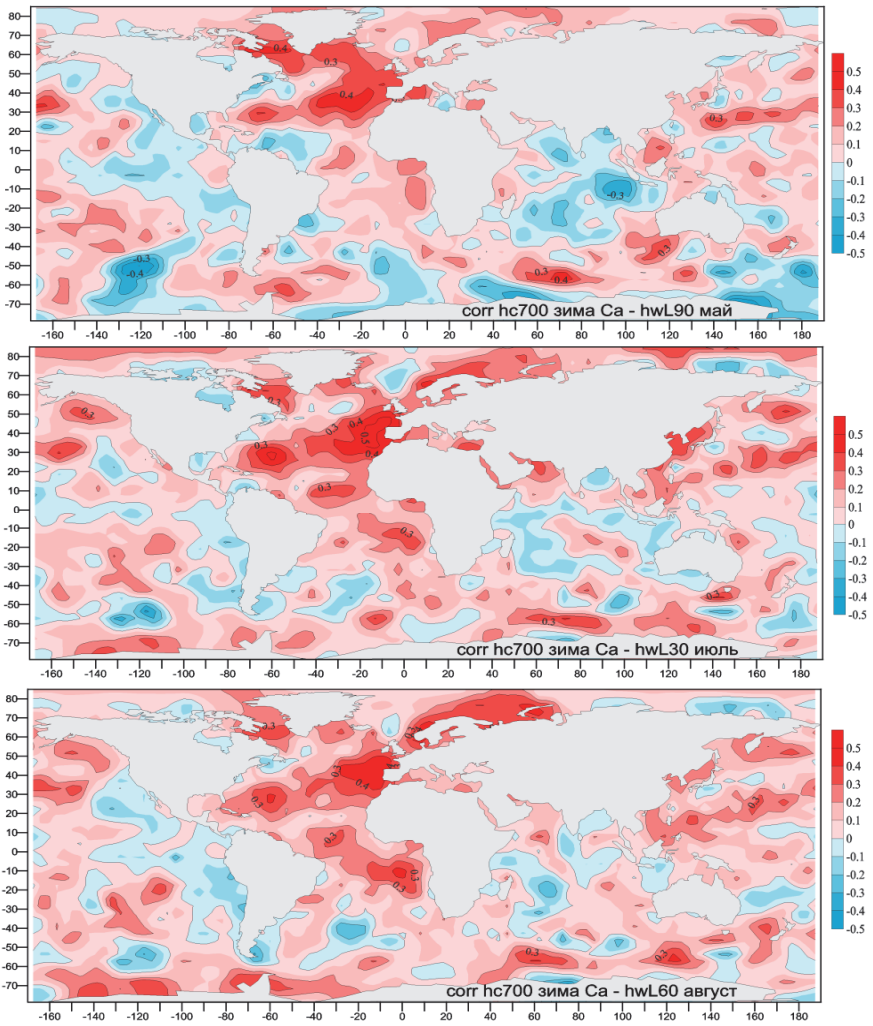

Рис. 6. *Коэффициенты корреляции между теплосодержанием (hc) океана для слоя 0-700 м за январь-март и продолжительностью волн тепла (hw) на фиксированном меридиане L90° в.д. в мае (верхний рис.), L30° в.д. в июле (средний рис.) и L60° в.д. в августе (нижний рис.).*

На рис. 7 приведена карта с коэффициентами корреляции продолжительности волн тепла в зоне меридиана 90° в.д. в мае с потенциальной температурой (°С) океана на глубине ~45 м в предшествующий период (декабрь-апрель).

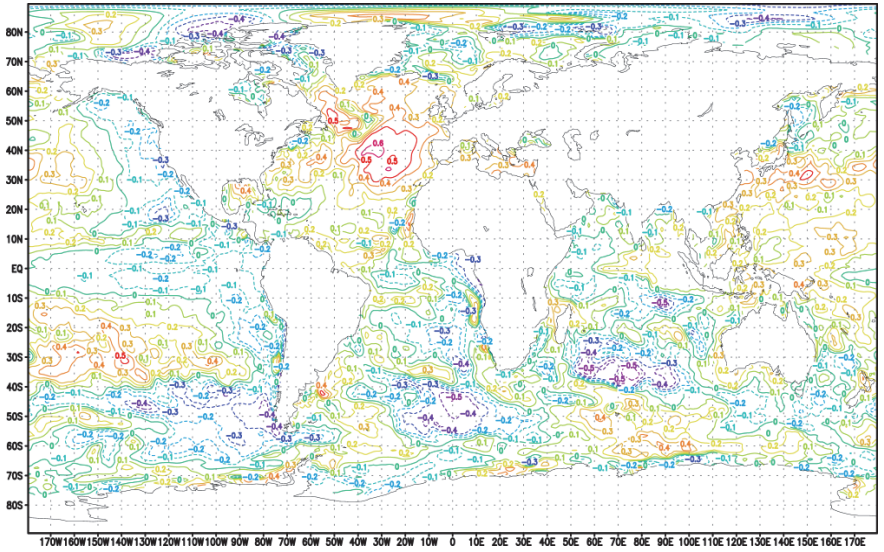

Рис. 7. *Коэффициенты корреляции между потенциальной температурой (°С) океана на глубине ~45 м для сезона (декабрь-апрель) и продолжительностью волн тепла в мае в зоне меридиана 90° в.д. в широтном поясе 45°-55° с.ш.*

Видно, что центральную часть Северной Атлантики занимает область с положительными коэффициентами корреляции между рассматриваемыми переменными с максимальными значениями коэффициентов в центре более 0,6 (при числе наблюдений равном 53). Т.е. появлению длительных крупных аномалий температуры в мае в центре континента Евразия предшествует тепловое состояние океана на глубине ~45 м в центре Северной Атлантики в предшествующий холодный период (декабрь-апрель).

Это подтверждает и табл. 5, где приведены коэффициенты временных (1958-2010 гг.) корреляций между индексами продолжительности волн тепла в мае и среднемесячной

потенциальной температурой (°С) океана на глубине ~45м. в предшествующие месяцы (с ноября по май). При этом данные среднемесячной потенциальной температуры предварительно усреднены по региону Северной Атлантики (30°-50°с.ш., 35°-15°з.д.). Во всех расчетах значения температуры океана брались из архива реанализов ECMWF ORAS4 на сетке 1×1 градус.

Из анализа полученных данных (табл. 5) следует:

- статистически значимые коэффициенты корреляции проявляются в секторе 75-100° в.д. с максимальными значениями в зоне меридиана 90° в.д. − это примерно центральный сектор континента, на который влияют и Атлантический и Тихий океаны;
- асинхронные связи устойчиво проявляются с декабря по апрель (r = 0,56, 0,61);
- синхронные связи (r = 0,65) в мае выше, чем асинхронные.

Таблица 5

Коэффициенты временных (1958-2010 гг.) корреляций между индексами продолжительности волн тепла в мае в широтном поясе 45°-55° с.ш. на территории России и среднемесячной потенциальной температурой (°С) океана на глубине ~45 м, осредненной по региону Северной Атлантики (30°-50°с.ш., 35°-15°з.д.)

Долгота, град. в.д.	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Ноябрь	0,25	**0,3**	**0,38**	**0,48**	**0,56**	**0,59**	**0,58**	**0,32**	0,25
Декабрь	0,21	**0,34**	**0,46**	**0,57**	**0,61**	**0,59**	**0,59**	**0,31**	0,22
Январь	0,17	**0,31**	**0,42**	**0,51**	**0,6**	**0,55**	**0,5**	**0,27**	0,2
Февраль	0,21	**0,35**	**0,43**	**0,49**	**0,59**	**0,55**	**0,45**	0,21	0,17
Март	0,23	**0,39**	**0,47**	**0,49**	**0,57**	**0,53**	**0,45**	0,22	0,24
Апрель	0,19	**0,37**	**0,44**	**0,54**	**0,61**	**0,54**	**0,47**	0,2	0,21
Май	0,13	**0,31**	**0,39**	**0,54**	**0,65**	**0,57**	**0,52**	**0,28**	0,26

Примечание. *Жирным шрифтом выделены коэффициенты с уровнем значимости* $\alpha \leq 0,05$.

Заключение

С использованием данных реанализов рассчитаны основные характеристики «волн тепла». Проанализированы тенденции в изменении продолжительности волн тепла в летний период.

Отмечено определенное увеличение продолжительности волн тепла в зоне меридиана 97,5° в.д. в 1996-2004 гг. (включая крупномасштабные волны *L10D10*). Эта тенденция подтверждается и оценками трендов. Во временном ряду суммарной продолжительности аномалий тепла на отмеченном меридиане тренд за 1976-2010 гг. положительный и объясняет более 30% полной дисперсии ряда.

Показано, что длительные периоды существования волн тепла на континенте связаны с особенностями атмосферной циркуляции и теплового состояния океана.

Влияние особенностей теплового состояния океана в предшествующий холодный период проявляется в продолжительности длительных летних аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей с наибольшими коэффициентами корреляции ($r > 0,5$-$0,6$) меняется от месяца к месяцу: в мае эта область находится в континентальных районах Сибири (90°-95° в.д), в июне-июле – на 100°-140° в.д. В западных районах России (30° в.д.) эта область появляется в июле, а в августе – на всей Европейской части России (30°-60° в.д.) и на востоке 120°-140° в.д.

Предполагается, что выявленные связи в будущем могут быть полезными при разработке вероятностного прогноза длительных аномалий тепла в зоне 45°-55° с.ш.

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность Г.В. Грузе и Э.Я. Раньковой за постоянное внимание и помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00326а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2011. Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на Европейской территории РФ. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 47, № 6. С. 717-721.
2. Кац А.Л. 1973. Необычное лето 1972 года. Л. Гидрометеоиздат. 58 С.
3. Константинов Л.К. Погода и сад. http://www.pogodaiklimat.ru/articles/article49.htm.
4. Мартазинова В.Ф., Остапчук В.В. 2004. Взаимосвязь процессов циркуляции в тропосфере и стратосфере при кратковременных и длительных потеплениях и похолоданиях в Украине. Наукові праці УкрНДГМІ. Вып. 253. С. 28-36.
5. Рочева Э.В. 2012. Возможные предвестники засух в сельскохозяйственных районах России. Метеорология и гидрология. №9. С. 5-18.
6. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. 1974. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат. 568 С.
7. Шакина Н.П., Иванова А.Р. 2010. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования. Метеорология и гидрология. № 11. С. 5-18.
8. Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона http://alcala.ru/brokgauz-slovari/izbrannoe/slovar-Hk/H2215.shtml.
9. Boyer T.P., Antonov J.I., Baranova O.K., Garcia H.E., Johnson D.R., Locarnini R.A., Mishonov A.V., O'Brien T.D., Seidov D., Smolyar I.V., Zweng M.M. 2009. World Ocean Database 2009. Levitus S., Ed. NOAA Atlas NESDIS 66. U.S. Government. Printing Office, Washington, D.C. 216 P.
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteorol. Soc. V. 77. P. 437-471.
11. Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., and Johnson D.R. 2010. World Ocean Atlas 2009. Vol. 1: Temperature. Levitus S., Ed. NOAA Atlas NESDIS 68. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 184 pp.
12. Mogensen K., Balmaseda M.A., Weaver A. 2012. The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. Technical Memorandum No. 668. ECMWF. CERFACS, Toulouse.

ВОЗМОЖНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ РАВНИН РОССИИ В СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА

Е.А. Черенкова

Россия, 119017 Москва, Старомонетный пер., д.29, Институт географии РАН, lcherenkova@marketresearch.ru

Реферат. В статье исследовано возможное изменение увлажнения равнин России в первой половине XXI века на основе данных региональной климатической модели ГГО и глобальных климатических моделей проекта CMIP5. Выявлено, что в период 2011-2030 гг. по сравнению базовым периодом (1981-2000 гг.) ожидаются незначительные и статистически незначимые изменения годового и летнего увлажнения. В 2041-2060 гг. изменения увлажнения станут более существенными: практически на всей территории России (согласно данным ансамбля моделей CMIP5) и на большей части ее территории (согласно данным РКМ ГГО). Будет наблюдаться усиление засушливости по отношению к базовому периоду. Полученные на основе анализа модельных расчетов результаты согласуются с тенденцией изменения увлажнения равнин России в ближайшей перспективе, экстраполированной ранее по данным наблюдений.

Ключевые слова. Изменение увлажнения, коэффициент увлажнения Торнтвейта, глобальные климатические модели, региональная климатическая модель, равнины России.

POTENTIAL CHANGE IN HUMIDIFICATION OF RUSSIAN PLAINS BY MID 21ST CENTURY

E.A. Cherenkova

Institute of Geography RAS, 29, Staromonetny per., 119017 Moscow, Russia, lcherenkova@marketresearch.ru

Abstract. A potential change in moistening of Russian plains in the first half of the 21st century is studied using data of the Voieykov Main Geophysical Observatory (MGO, St.Petersburg, Russia) regional climate model (RCM MGO) and the CMIP5 ensemble of global climate models.

It was found out that only small and statistically insignificant changes in the annual and summer humidification are expected in 2011-2030 vs.

basic period (1981-2000). In 2041-2060, changes in humidification will become more substantial practically over entire Russia (as CMIP5 models predicted) and over most of the Russian territory (according to RCM MGO model). Increasing aridity vs. basic period will be observed. The models' outcomes are consistent with the nearest decade trend in moistening in Russian plains obtained through extrapolation of the observation data.

Key words. Change in humidification, Thornthwaite Moisture Index, global climate models, regional climate model, Russian plains.

Введение

Проблема глобального изменения климата приобрела наибольшую актуальность в инструментальный период, и по мере накопления данных пик активности ее обсуждения исследователями из разных стран пришелся на последние 30 лет. Ученые все чаще стали обращаться к теме исследования факторов климатической изменчивости, соотношения естественной и антропогенной составляющей изменений, а также к выявлению механизмов воздействия компонентов системы дальних связей на природные флуктуации климатических изменений (Володин, 2007; Мохов и др., 2008; Мохов и др., 2011; Оценочный доклад…, 2008; Панин и др., 2009; Попова, Шмакин, 2010; Салугашвили, 2013; Сидоренков, Сумерова 2012; Latif et al., 2007; Schlesinger, 1994 и многие другие).

На фоне меняющегося климата увлажнение равнин России в XX − начале XXI века претерпело как периоды устойчивого роста, так и периоды устойчивого понижения увлажнения. Снижение увлажнения равнинной территории России наблюдалось с начала XX века вплоть до середины 30-х годов, а затем начался его постепенный рост. На рубеже XX – XXI века на большей части территории увлажнение вновь начало уменьшаться (Золотокрылин, Черенкова, 2013; Золотокрылин и др., 2014). На основе анализа данных наблюдений с применением эмпирического подхода было сделано предположение, что выявленная смена тенденции увлажнения является откликом на собственные колебания климатической системы Земли и носит не временный, а устойчивый характер на территории всей зерновой зоны России (Золотокрылин, Черенкова, 2013).

Цель данной статьи – попытаться ответить на вопрос о том, когда формирующаяся тенденция увлажнения равнин России может стать устойчивой, а также исследовать региональные особенности будущих изменений увлажнения к середине XXI века на основе результатов численного моделирования климата на региональной и глобальных климатических моделях.

Территория, данные и методы

В климатологии принято определять увлажнение (влагообеспеченность) территории как соотношение между приходной и расходной компонентами водного баланса (количеством выпадающих атмосферных осадков и испаряемостью). Увлажнение численно выражается с помощью коэффициентов увлажнения (КУ). В свою очередь, испаряемость, являющаяся условной величиной, характеризующей максимально возможное (потенциально возможное, не ограниченное запасами воды) испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях (Хромов, Мамонтова, 1974), может быть рассчитана аналитическими методами на основе метеорологических параметров. В данной статье при расчете испаряемости предпочтение отдано методу К.Торнтвейта, основанному на применении нелинейной функции температуры воздуха с поправкой на локальную широту местности (Thornthwaite, 1948). Пытаясь избежать повторений, отметим, что в более ранних публикациях, в том числе в настоящем издании, коэффициент увлажнения Торнтвейта (КУТ) неоднократно анализировался автором для различных периодов XX и XXI веков с применением различных массивов данных наблюдений и результатов моделирования, подробно был рассмотрен алгоритм и формула расчета коэффициента, его особенности, преимущества, ограничения, а также проведено сравнение с другими методами получения испаряемости (Черенкова, Шумова, 2007; Черенкова, Титкова, 2009; Черенкова, Золотокрылин, 2010).

Исследования проводились для равнинной территории России, расположенной южнее 60 параллели и ограниченной с запада примерно 30° в.д., с востока − 90° в.д.

Для сравнительного анализа предстоящих изменений увлажнения в заданные периоды XXI века были рассмотрены результаты осреднения по мультимодельному ансамблю климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) международного проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), предоставленные сотрудниками ГГО им. А.И. Воейкова в рамках работы над текстом «Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» (ОД_РФ-2). Среднемноголетние изменения годовых и летних (с мая по август): испаряемости, осадков и КУТ были получены на основе временных рядов среднемесячной приземной температуры воздуха и ежемесячных сумм осадков в периоды 2011-2030 гг. и 2041-2060 гг. по отношению к периоду 1981-2000 гг. Использовались значения в узлах сетки 1° х 1°, полученные путем осреднения результатов расчетов по 31 МОЦАО. В качестве данных для базового периода сравнения были взяты данные реанализа MERRA (значения температуры воздуха, Rienecker et al., 2011) и климатологии осадков (Xie and Arkin, 1998).

В статье рассматривается «жесткий» сценарий RCP 8,5 (Representative Concentration Pathways) из семейства современных сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, получивший свое название в соответствии с ожидаемым к 2100г. уровнем радиационного форсинга (8,5 W/m2) (WCRP…, 2011).

Дополнительно в те же временные интервалы оценены результаты численного эксперимента на региональной климатической модели (РКМ) Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ГГО Росгидромета). Региональная модель была создана в конце 90-х годов и с тех пор претерпела множество улучшений, среди которых одним их наиболее важных является увеличение пространственного разрешения по сравнению предыдущей версией модели (Школьник и др., 2006; Школьник и др., 2007).

Региональная модель ГГО (Школьник и др., 2012; Shkolnik et al., 2010) встроена в глобальную модель общей циркуляции атмосферы ГГО T42L25. Обе модели включают описание всех основных физических процессов в атмосфере и на подстилающей поверхности – это конвекция и конденсация, радиационный перенос в облачной атмосфере с учетом суточного хода, горизонтальный и вертикальный турбулентный обмен теплом, влагой и моментом количества движения, гравитационно-волновое сопротивление, тепло- и влагообмен в деятельном слое почвы. В качестве граничных условий на поверхности океана использованы результаты расчетов совместных моделей из проекта CMIP3. Особенностью РКМ является то, что в отличие от глобальных моделей низкого пространственного разрешения, региональная модель с горизонтальным разрешением в 25 км и 25-ю вертикальными слоями учитывает географические особенности территории России с высокой степенью детализации: наличие больших внутренних естественных и искусственных водоемов и рек, играющих существенную роль в формировании локального влагооборота, а также мезомасштабную орографию, влияющую на перемещение воздушных масс над равнинами России. Все это очень важно для воспроизведения пространственно-временной изменчивости регионального климата. В модели использован сценарий увеличения концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере SRES A2 по номенклатуре МГЭИК, соответствующий одному из наиболее сильных вариантов потепления климата. Для уменьшения влияния внутренней климатической изменчивости рассмотрены ансамблевые оценки (3 расчета с разными начальными условиями).

В узлах сетки РКМ ГГО по аналогии с ансамблем МОЦАО CMIP5 были рассчитаны средние многолетние годовые и за летний сезон значения климатических характеристик в указанные периоды. В качестве базового периода, относительно которого проанализированы будущие изменения, рассмотрен период 1981 – 2000 гг. Для сравнения «модель-климат» в базовом периоде использованы среднемесячные данные наблюдений температуры воздуха и сумм осадков из климатического архива ВНИИГМИ-МЦД

(www.meteo.ru) (174 метеостанции в пределах территории исследования).

На основе интерполированных методом кригинга данных с помощью ГИС MapInfo были построены карты пространственного распределения среднемноголетних: испаряемости, осадков и коэффициента увлажнения в указанные периоды. Статистическая значимость результатов оценивалась с помощью критерия Стьюдента (t-test с уровнем значимости 0,95) для временных рядов разной длины.

Проведенное сравнение температур воздуха, осадков и КУТ в среднем за год, с мая по август по региональной модели с данными наблюдений за базовый период (1981-2000 гг.) показало, что модель воспроизводит несколько заниженные по сравнению с наблюденными значения приземной температуры на всей исследуемой территории. Наиболее заметные погрешности РКМ обнаруживаются на азиатской части территории. В летний сезон 1981-2000 гг. модель воспроизводит заниженные по сравнению с наблюденными значения приземной температуры на европейской части территории исследования (до 10%) и до 25-30% на азиатской части. Занижение средней годовой изменчивости температуры немного больше, особенно на территории, близкой к Алтаю (в отдельных точках достигает 50-60%). Модель завышает суммы годовых осадков и осадков с мая по август вблизи горных массивов – в Предуралье (до 25-40%), а отклонения от данных наблюдений на Алтае еще больше. На остальной территории осадки занижены в пределах 7-10%. Аналогичные оценки справедливы в отношении коэффициента увлажнения, поскольку его изменения определяются в большей степени вариациями осадков. С учетом выявленных недостатков воспроизведения моделью рассмотренных показателей в работе оцениваются не их средние значения, а возможные изменения и тенденции.

Определенное внимание было уделено исследованию воспроизведения климатическими моделями пространственного распределения границ зон увлажнения. Для этого была построена карта-схема пространственного распределения изолиний годового

КУТ со значениями 0,35, 0,5, 0,65, 0,8 и 1,0, являющихся северными границами соответственно аридной, семиаридной, сухой субгумидной, субгумидной, влажной субгумидной зон увлажнения (World…, 1992). Необходимо отметить, что пространственное изменение местоположения границ зон от периода к периоду по данным РКМ ГГО в статье не рассматривается по причине того, что модель еще недостаточно хорошо воспроизводит зоны увлажнения, отображая мозаичное распределение границ зон увлажнения.

Анализ результатов

Обратимся к исследованию прогнозируемой в первой половине XXI века динамики увлажнения. Как показано на рисунке 1а, изменения годового увлажнения в период 2011-2030 гг. по отношению к 1981-2000 гг. по данным ансамбля МОЦАО имеют пространственно неоднородную структуру. В центре и на северо-западе европейской части территории исследования ожидается несущественное (до 1%) увеличение увлажнения, а на территории Южного Урала – до 3%. На юге европейской части возможное уменьшение годового увлажнения составит 4%, а на востоке азиатской территории оно напротив возрастет до 5%. Согласно ансамблевым оценкам, в летний сезон 2011-2030 гг. на территории будет доминировать уменьшение увлажнения: в среднем до 3-4%, а на юге европейской части России – до 7% (рис.1б).

По данным ансамбля МОЦАО в период 2041-2060 гг. почти на всей территории (за исключением небольшого района на юго-востоке) будет наблюдаться иссушение, как в целом за год, так и с мая по август, а изменения ожидаются больше, чем в предыдущий период. Прослеживается широтное распределение изменений, возрастающих с севера на юг. В северной половине исследуемой территории к середине XXI века годовое увлажнение уменьшится на 5-6%, а в летний сезон – на 5-10%. На юге европейской России годовое увлажнение может понизиться до 15%, летнее – до 19%, а на юге Западной Сибири – до 12% (рис.1в, г).

Таким образом, сценарий изменений увлажнения равнин России к середине XXI века по данным ансамбля МОЦАО можно отнести к аридному типу.

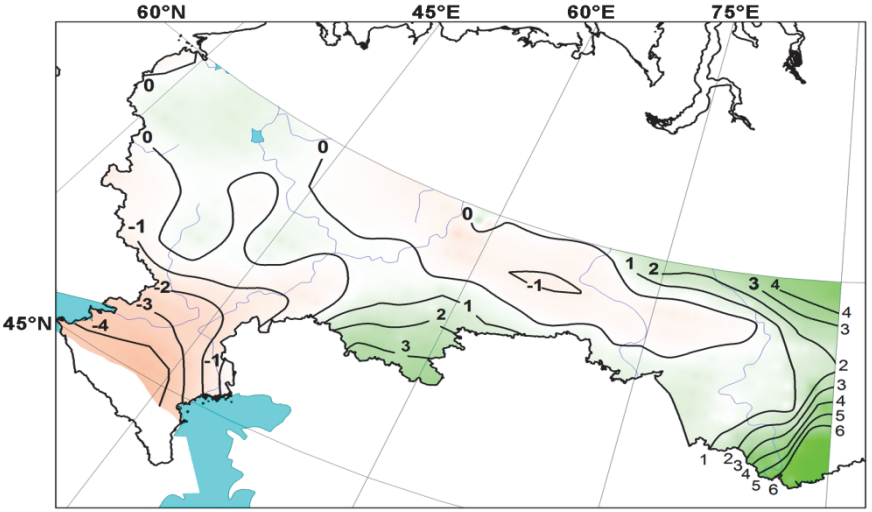

Рис. 1а.

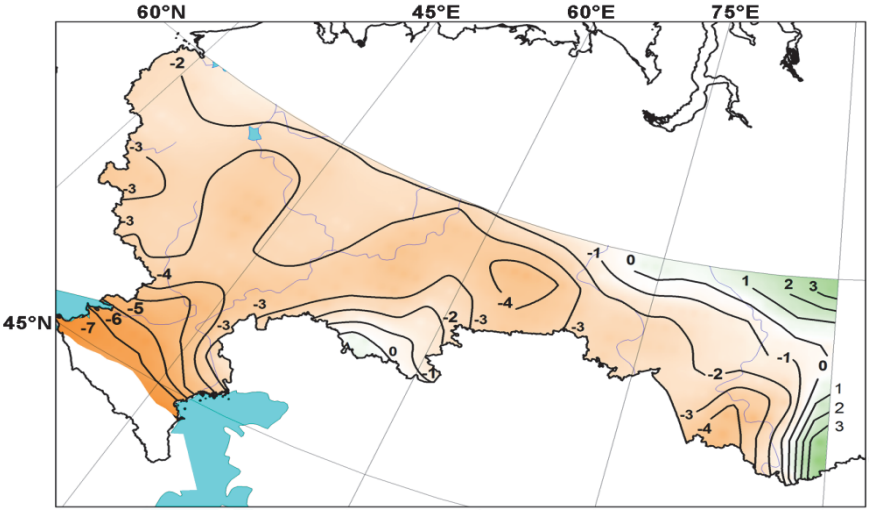

Рис. 1б.

Рис. 1 а, б. *Изменение увлажнения (%) по ансамблю 31 МОЦАО в период 2011-2030 гг. по сравнению с 1981-2000 гг.: а) годового и б) с мая по август. Отрицательные значения означают уменьшение увлажнения, а положительные – его рост. Области статистически значимых результатов показаны штриховкой.*

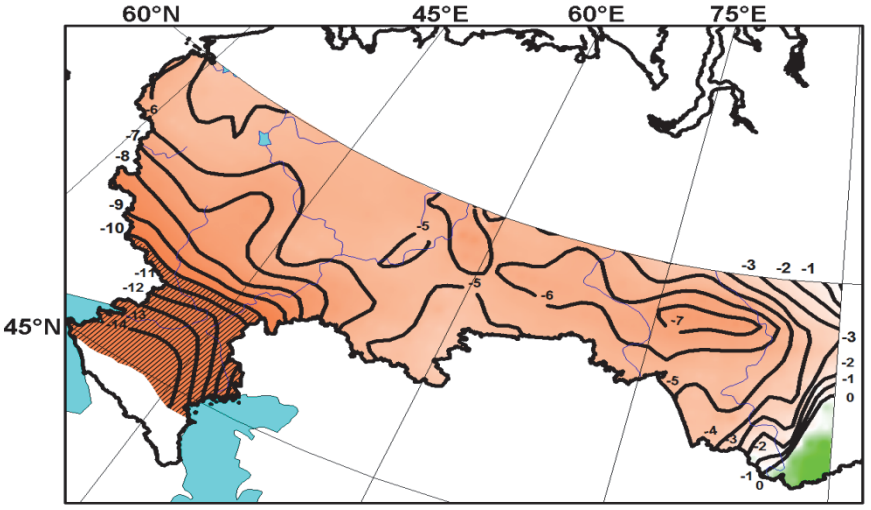

Рис. 1в.

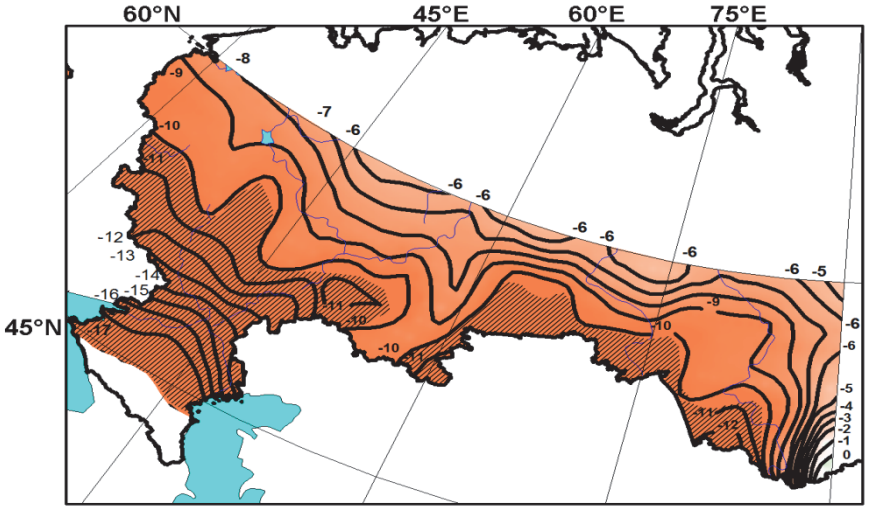

Рис. 1г.

Рис. 1 в, г. *Изменение увлажнения (%) по ансамблю 31 МОЦАО в период 2041-2060 гг. по сравнению с 1981-2000 гг.: в) годового и г) с мая по август. Отрицательные значения означают уменьшение увлажнения, а положительные – его рост. Области статистически значимых результатов показаны штриховкой.*

Смещение северных границ зон увлажнения, показанное на рисунке 2, позволяет наглядно оценить расстояние, на которое могут переместиться границы по данным ансамбля МОЦАО в периоды 2011-2030 гг. и 2041-2060 гг. Отметим, что в первый период местоположение границ почти не изменится, а во второй период границы предположительно сдвинутся к северу на всей территории исследования. Величина ожидаемого смещения границ зон увлажнения (кроме аридной зоны) к середине XXI века будет увеличивается с юга на север на европейской части территории от 50 км для семиаридной зоны увлажнения до 150-200 км для влажной субгумидной зоны и на азиатской части – от 30 км до 100-110 км. Северная граница аридной зоны в период 2041-2060 гг. может подвинуться приблизительно на 70-80 км в западном направлении.

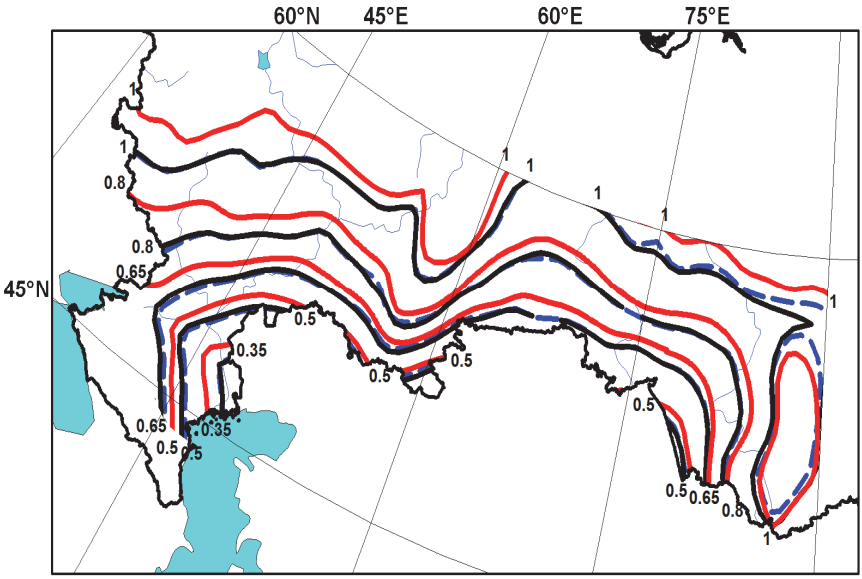

Рис. 2. *Пространственное распределение северных границ зон увлажнения по данным ансамбля МОЦАО в периоды: 1981-2000 гг. (синяя пунктирная линия), 2011-2030 гг. (черная сплошная линия) и 2041-2060 гг. (красная сплошная линия).*

Результаты численного эксперимента на региональной модели демонстрируют изменение увлажнения исследуемой территории к середине текущего столетия по более гумидному типу. Пространственное распределение годовых и сезонных изменений имеет сходную структуру. В период 2011-2030 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. будет преобладать увеличение увлажнения: на севере и востоке европейской части территории рост годового увлажнения может составить до 3-5%, летнего – до 5-10%, на юге: годового и летнего до 10%. В азиатской части увлажнение вырастет в среднем за год на 3-5%, в летний период на 4-8%, а в Омской области − до 11% и 15% соответственно (рис. 3а и 3б). Демонстрация слишком больших изменений на востоке территории, возможно, связана с особенностями воспроизведения РКМ осадков вблизи горных массивов. По данным РКМ ГГО снижение увлажнения прогнозируется в центре ЕЧР (годового до 5-7% и летнего до 10%) и на территории Южного Урала (годового до 2% и летнего до 7-8%).

Как видно из рисунков 3в и 3г, согласно сценарному прогнозу РКМ ГГО в период 2041-2060 гг. на исследуемой территории будет преобладать годовое и летнее уменьшение увлажнение. Иссушение не только продолжится в центральной европейской части территории, но и распространится во всех направлениях. При этом снижение увлажнение за год будет меньше, чем в предыдущий период (2-4%), зато увеличится иссушение летом (до 13-15% в южной части ЕТР). Рост увлажнения продлится только на севере ЕЧР, но замедлится до 1-3% по сравнению с периодом 2011-2030 гг. Годовое увлажнение азиатской части территории понизится на 3-5%, летом может стать суше на 5-10%. Рост годового и сезонного увлажнения на Алтае сохранится.

Таким образом, сценарий РКМ ГГО изменения увлажнения равнинной территории России в первой половине XXI века можно отнести к аридно-гумидному типу, при котором увлажнение зернового пояса европейской части (в особенности летнее увлажнение) будет развиваться согласно аридной составляющей сценария.

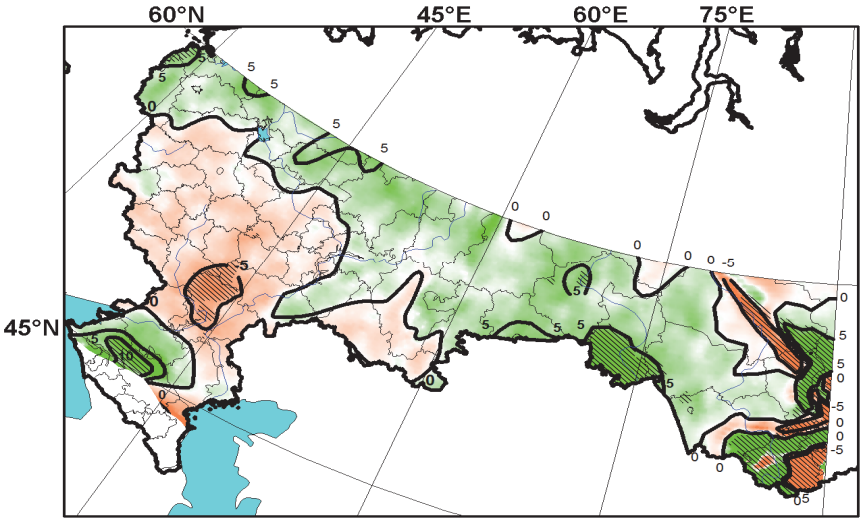

Рис. 3а.

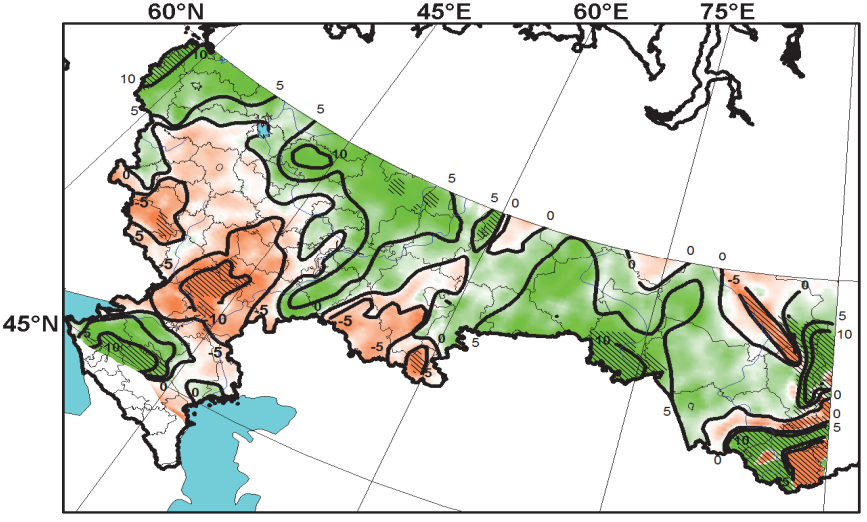

Рис. 3б.

Рис. 3 а, б. *Изменение увлажнения (%) по данным РКМ ГГО в период 2011-2030 гг. по сравнению с 1981-2000 гг.: а) годового и б) с мая по август. Отрицательные значения означают уменьшение увлажнения, а положительные – его рост. Области статистически значимых результатов показаны штриховкой.*

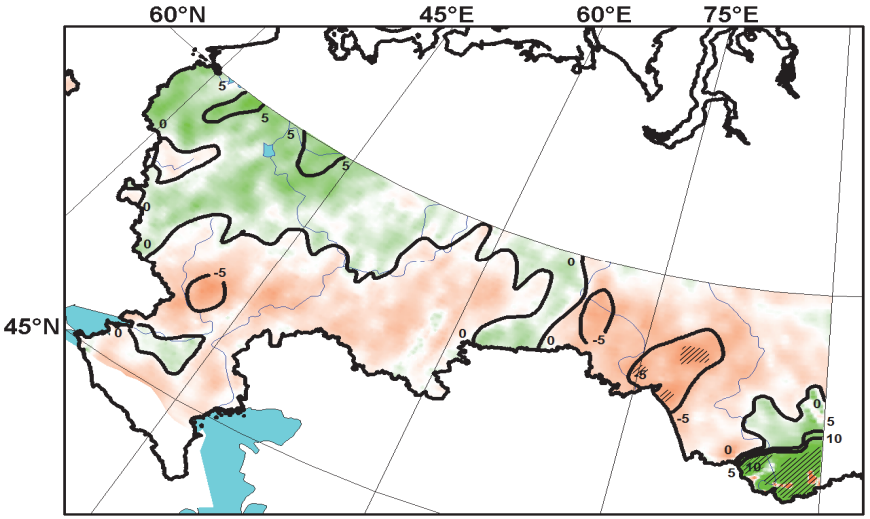

Рис. 3в.

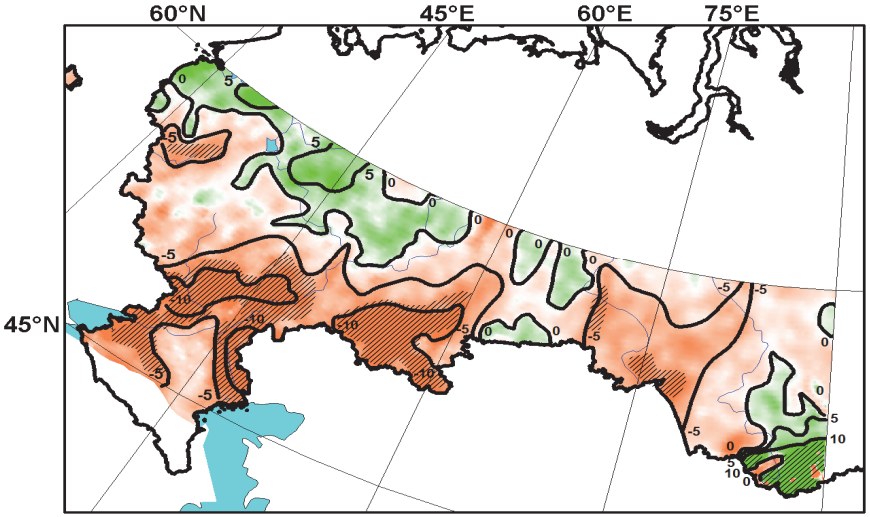

Рис. 3г.

Рис. 3 в,г. *Изменение увлажнения (%) по данным РКМ ГГО в период 2041-2060 гг. по сравнению с 1981-2000 гг.: в) годового и г) с мая по август. Отрицательные значения означают уменьшение увлажнения, а положительные – его рост. Области статистически значимых результатов показаны штриховкой.*

Заключение

Анализ результатов численного моделирования на региональной и глобальных климатических моделях позволяет сделать вывод о том, что в период 2011-2030 гг. по сравнению с 1981-2000 гг. ожидаются незначительные и статистически незначимые изменения годового и летнего увлажнения равнин России. К середине XXI века изменения увлажнения возрастут, практически на всей территории (согласно данным ансамбля МОЦАО) и на большей части территории (согласно данным РКМ ГГО) будет наблюдаться усиление засушливости, которое может превысить 10%. Особенно это касается юга европейской части России, где в летний сезон на обширной территории предполагается статистически значимое уменьшение увлажнения.

Сценарный прогноз изменений увлажнения равнин России к середине XXI века по данным ансамбля МОЦАО можно отнести к аридному типу. Согласно данным РКМ ГГО изменение увлажнения в первой половине XXI века будет проходить по смешанному аридно-гумидному сценарию, при котором увлажнение зернового пояса европейской части (в особенности летнее увлажнение) будет развиваться согласно аридной составляющей.

Полученные на основе анализа модельных расчетов результаты вполне согласуются с тенденцией изменения увлажнения равнин России в ближайшей перспективе, экстраполированной ранее по данным наблюдений. Формирующаяся в настоящее время тенденция к середине XXI-го века может стать устойчивой.

Благодарности

Автор благодарит профессора А.Н. Золотокрылина за консультации в процессе подготовки статьи и И.М. Школьника за предоставление данных РКМ ГГО. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОНЗ-13 РАН (Проект «Опустынивание засушливых земель юга России в контексте изменений климата»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Е.М. 2007. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы. ИВМ РАН. 155 с.

2. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. 2013. Тенденции увлажнения зернового пояса России в начале XXI века. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Том 25. (В печати).
3. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. 2014. Увлажнение засушливых земель европейской территории России: настоящее и будущее. Аридные экосистемы. (В печати).
4. Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. 2011. Связь изменений глобальной приповерхностной температуры с различными естественными и антропогенными факторами: оценки на основе данных наблюдений. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Том XXIV. С. 71-82.
5. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рекнер Э. 2008. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам. Доклады РАН. Т.419, №.5. С. 687-690.
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т. I. Изменения климата. –М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 227 с.
7. Попова В.В., Шмакин А.Б. 2010. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 46, № 2. С. 15-29.
8. Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. 2009. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария. Водные ресурсы. Т. 36, №6. С. 743-756.
9. Салугашвили Р.С. 2013. Дальние связи колебаний температуры воздуха Европейской территории России в конце XX – начале XXI века. Метеорология и гидрология. №1. С. 57-66.
10. Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. 2012. Геодинамические причины декадных изменений климата. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. № 348. С. 195-214.
11. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. 1974. Метеорологический словарь. –Л.: Гидрометеоиздат. 568 С.
12. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. 2010. Реакция границ зон увлажнения равнин России на изменения климата. Метеорология гидрология. №12. С. 17-25.
13. Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. 2009. Изменение увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в условиях глобального потепления. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Т. 22. С. 66-80.
14. Черенкова Е.А., Шумова Н.А. 2007. Испаряемость в количественных показателях климата. Аридные экосистемы. Том 13, № 33-34. С. 57-69.
15. Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н. 2012. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО. Метеорология и гидрология. № 2. С. 5-23.

16. Школьник И.М., В.П. Мелешко, В.М. Катцов. 2007. Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири. Метеорология и Гидрология. №6. С. 5-17.
17. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. 2006. Возможные изменения климата на европейской территории России и сопредельных территориях к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО. Метеорология и гидрология. №3. С. 5-16.
18. Latif M., Böning C.W., Willebrand J., Biastoch A., Alvarez-Garcia F., Keenlyside N., Pohlmann H. 2007. Decadal to Multidecadal Variability of the Atlantic Moc: Mechanisms and Predictability, in Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts – Past and Future Changes of Meridional Overturning (eds A. Schmittner, J. C. H. Chiang and S. R. Hemming). American Geophysical Union, Washington, D. C.
19. Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rev. V. 38, №1. P. 55-94.
20. Rienecker, M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A. et al. 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. J. Climate. 24. P. 3624-3648.
21. Schlesinger M.E. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. Nature. V. 367. P. 723-726.
22. Shkolnik I.M., Nadyozhina E.D., Pavlova T.V., Molkentin E.K., Semioshina A. A. 2010. Snow cover and permafrost evolution in Siberia as simulated by the MGO regional climate model in the 20 and 21 centuries. Environmental Research Letters. V. 5, №1. P. 1-8.
23. Xie P., Arkin P.A. 1998. Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing-longwave radiation. J. Climate. V. 11. P. 137–164.
24. WCRP Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5. 2011. Special Issue of the CLIVAR Exchanges Newsletter. No. 56. Vol. 15. No. 2.
25. World Atlas of Desertification. 1992. UNEP. London: Edward Arnold. 63 P.

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ АНСАМБЛЕВОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

В.А. Кокорев, О.А. Анисимов*

Россия, 199053 Санкт-Петербург, 2-ая Линия В.О., 23, Государственный гидрологический институт, *vasilykokorev@gmail.com

Реферат. Цель работы состоит в том, чтобы уменьшить неопределенность модельных оценок последствий изменений климата за счет компоненты, связанной с климатическими проекциями. Для этого территория России была разделена на 14 регионов, характеризуемых однородностью современных климатических изменений. Далее было проведено сравнение трендов нескольких климатических характеристик (сезонных и среднегодовой температуры воздуха, сумм положительных и отрицательных температур, сезонных и годовых сумм осадков и индекса сухости), рассчитанных по моделям семейства CMIP5 и CMIP3, с регионально-осредненными данными наблюдений за два периода 1976-2005 гг. и 1940-1969 гг.. Результаты сравнения были использованы для того, чтобы оценить качество расчетов по индивидуальным моделям CMIP5 и CMIP3, ранжировать их с учетом потребностей моделирования последствий изменений климата, и определить модели, обладающие наибольшей ошибкой в каждом из регионов. В итоге были построены несколько оптимизированных ансамблевых проекций, включающих результаты различного числа высокорейтинговых моделей, и проведено сравнение с ансамблем, состоящим из всех имеющихся моделей. Было показано, что рассчитанные по ансамблю всех моделей изменения температуры на территории России в XXI веке меньше, чем оценки, получаемые при помощи оптимальных ансамблей, из которых исключены модели, обладающие высокой региональной ошибкой.

Ключевые слова. Изменение климата, ансамблевая проекция.

CONSTRUCTING OPTIMAL ENSEMBLE CLIMATIC PROJECTION FOR CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSMENT IN RUSSIA

V.A. Kokorev, O.A. Anisimov*

State Hydrological Institute, 23, Second Line V.O., 199053 St. Petersburg, Russia.
*vasilykokorev@gmail.com

Abstract. The purpose of the study is to narrow the range of uncertainties in climate impact modeling through minimizing the component associated with climatic projections. To accomplish this goal the Russian territory was divided into 14 regions characterized by coherent modern temperature changes. We used data from CMIP5 and CMIP3 models to calculate trends of several climatic characteristics (seasonal and annual mean air temperature, cumulative positive and negative temperature sums, annual and seasonal precipitation and the dryness index), and we compared them with regional-mean observation data for two periods: 1976-2005 and 1940-1969. The results were used for evaluating the skills of individual CMIP5 and CMIP3 GCMs, for ranking them in specific context of regional impact modeling, and for the identification of the models with big errors in each region. Ultimately, we composed several ensembles comprised of different number of selected top-ranked GCMs and compared them with the ensemble consisting of all available models. Results indicate that in most regions the all-model ensemble underestimates the projected temperature changes in Russia for the XXI century in comparison to the optimal ensembles, from which the low-ranked models are eliminated.

Key words. Climate change, ensemble projection.

Введение

Многие современные исследования посвящены изучению последствий ожидаемых изменений климата. В их основе лежит моделирование природных и социально-экономических климатозависимых процессов и объектов (далее в статье называемое импактным моделированием) с применением климатических проекций, получаемых при помощи глобальных или региональных гидродинамических моделей. Обзор результатов таких исследований для России по состоянию на 2008 год дан в Оценочном докладе об

изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации (Оценочный доклад…, 2008). Открытым остается вопрос о неопределенности прогностических расчетов по импактным моделям и влияющих на нее факторах. Под неопределенностью здесь понимается диапазон, в который попадают оценки, получаемые в расчетах по различным импактным моделям с использованием климатических проекций. Актуальность этого вопроса обусловлена необходимостью принятия экономических и политических решений по адаптации к изменению климата в различных областях экономики. Эффективная упреждающая адаптация возможна лишь при условии, если неопределенность оценок соответствующих последствий не слишком велика. В противном случае могут быть приняты ошибочные стратегии, ущерб от которых превысит потери, связанные с самими климатическими воздействиями.

Неопределенность оценок последствий изменений климата обусловлена как погрешностями импактных моделей, так и различиями климатических проекций, применяемых в расчетах. Важно установить, какая из этих составляющих является определяющей. Для этого необходимо сравнить результаты, получаемые в расчетах по нескольким идентичным моделям с использованием одинаковых климатических проекций, с расчетами по каждой из моделей для различных проекций. Притом, что в настоящее время имеется широкий спектр моделей различной сложности для изучения многих климатозависимых процессов и объектов, сравнение их между собой за редким исключением не проводилось. Это является принципиальным отличием от ситуации с глобальными гидродинамическими моделями, для сравнения которых был организован специальный проект, известный по англоязычной аббревиатуре CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), который предусматривал проведение расчетов для заданных стандартизованных внешних условий. Результаты этого проекта будут рассмотрены далее в статье.

Несмотря на отсутствие аналогичных CMIP проектов для импактных моделей, можно, используя опубликованные данные, придти к выводу, что главным источником неопределенности получаемых с их помощью прогнозов являются климатические проекции, а не различия самих моделей, при условии, что сравниваются модели сопоставимого уровня детализации. Такой вывод был сделан в нашей предшествующей публикации на частном

примере моделирования ледников (Анисимов, Кокорев, 2013). В ней проводилось сравнение результатов расчетов динамики массы ледника Сторгласиарен в Швеции по двум моделям различной сложности с использованием шести климатических проекций на конец XX века. Было установлено, что различия оценок прогнозируемого сокращения массы ледника, обусловленные климатическими проекциями, достигают 40% (диапазон 50-90%), притом, что для фиксированной климатической проекции различия результатов по двум моделям не превышают 10%. В оценочном докладе о последствиях изменения климата в Арктике (Walsh et al., 2005) было проведено аналогичное сравнение нескольких моделей многолетнемерзлых грунтов с использованием пяти климатических проекций. Там также было установлено, что неопределенности расчетов, связанные с различиями моделей, много меньше неопределенности, обусловленной климатическими проекциями.

Целью данной работы является создание предпосылок для уменьшения неопределенности модельных оценок последствий изменений климата в регионах России за счет компоненты, связанной с климатическими проекциями. Для этого нами был разработан метод построения оптимальной проекции на основе ансамбля лучших гидродинамических моделей, отбираемых по региональным критериям. Этому предшествовал анализ эволюции гидродинамических моделей в процессе развития проекта CMIP с акцентом на то, как модели различных поколений описывают изменения климатических параметров и индексов, определяющих ключевые климатозависимые процессы в регионах России. Модели были ранжированы в отношении воспроизведения ими наблюдаемых изменений этих параметров, после чего лучшие модели были отобраны для построения оптимизированной ансамблевой климатической проекции. В заключительной части сравниваются построенная нами оптимальная проекция для России и ансамблевая проекция на основе всех моделей CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project − Phase 5), которая рекомендована Главной геофизической обсерваторией для использования при подготовке Второго оценочного доклада об изменении климата и его последствиях на территории России.

Организация расчетов по гидродинамическим моделям на разных фазах проекта CMIP

Проект CMIP был создан в 1995г. с целью предоставить широкому кругу специалистов расчёты по различным моделям со стандартизованными установками начальных и граничных условий и основных параметров, характеризующих изменение климатообразующих факторов (Meehl et al., 2005). Главным образом это было обусловлено необходимостью получения согласованных оценок для подготовки докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). В первой фазе CMIP были проведены расчёты по 18 гидродинамическим моделям с заданными значениями солнечной постоянной и атмосферной концентрации CO_2. Во второй фазе был добавлен расчёт с увеличивающейся концентрацией CO_2 на 1% в год, при этом другие антропогенные факторы не учитывались. На первых двух фазах CMIP данные по большинству параметров были представлены лишь для трех временных срезов в первой четверти, середине и конце 21 века, при этом ежемесячные данные были доступны лишь для ограниченного числа параметров (температура воздуха, осадки, давление). Вскоре стало ясно, что этого недостаточно, и была проведена дополнительная фаза CMIP 2+, целью которой было собрать данные расчетов уже проведённых экспериментов по более полному набору параметров. Только 12 модельных групп из 17 участвовавших в CMIP-2 предоставили такие данные (Meehl et al., 2005). Данные этой фазы вызвали большой интерес и стимулировали отдельные проекты, такие как воспроизведение климата 20 века (20C3M), воспроизведение палеоклимата (PMIP) и другие.

Существенным шагом вперед стала организация стандартизованных расчетов CMIP3 по 23 моделям (Meehl et al., 2007). В них были учтены множественные антропогенные факторы. Так, для этих расчетов было разработано несколько сценариев эмиссии парниковых газов, соответствующих различным путям дальнейшего развития мировой экономики (Nakicenovic et al., 2000). Продолжительность расчета зависела от конкретной модели, но все модели охватывали период с последней четверти 19 века до конца 21 века. Важно, что в итоге были рассчитаны среднемесячные значения большого числа параметров климата более чем за 200 лет, которые стали доступны широкому кругу пользователей через центры

распространения данных (например, http://www-pcmdi.llnl.gov/). Результаты CMIP3 составили основу Четвёртого оценочного доклада МГЭИК. В процессе подготовки этого доклада в очередной раз изменились представления о том, какие модельные эксперименты необходимы для анализа изменения климата в прошлом, настоящем и будущем, а также для оценки его последствий. Эти изменения нашли отражение в дизайне экспериментов пятой фазы CMIP, которые проводились по 39 гидродинамическим моделям, включая различные версии одних и тех же моделей (Taylor et al., 2011). В сравнении с CMIP3 улучшилось как качество самих моделей за счет использования более надежных параметризаций, так и полнота описания климатообразующих факторов, часто называемых форсингами (далее в статье для краткости используется этот термин). Несколько изменился подход к описанию сценариев будущих эмиссий парниковых газов (Meinshausen et al., 2011). Вместо принятых ранее стали использоваться сценарии, характеризуемые суммарной величиной дополнительного радиационного воздействия на климатическую систему. Помимо долгопериодных (для исторического периода 1850-2005 и прогностические с 2006 до конца 21 века), проводились декадные расчеты от заданных начальных условий, которые можно назвать исследовательскими. Их целью являлось изучение возможностей сезонного прогнозирования, и в данной статье они не рассматриваются.

Главный вопрос в связи с проектом CMIP состоит в том, имело ли место уменьшение неопределенности расчетов на последующих фазах по отношению к предыдущим, и если да, то было ли это обусловлено совершенствованием моделей, или же в большей степени результат был достигнут за счет улучшения описания форсингов. В работе (Reichler, Kim, 2008) авторы проводили сравнения расчётов по трём поколениям моделей по большому числу показателей для крупных регионов мира. Каждая модель сравнивалась с наблюдениями по 14 метеовеличинам за период 1979-1999 года, при этом использовалась сложная метрика, которая показывает сумму отклонений среднемноголетних величин в каждом узле модельной сетки, а также учитывает дисперсию. Полученные в этой работе результаты свидетельствуют о прогрессирующем улучшении качества моделей. Так, расчеты CMIP3 по всем метеовелечинам лучше, чем CMIP1, и почти всегда лучше, чем CMIP2. На основании этих результатов авторы делают вывод, что

улучшение воспроизведения климата достигается из-за развития моделей, а не за счёт уточнённых форсингов, которые, по их мнению, играют малую роль. Этот тезис можно поставить под сомнение, поскольку в CMIP3 в исторический период используются намного более точные форсинги, чем в предыдущих экспериментах.

В контексте задач, рассматриваемых в данной статье, наибольшее значение имеет оценка воспроизведения гидродинамическими моделями климатических параметров и индексов, определяющих ключевые климатозависимые процессы в регионах России. Подавляющее большинство импактных моделей используют для прогноза последствий изменений климата в качестве входных параметров лишь две переменные – приземную температуру воздуха и построенные на ее основе индексы (суммы температур холодного и теплого периодов и т.п.) и атмосферные осадки. В ряде работ были предприняты попытки оценить, насколько хорошо гидродинамические модели CMIP-3 описывают эти переменные на территории России. Первые выводы, которые были получены в работах (Груза, Ранькова, 2009; Груза и др., 2006), оказались обескураживающими. Авторы провели сравнение расчетов средних значений и изменений температуры воздуха и осадков с наблюдениями для 6 крупных регионов России и обнаружили очень большие различия. Несколько иной вывод о пригодности использования результатов CMIP-3 для описания климата России был получен в работах (Говоркова и др., 2008; Мелешко и др., 2008). Авторы использовали иные критерии, сравнивая расчеты в целом для территории России по ансамблю из 16 моделей с индивидуальными моделями. На основании того, что случайная погрешность ансамблевых расчетов оказалась меньше, чем у любой отдельно взятой модели, был сделан вывод, что ансамблевые проекции по моделям CMIP-3 можно использовать на территории России. Заметим, что собственно различия расчетов и наблюдений на региональном уровне в этих публикациях не рассматривались. Иные оценки неопределенности воспроизведения климата в регионах России, в том числе по моделям CMIP-5, до настоящего времени получены не были.

Исходя из результатов предшествующих работ, можно сделать вывод о необходимости тестирования моделей на региональном уровне, сравнивая с наблюдениями расчетные значения регионально осредненных трендов тех параметров и индексов, которые наиболее

важны для ключевых климатозависимых процессов. Следующим шагом является построение оптимального ансамбля, из которого исключаются модели с низким региональным рейтингом. Притом, что преимущества ансамблевого осреднения не вызывают сомнений, вопрос об отборе моделей для включения в ансамбль остается открытым и продолжает обсуждаться в научных публикациях (Бекряев, 2010; Генихович и др., 2010; Knutti, 2010). В нашей работе мы тестировали, сравнивая между собой и с наблюдениями, модели третьей и пятой фазы CMIP.

Ранжирование гидродинамических моделей по воспроизведению современных изменений климата и построение оптимального ансамбля

Для описания современных изменений климата был использован архив данных месячного разрешения о температуре воздуха и осадках по 744 станциям на территории России и стран бывшего СССР. Характеристики этого архива даны в нашей предшествующей публикации (Анисимов, Жильцова, 2012).

Расчеты по гидродинамическим моделям и наблюдения представляют собой принципиально различные виды площадных (относящихся к ячейкам модельной сетки) и точечных (метеостанции) данных. Для сравнения и те и другие необходимо осреднять по регионам, которые имеют достаточно большую площадь и репрезентативно отражают пространственные закономерности изменений климата. В четвёртом оценочном докладе МГЭИК утверждается, что глобальные модели удовлетворительно воспроизводят температуру воздуха в масштабах континента, однако, импактные модели, очевидно, требуют более детального разрешения. В публикации (Raisanen, Ylhaisi, 2011) авторы пришли к выводу, что для отдельно взятой модели оптимальный масштаб пространственного осреднения имеет порядок ~2000км. Такое осреднение минимизирует случайную составляющую расчетов, с одной стороны, но с другой – уничтожает важные пространственные детали. Оптимальным является осреднение по регионам, характеризуемым однородными климатическими изменениями. Создание такого районирования, показанного на рис. 1, являлось самостоятельной задачей, в процессе решения которой нами был проведен анализ пространственных закономерностей полей температуры воздуха и осадков. Используемые для этого методы и

полученные результаты, в том числе обоснование районирования на рис. 1, даны в наших предшествующих публикациях (Анисимов, Жильцова, 2012; Анисимов и др., 2011; Анисимов, Кокорев, 2013; Anisimov et al., 2013). Не повторяя этих работ, приведем лишь те положения, которые важны для тестирования моделей.

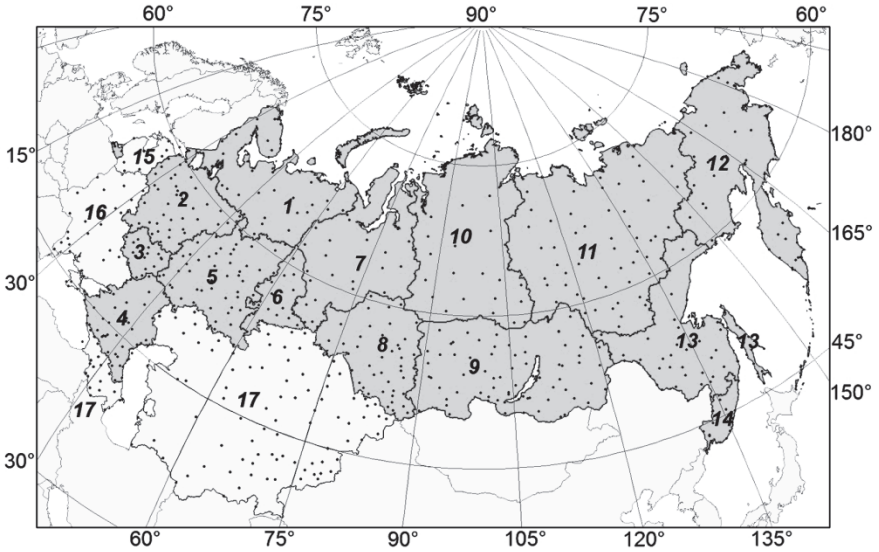

Рис. 1. *Разделение территории России на регионы, характеризуемые однородными изменениями температуры воздуха в современный период.*

Современные изменения климата имеют отчетливо прослеживаемые пространственные закономерности, которые необходимо учитывать при региональном осреднении. Созданное нами районирование не является единственно возможным. Альтернативы были рассмотрены в публикации (Анисимов, Жильцова, 2012). Районирование, показанное на рисунке 1, максимально приближено к административному делению России на Федеральные округи, но содержит больше территориальных единиц, поскольку в каждом из крупных округов (Северо-Западный, Центральный, Уральский, Сибирский, Дальневосточный) были

выделены несколько районов, характеризуемых однородностью современных изменений климата. Оно удовлетворяет главному требованию, согласно которому внутрирегиональные коэффициенты корреляции рядов температуры, рассчитанные для различных пар станций в пределах одного региона, должны быть заметно выше, чем межрегиональные. Для показанного на рис.1 районирования это требование выполняется как для сезонных, так и для среднегодовой температуры воздуха. Среднерегиональные коэффициенты корреляции соответствующих рядов наблюдений за период 1970-2012г. изменяются в пределах от 0,72 до 0,83 (Анисимов и др., 2011). Нами предпринимались попытки создать аналогичное районирование в отношении осадков, но этого сделать не удалось. Поскольку поле осадков не обладает свойством непрерывности, для них нельзя надежно оценить пространственную корреляционную функцию, на основе которой определяются границы регионов. С учетом этого мы сочли возможным проводить тестирование моделей по регионам, отражающим пространственно-временную структуру лишь поля температуры. Аргументом в пользу такого выбора является то, что осадки как статистически, так и по физике процессов связаны с температурным режимом. В контексте рассматриваемой в статье проблемы немаловажно, что изменения температуры напрямую определяются радиационным воздействием, в то время как осадки изменяются опосредованно, прежде всего через интенсивность зависящего от температуры гидрологического цикла и облачности.

Не менее важную роль, чем пространственное осреднение, в рассматриваемой задаче играет обоснованный выбор временного периода для сравнения моделей и наблюдений. Этот тезис был обоснован в публикациях (Анисимов и др., 2011; Anisimov et al., 2013). В его основе лежит представление об эпохах, характеризуемых общностью статистических характеристик климата. В каждом регионе время начала современной климатической эпохи можно определить, например, как год, после которого существенно меняется статистика температурного ряда, как правило, в сторону

увеличения тренда. В (Анисимов и др., 2011; Anisimov et al., 2013) с использованием количественных критериев было показано, что в большинстве регионов России начало современной климатической эпохи приходится на середину 1970-х годов. Приняв это во внимание, а также исходя из временных границ исторических расчетов по моделям CMIP, мы выбрали для сравнения период 1976-2005 гг. Недостатком является то, что данные за этот период широко использовались для отладки моделей на этапе разработки. В нескольких публикациях высказывалось мнение, что по этой причине его нежелательно использовать для тестирования (Annan, Hargreaves, 2010; Reichler, Kim, 2008). С учетом этого, мы, помимо указанного основного, использовали также и дополнительный предшествующий ему период сравнения. Это также позволило ответить на вопрос, является ли способность модели хорошо воспроизводить климат одного периода (современный) индикатором того, что она покажет неплохие результаты и в другой период (в прошлом или в будущем). Второй период 1940-1969 гг. был выбран так, чтобы он, во-первых, принадлежал к другой климатической эпохе; во-вторых, был бы обеспечен данными метеонаблюдений, и, в-третьих, был бы однороден, т.е. не содержал точек перехода от одной эпохи к другой.

Было проведено тестирование 21 модели CMIP-3 и 39 моделей CMIP-5, в процессе которого с данными наблюдений сравнивались рассчитанные тренды сезонной и среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков, а также следующих трех индексов, часто используемых в импактных моделях:

- ✓ сумма температур выше 0°C;
- ✓ сумма осадков холодного периода;
- ✓ индекс сухости, равный отношению суммы температур выше 0°C к годовому количеству осадков.

Сравнение проводилось следующим образом. По данным метеостанций были построены ряды аномалий исследуемых характеристик по отношению к норме 1961-1990 гг. По ним были

рассчитаны среднерегиональные ряды аномалий, при этом использовался разработанный нами метод осреднения с весами, пропорциональными ареалам метеостанции в каждом из регионов. Этот метод подробно изложен в наших предшествующих публикациях, где он применялся для анализа современных изменений климата на территории России (Анисимов, Жильцова, 2012; Анисимов и др., 2010; Анисимов и др., 2011; Анисимов и др., 2007). Под ареалом понимается территория, для всех точек которой данная станция является ближайшей. Весовое осреднение с учетом ареалов позволяет наилучшим образом использовать информацию в случае редкой и неоднородной сети наблюдений. Так, при расчете среднерегионального ряда учитываются не только станции данного региона, но и ближайшие на непосредственно примыкающей к нему территории, если хотя бы часть их ареала попадает в регион.

Аналогичным образом были построены среднерегиональные ряды аномалий по модельным данным. Были определены узлы сетки, попадающие в каждый из однородных регионов. Для них были построены ряды аномалий, полученные вычитанием из исходных модельных рядов температуры и осадков нормы за период 1961-1990 гг., которая рассчитывалась индивидуально для каждой модели по исходному ряду. Внутри каждого региона аномалии осреднялись по соответствующим узлам с весами, пропорциональными широте узла, и результат сравнивался с наблюдениями.

В таблице 1 приведены разности между трендами региональных аномалий среднегодовой температуры воздуха, рассчитанными по 39 моделям CMIP-5, и по данным наблюдений, которые далее будут называться ошибками моделей. Результаты сравнения трендов осадков показаны в таблице 2. В обеих таблицах числа в верхней и нижней частях ячеек обозначают результаты, соответственно, за дополнительный (1940-1969) и основной (1976-2005) периоды. Аналогичное сравнение было проведено и для других исследуемых характеристик, однако за неимением места результаты здесь не приводятся. По этой же причине не приведены результаты сравнения с наблюдениями 21 модели CMIP-3.

Таблица 1

Различия наблюдённого и модельного трендов среднегодовой температуры воздуха за периоды 1940-1969 гг. (верхнее число) и 1976-2005 гг. (нижнее число), °С/100 лет.

Модели	Регионы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ACCESS1.3	-0,1	1,3	-1,0	-1,9	-3,8	-4,4	-5,0	-0,4	-2,6	-3,2	1,7	2,8	-2,6	-2,9
	-2,1	-4,0	-5,4	-5,4	-2,9	-2,8	-1,0	-0,1	-2,7	-2,8	0,1	0,6	-1,7	-2,7
ACCESS1-0	3,0	-0,1	-0,6	-2,0	-2,3	-1,8	0,8	1,6	-0,8	0,7	3,8	-1,6	-1,3	-1,0
	2,6	2,2	1,7	1,1	2,9	0,4	1,1	0,2	-1,1	-1,1	0,0	2,3	-1,6	-0,7
bcc-csm1-1	-1,3	-0,8	-0,3	-1,4	-3,2	-1,9	-0,9	4,8	1,9	-0,8	4,7	5,3	0,3	-2,0
	7,3	3,7	2,7	-0,1	3,9	2,6	6,6	2,5	-1,4	2,8	1,5	-0,8	-0,6	-0,5
bcc-csm1-1-m	3,4	-0,4	-1,1	-2,5	-2,5	-1,9	-1,0	1,2	-1,8	-1,9	3,1	3,3	0,6	0,3
	-2,4	-1,0	0,6	-1,2	0,3	-2,4	-1,8	0,2	-2,3	-1,0	2,8	4,8	2,8	-1,6
BNU-ESM	2,3	-2,1	-3,4	-3,2	-4,5	-4,0	0,1	-0,8	-3,0	-0,9	0,3	0,3	-4,3	-3,9
	-4,0	-6,0	-3,1	-2,2	-1,7	-2,5	-1,2	3,3	1,7	-0,1	2,3	4,2	2,2	1,4
CanCM4	2,0	1,2	1,1	-0,4	-1,6	-1,7	-0,2	3,1	0,7	0,9	4,6	2,0	0,2	0,4
	2,8	0,2	-1,1	-2,3	0,7	-1,5	0,9	-1,7	-4,6	-2,4	-0,8	-0,4	-2,0	-3,6
CanESM2	-1,1	-0,3	-2,1	-2,8	-5,0	-6,0	-4,5	-2,3	-3,1	-2,0	1,7	-2,3	-3,5	-1,6
	0,7	-0,7	-2,4	-3,0	-0,5	-2,8	1,0	1,3	-0,6	-0,1	1,0	3,2	1,1	0,4
CESM1-CAM5	2,5	2,1	2,3	0,7	-2,4	-2,9	-2,0	1,8	0,2	-2,7	0,6	-3,0	-0,5	1,2
	-5,1	-1,0	1,1	-1,5	-0,5	-3,2	-5,0	-1,2	-2,2	-4,8	-2,3	-4,1	-3,8	-2,0
CESM1-FASTCHEM	2,1	-0,2	-1,3	-0,5	-2,1	-1,7	2,6	4,9	2,8	3,1	2,6	2,2	0,6	-0,1
	0,0	-0,3	-0,1	-0,8	2,1	0,0	3,1	0,8	-2,2	2,6	2,0	-1,4	-1,5	-3,8
CMCC-CESM	4,8	3,8	-1,4	-4,1	-2,2	-1,4	0,6	3,6	2,3	2,8	6,9	5,4	1,2	0,3
	-1,0	-2,6	-1,0	-1,7	-0,3	-2,5	-0,2	-1,2	-4,1	-1,7	-2,7	-4,1	-5,7	-5,2
CMCC-CM	1,5	-0,7	-0,5	0,0	-1,6	0,0	0,9	5,8	0,1	0,2	3,8	2,6	-0,5	-0,6
	2,3	2,3	1,7	-1,0	3,0	1,4	2,8	6,2	4,6	2,1	1,0	-3,5	0,6	3,9
CMCC-CMS	5,6	5,0	4,0	1,0	4,0	4,1	2,5	4,9	0,8	1,7	6,1	2,7	2,3	1,3
	-5,6	-1,1	0,1	-1,8	-0,8	-3,5	-4,2	1,6	-0,6	-4,3	-2,2	-2,2	-1,7	0,4
CNRM-CM5	-2,1	-4,1	-5,2	-6,1	-8,9	-8,8	-3,1	-1,0	-1,0	1,5	7,1	3,8	1,0	-1,4
	5,0	2,1	2,3	-1,0	3,8	2,1	6,4	5,1	2,1	5,6	4,2	6,5	2,0	1,0
CSIRO-Mk3-6-0	0,5	-0,6	-1,7	-4,5	-4,3	-2,8	-1,5	2,3	-0,2	-1,3	2,7	2,4	-1,0	-0,7
	-0,6	-1,6	-0,1	-1,5	-1,0	-2,9	1,3	1,6	-0,8	0,4	-0,6	-1,0	0,3	-1,1
EC-EARTH	3,3	4,3	4,7	2,2	1,0	-1,3	-1,2	2,9	-0,2	-0,1	3,4	0,2	-1,3	-0,3
	-1,7	-3,4	-3,5	-3,4	-2,4	-3,4	2,0	1,0	-0,3	2,1	0,7	0,4	2,2	-0,5
FIO-ESM	5,8	1,6	2,0	-0,2	-0,3	0,3	4,1	4,6	1,2	2,6	2,6	-4,4	-2,3	-0,1
	-3,6	-5,3	-5,3	-5,8	-3,1	-2,9	1,5	1,8	-1,2	1,4	0,0	-0,4	-2,4	-2,1
GFDL-CM3	0,1	1,1	1,0	-2,0	-2,4	-3,2	-5,8	-0,7	-2,6	-6,0	-2,3	-4,0	-2,9	0,1
	-6,5	-5,7	-2,7	-2,0	1,1	-0,6	-2,6	2,7	-2,6	-4,1	-3,2	3,8	-1,6	-3,4

Окончание таблицы 1

GFDL-ESM2G	-1,6	-2,3	-1,7	-2,0	-2,8	-2,0	-2,0	1,8	-1,0	-0,8	1,9	-2,4	-1,8	-0,7
	1,6	-0,1	-0,7	-0,8	2,8	1,6	3,5	2,4	-0,7	2,1	3,6	7,2	1,6	-1,4
GFDL-ESM2M	2,9	0,0	-0,9	-0,9	-1,1	-0,7	0,8	4,9	1,8	1,5	6,9	3,8	2,2	0,5
	-5,8	-6,9	-4,3	-3,0	-5,4	-7,9	-1,9	-1,0	0,0	-0,5	-0,2	-2,0	-0,7	-0,6
GISS-E2-H	2,3	1,8	2,6	0,9	-0,3	-0,4	1,7	5,1	1,7	2,6	5,8	4,6	-0,6	1,4
	3,1	1,9	0,6	-2,4	1,6	-0,2	1,1	-1,0	-3,6	-1,0	-0,1	-1,5	0,1	0,0
GISS-E2-R	3,8	2,3	3,2	-0,1	1,8	2,2	4,8	5,5	2,1	6,2	7,3	4,1	0,9	-0,3
	-0,7	-1,3	-1,8	-2,8	0,0	-1,6	0,9	2,4	-1,0	1,3	1,7	0,6	-0,6	-1,8
HadCM3	-3,6	-1,6	0,8	-0,6	-1,3	-1,3	-3,4	3,6	0,7	-1,2	4,0	-1,4	-2,8	0,1
	3,0	1,4	1,6	-1,4	2,4	0,1	0,9	1,3	-2,3	-1,3	4,2	2,4	1,0	1,2
HadGEM2-AO	-4,2	-7,3	-7,6	-6,4	-9,9	-8,5	-4,9	-3,9	-4,7	-4,5	1,4	-1,3	-3,3	-6,6
	1,3	4,9	5,6	0,8	4,8	1,9	3,9	6,4	2,1	4,6	3,5	0,9	0,7	-1,8
HadGEM2-CC	-0,6	-1,2	-0,5	-1,0	-2,5	-1,4	-0,3	3,0	0,6	1,9	6,1	0,7	2,6	0,8
	-0,3	-4,3	-5,9	-6,9	-3,9	-2,9	2,3	0,0	-2,4	-0,1	1,1	2,1	0,8	-1,3
HadGEM2-ES	2,5	-0,2	-1,8	-2,6	-2,4	-1,7	-1,1	-0,9	-3,4	-2,1	2,4	-1,3	-2,7	-3,1
	1,8	-0,4	-1,9	-3,5	-1,2	-2,5	1,4	2,7	1,1	1,7	4,0	3,7	2,4	0,1
inmcm4	3,8	2,1	0,3	-0,9	-0,3	0,5	3,9	5,7	1,7	4,7	5,9	5,8	0,4	0,8
	-5,6	-6,0	-4,9	-5,2	-3,8	-4,9	-2,4	-2,3	-4,7	-3,7	-3,9	-4,2	-4,5	-3,3
IPSL-CM5A-LR	-0,8	-2,9	-4,7	-4,2	-5,3	-4,0	-3,1	1,4	-1,2	-2,9	3,5	1,0	1,2	-0,7
	-1,6	-1,1	-1,4	-2,1	1,0	0,3	-0,3	3,5	0,6	-1,8	0,1	-0,1	1,0	-0,1
IPSL-CM5A-MR	-1,2	-0,2	0,4	-1,5	-5,1	-6,5	-5,7	-0,7	0,4	-1,5	5,1	2,6	0,0	0,1
	1,5	6,0	0,8	-0,3	2,3	0,8	3,3	2,8	-0,4	2,2	0,5	-0,8	-1,9	-1,8
IPSL-CM5B-LR	-1,6	-1,4	-0,1	-1,0	-3,1	-4,2	-5,7	0,9	-1,4	-2,8	4,7	2,0	0,8	0,5
	0,8	-3,9	-8,0	-7,8	-4,3	-5,1	-1,1	-5,2	-6,5	-4,7	-4,4	-3,3	-4,0	-3,6
MIROC4h	1,0	2,8	3,1	-0,4	-1,7	-4,7	-4,6	0,3	0,3	-3,0	4,1	1,5	0,1	-0,2
	-3,5	-3,0	-3,1	-4,7	-1,4	-2,8	-2,3	1,1	-1,1	-2,3	-0,4	-0,4	-2,7	-2,4
MIROC-ESM	-2,3	-5,8	-5,3	-3,4	-7,4	-7,7	-4,4	-2,1	-3,3	-3,7	1,2	1,9	-1,4	-1,4
	-3,3	-2,6	-2,0	-1,5	-2,2	-4,1	-1,7	-0,6	-0,7	-1,8	-0,9	0,0	-0,5	-1,8
MIROC-ESM-CHEM	-0,7	-1,0	0,5	-1,0	-4,1	-5,8	-2,1	-1,8	-2,2	0,8	3,1	-0,9	-3,3	-2,9
	0,5	-2,0	-2,6	-1,6	-1,6	-2,7	1,5	1,0	-3,6	-1,0	-1,8	-1,2	-2,5	-2,5
MPI-ESM-LR	-0,9	-0,5	-0,7	-0,7	-3,3	-3,2	-2,2	3,9	3,1	-0,4	5,1	4,1	0,4	0,2
	-8,0	-6,0	-4,0	-4,6	-3,5	-4,9	-4,0	-1,0	-3,5	-4,6	-0,9	-0,2	-0,4	-0,8
MPI-ESM-MR	9,2	7,1	6,0	2,0	2,0	0,9	5,0	6,5	5,2	7,3	9,7	4,6	4,2	3,6
	-0,3	1,4	1,7	-1,5	1,5	-0,6	0,4	1,4	-1,4	-1,0	0,9	2,3	-2,5	-2,8
MPI-ESM-P	3,0	0,2	-1,6	-5,1	-6,4	-6,6	1,2	2,6	2,0	4,5	5,4	4,9	-0,5	1,3
	-2,0	-0,9	0,8	-1,7	0,2	-1,0	1,3	3,6	1,1	1,4	0,1	-1,5	-2,2	-0,2
MRI-CGCM3	6,7	3,8	2,8	-1,6	-0,6	-1,4	2,1	3,2	1,6	4,2	7,9	6,6	2,9	1,2
	-5,7	-7,5	-8,7	-8,2	-6,9	-6,7	-5,0	-4,1	-5,3	-4,7	-3,0	-1,6	-4,1	-5,2
NorESM1-M	4,0	0,2	-2,6	-4,1	-5,8	-6,9	-3,1	-2,9	-2,9	-1,4	2,9	-0,8	-0,4	0,0
	2,4	2,3	-0,4	-3,4	2,0	0,1	1,7	2,8	1,0	-0,5	-0,3	3,6	0,1	1,4
NorESM1-ME	9,4	6,4	3,7	-0,9	1,8	1,4	7,1	5,7	3,0	7,3	7,8	4,0	2,3	2,9
	0,7	-2,4	-2,9	-3,6	-1,4	-2,9	0,2	-1,0	-4,6	-5,0	-6,8	-4,1	-5,3	-2,0

Таблица 2

Различия наблюдённого и модельного трендов годовой суммы осадков за два периода 1940-1969 гг. (верхнее число) и 1976-2005 гг. (нижнее число), мм/10лет.

Модели	Регионы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ACCESS1.3	-29	35	23	11	28	46	-27	16	19	-36	-16	-22	-12	-43
	12	-44	10	-9	-3	-12	-2	-15	-7	-5	1	2	13	4
ACCESS1-0	-17	-18	-6	-5	-27	-6	0	-6	16	-5	-13	-32	-34	-3
	-8	-11	11	-21	9	-14	3	12	8	-5	-2	16	12	-23
bcc-csm1-1	-17	-33	-15	-6	-15	6	6	-21	0	-1	-4	-25	-36	-44
	5	58	11	-36	6	-20	-7	-5	-6	-1	-6	10	4	-9
bcc-csm1-1-m	-7	-20	-26	-18	-25	10	-9	-6	23	3	12	-17	-23	-23
	2	42	11	-15	20	2	8	-4	-5	-4	3	26	22	16
BNU-ESM	-38	-29	4	9	-33	2	-14	-8	23	-14	-13	-30	-34	-29
	-8	-4	11	-32	10	-23	-15	-18	-10	-7	10	33	-2	-23
CanCM4	-51	-77	-202	-31	-143	-123	-99	-37	94	-80	-45	66	87	31
	10	59	37	-11	2	-27	-13	3	9	-10	-4	13	29	20
CanESM2	-30	-27	-3	-10	-16	3	-11	-13	10	-13	-8	-53	-3	-17
	-22	26	2	-22	7	-9	-12	1	-7	-6	16	36	21	-30
CESM1-CAM5	-11	15	7	-27	-13	8	7	-19	12	2	6	-32	-10	-73
	4	-20	-20	-20	14	7	1	0	-11	-14	-8	10	22	-20
CESM1-FASTCHEM	-26	7	0	-16	14	31	3	1	21	1	-6	4	-35	-64
	0	37	17	-39	7	0	-7	-27	-12	-5	-2	-10	-6	-13
CMCC-CESM	-20	-12	6	0	7	22	-6	3	12	-1	3	-15	-31	-45
	-14	15	55	-10	20	-28	3	-13	4	-8	-10	0	14	4
CMCC-CM	-16	-12	-21	-28	1	24	15	-35	4	-1	4	-34	-13	-45
	20	40	27	-11	35	24	22	32	10	8	-11	3	2	0
CMCC-CMS	-25	6	-4	-6	-3	22	-10	-27	10	7	9	-33	-2	2
	-4	8	-1	-24	20	28	7	12	6	-7	7	12	21	-7
CNRM-CM5	-54	-25	-14	-1	24	43	-11	-10	9	-7	0	-25	-32	-60
	13	32	15	-30	10	-5	7	-20	-6	-3	2	39	9	-30
CSIRO-Mk3-6-0	-19	-25	-44	-20	-15	4	-12	-17	8	-10	8	-28	-28	-42
	13	36	20	-39	26	1	2	-1	-8	-14	-3	17	10	20
EC-EARTH	-22	-33	-18	-23	-1	36	2	15	11	-4	-6	-26	-24	-41
	8	20	18	-24	35	23	6	7	-4	-12	-3	23	19	0
FIO-ESM	-21	4	-22	-7	-25	9	-4	-18	22	5	-10	-33	-20	11
	-21	4	24	-16	24	7	6	5	1	6	-4	4	7	-32
GFDL-CM3	-27	-24	-21	-34	-31	-13	-14	-16	8	-10	1	-40	-30	-62
	-11	23	25	0	-10	-25	-19	-10	11	-13	3	33	-6	-26
GFDL-ESM2G	-46	24	46	10	5	10	-17	-10	21	-3	-2	-33	-26	-2
	11	70	36	-18	22	-17	-2	16	-7	-2	9	45	16	-31

Окончание таблицы 2

GFDL-ESM2M	-30	-28	25	0	-5	30	1	-7	29	-2	9	-17	-30	-16
	14	108	23	-49	57	46	11	33	11	4	-2	20	-7	-36
GISS-E2-H	-39	-61	0	28	0	11	3	-7	14	-5	-7	-23	-38	-54
	1	61	27	-17	-12	-32	-16	-34	-6	-3	1	13	8	-23
GISS-E2-H-CC	-17	22	-9	-43	1	32	8	8	26	3	-6	-42	-21	-45
	12	-26	-2	-51	14	-15	9	-18	-8	16	5	28	10	-48
GISS-E2-R	-14	-6	-27	10	-3	3	-6	-39	12	13	8	-15	-33	-63
	10	38	21	-25	36	7	17	-5	-10	5	-2	8	28	-21
HadCM3	-20	0	-14	-13	-3	16	-7	-4	29	-12	-6	-30	-23	6
	-7	-6	-5	-38	-15	-39	-13	-23	-8	8	2	4	19	-1
HadGEM2-AO	-31	-43	-9	-9	-35	-16	-29	-59	-6	-16	-4	-35	-43	-15
	22	11	1	-28	11	-3	26	17	-3	2	-11	16	28	28
HadGEM2-CC	-22	-22	-3	-20	-17	4	-9	-23	26	-14	-1	-24	-12	-17
	15	-13	3	-30	6	-9	-7	7	13	-5	-6	16	16	-8
HadGEM2-ES	-23	-48	-37	-40	-35	-16	-19	-29	10	-16	-11	-32	-33	-20
	3	7	-7	-3	13	14	-9	2	-6	6	15	36	15	-42
inmcm4	-26	-6	20	3	15	47	14	6	27	-12	2	7	-14	16
	12	8	12	-15	15	-3	-5	-17	-20	-20	-7	20	10	-41
IPSL-CM5A-LR	-27	-47	-25	-18	-10	-2	-9	-20	0	-2	1	-42	-1	25
	-8	61	35	-31	20	4	3	-3	11	-7	-8	19	7	-26
IPSL-CM5A-MR	-36	-17	-28	-23	-8	42	1	27	29	-4	0	-48	-31	-15
	-1	66	41	-35	23	0	-13	-20	-18	-12	-8	2	7	37
IPSL-CM5B-LR	-20	-47	-11	-18	-22	12	1	-6	12	-10	-4	-40	-28	-9
	-16	16	51	1	6	-7	-20	-30	-12	-17	-3	30	14	-13
MIROC4h	-27	-6	-24	19	6	41	2	-2	9	14	11	-47	8	-34
	-22	52	50	14	34	0	4	15	-5	7	-9	8	10	-33
MIROC-ESM	-45	-12	38	1	4	8	-22	-26	15	-13	-5	-10	-7	-10
	18	17	3	-35	-2	3	10	14	-16	-6	-5	19	15	-14
MIROC-ESM-CHEM	-28	-6	-56	-61	-32	-3	-4	-22	14	-16	-14	-28	-39	-6
	-1	0	7	-32	31	27	-5	-13	-8	-19	-1	19	11	-21
MPI-ESM-LR	-23	17	35	5	15	34	-2	3	23	11	10	-35	-47	-15
	11	28	-31	-30	-4	-18	9	-18	-17	-3	3	41	12	-38
MPI-ESM-MR	-5	-9	-57	-40	-13	12	21	-4	16	21	10	-3	-21	-56
	22	48	3	-41	11	2	12	-2	10	-4	-14	25	6	-15
MPI-ESM-P	-40	-48	-31	10	-5	56	-2	-14	5	-17	10	4	-10	-16
	6	88	-5	-32	24	1	4	0	-1	-10	-17	18	30	-7
MRI-CGCM3	-25	-25	-54	-37	-15	13	-4	-4	16	-5	5	-6	-28	17
	-21	-12	16	-27	-2	-13	-15	-11	-7	-14	-5	11	13	-44
NorESM1-M	-26	-40	-38	-28	-18	5	-13	-13	5	-14	-3	-9	-19	-30
	20	26	-3	-25	16	-10	-1	-10	-6	0	5	19	43	-15
NorESM1-ME	-18	2	0	-13	-20	2	-4	-13	14	3	3	-20	-32	-27
	-1	38	21	-18	-7	-33	-26	-23	-8	-17	-4	24	15	-28

На рисунке 2 показаны осредненные по всем регионам ошибки расчета среднегодовой температуры воздуха (рис. 2А) и годовой суммы осадков (рис. 2Б) по моделям CMIP-5 для двух рассматриваемых периодов.

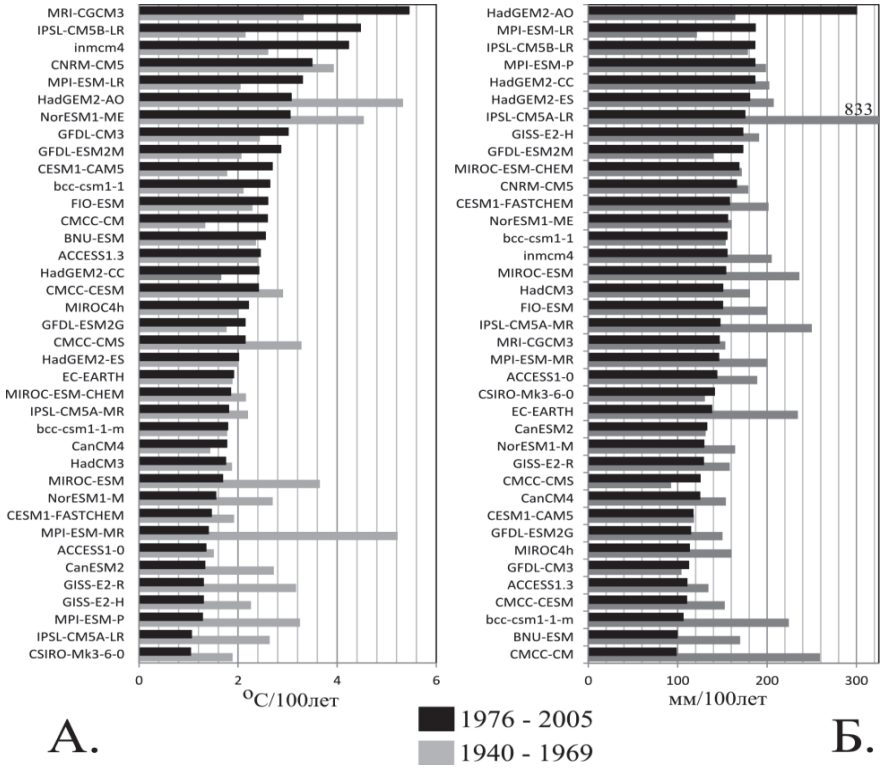

Рис. 2. *Средняя ошибка воспроизведения тренда температуры воздуха (А) и годовой суммы осадков (Б) за два периода.*

Видно, что модели по-разному воспроизводят тренды температуры на территории России, при этом можно выделить некоторые закономерности. Так, большая часть моделей, показывающих лучшие результаты в ранний период, также демонстрируют результаты лучше среднего и в современный период. Заслуживает внимание то, что в современный период модели, занимающие первые 10-15 позиций рейтинга, определяемого величиной отклонения от наблюдений, имеют близкие значения

средней ошибки. Модели, занимающие последние строчки рейтинга в один из периодов, как правило, не показывают хороших результатов и в другой период. Если же модель удовлетворительно воспроизводит температуру только за один период, то можно предположить, что такой результат достигнут либо случайно, либо обусловлен подстройкой на стадии разработки. Возможно и то, что за время между двумя периодами изменились ключевые факторы, ответственные за формирование климата данного региона, что сказалось на точности его модельного воспроизведения.

Данные об ошибках расчета трендов температуры воздуха, показанные на рисунке 2А, были использованы для того, чтобы сформировать два оптимизированных ансамбля. В первый вошли 8 моделей со средней по всем регионам и за оба периода ошибкой тренда меньше 2°С/100 лет, во вторую – 26 моделей со средней ошибкой меньше 3°С/100 лет на сто лет. В таблице 3 приведены прогнозируемые значения среднемноголетних аномалий сезонных и среднегодовой температур воздуха по этим ансамблям, а также по ансамблю из всех моделей, рассчитанные с использованием сценария RCP8.5. Для сопоставимости с данными, рекомендованными ГГО для подготовки Второго оценочного отчета об изменении климата на территории России, результаты осреднялись за два 20-летних периода в первой четверти (2011-2030гг.) и в середине (2041-2060гг.) 21 века. Сравнивая данные различных ансамблей, можно отметить следующие закономерности. Прогнозируемые аномалии среднегодовых температур во всех ансамблях различаются незначительно и много меньше, чем сезонные, в особенности за весенний период. В большинстве регионов наибольшие изменения среднегодовой температуры дает ансамбль из 26 моделей, а наименьшие – ансамбль из 8 моделей, различия в отдельных регионах достигают 0,4°С, притом, что в других оценки практически совпадают. Следует принимать во внимание, что все результаты осреднялись за 20 лет, в то время как в большинстве предшествующих работ использовался 30-летний период осреднения. Из-за этого в полученных оценках может содержаться заметная компонента, отражающая межгодовую изменчивость. Она может сказываться на результате для первого периода, поскольку ее величина сопоставима с полезным сигналом. По мере увеличения заблаговременности прогноза это влияние уменьшается. Подробнее этот вопрос обсуждается в дискуссии.

Таблица 3

Аномалии температуры воздуха относительно нормы 1961-1990 года для регионов России по трём различным ансамблям по сценарию RCP8.5

Регионы			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ансамбль 8 моделей	2011-2030	Зима	2,6	2,4	2,6	2,2	2,5	2,4	2,5	2,4	2,2	2,6	2,4	2,9	2,3	1,9
		Весна	1,8	1,8	1,9	1,6	2,0	2,0	1,9	1,9	1,5	1,9	1,7	1,9	1,2	1,2
		Лето	1,5	1,6	1,7	1,8	1,7	1,6	1,5	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
		Осень	2,2	1,6	1,5	1,4	1,8	1,9	2,7	2,2	2,1	3,0	2,5	2,4	1,8	1,5
		Год	2,0	1,9	1,9	1,8	2,0	2,0	2,2	2,1	1,8	2,2	2,0	2,1	1,6	1,4
	2041-2060	Зима	5,3	4,4	4,2	3,4	4,3	4,1	4,9	4,1	3,8	4,8	4,6	5,6	4,2	3,8
		Весна	3,8	3,6	3,7	3,2	3,8	3,5	3,6	3,1	2,5	3,3	3,0	3,4	2,5	2,6
		Лето	2,8	2,9	3,1	3,4	3,1	3,2	3,1	3,4	3,0	2,9	2,6	2,6	2,6	2,8
		Осень	4,2	3,2	3,0	2,9	3,3	3,6	4,8	3,9	3,9	5,3	4,7	4,4	3,5	3,2
		Год	4,0	3,5	3,5	3,2	3,6	3,6	4,1	3,6	3,3	4,1	3,7	4,0	3,2	3,1
Ансамбль 26 моделей	2011-2030	Зима	2,8	2,5	2,4	1,8	2,6	2,6	2,9	2,5	2,2	2,8	2,5	2,8	2,2	1,8
		Весна	2,1	2,0	1,9	1,6	2,1	2,1	2,2	2,1	1,7	2,2	2,1	2,1	1,6	1,4
		Лето	1,7	1,8	1,9	2,0	1,8	1,8	1,7	1,8	1,6	1,6	1,5	1,7	1,4	1,4
		Осень	2,3	1,7	1,6	1,5	1,7	1,9	2,7	2,1	2,1	3,0	2,7	2,6	1,9	1,6
		Год	2,2	2,0	2,0	1,7	2,1	2,1	2,4	2,1	1,9	2,4	2,2	2,3	1,8	1,5
	2041-2060	Зима	5,7	4,7	4,4	3,3	4,7	4,7	5,7	4,6	4,0	5,6	5,2	6,1	4,6	3,8
		Весна	4,1	3,8	3,6	3,1	4,0	3,9	4,1	3,9	3,2	4,0	4,0	4,0	3,2	2,9
		Лето	3,2	3,2	3,6	3,8	3,4	3,5	3,6	3,6	3,3	3,5	3,2	3,4	3,0	3,0
		Осень	4,4	3,6	3,3	3,2	3,7	3,9	5,1	4,0	4,0	5,7	5,3	5,0	3,9	3,4
		Год	4,4	3,8	3,7	3,4	4,0	4,0	4,6	4,0	3,6	4,7	4,4	4,6	3,7	3,3
Все модели	2011-2030	Зима	2,7	2,4	2,4	1,8	2,5	2,5	2,8	2,3	2,0	2,6	2,3	2,7	2,1	1,6
		Весна	2,0	1,9	1,8	1,5	1,9	1,9	2,0	1,9	1,6	2,0	1,9	1,9	1,5	1,3
		Лето	1,6	1,7	1,8	1,9	1,7	1,6	1,6	1,7	1,5	1,5	1,4	1,6	1,3	1,3
		Осень	2,2	1,6	1,5	1,5	1,7	1,8	2,5	1,9	1,9	2,8	2,5	2,4	1,7	1,5

Окончание таблицы 3

		Год	2,1	1,9	1,9	1,7	2,0	2,0	2,2	1,9	1,7	2,2	2,0	2,2	1,7	1,4
	2041-2060	Зима	5,6	4,6	4,3	3,2	4,6	4,6	5,5	4,4	3,8	5,4	5,0	5,8	4,3	3,6
		Весна	3,9	3,6	3,4	2,9	3,7	3,7	3,9	3,6	3,0	3,9	3,8	3,8	3,1	2,7
		Лето	3,1	3,2	3,5	3,7	3,3	3,3	3,4	3,4	3,1	3,3	3,0	3,3	2,9	2,8
		Осень	4,3	3,4	3,2	3,1	3,5	3,7	4,9	3,8	3,8	5,5	5,1	4,8	3,7	3,3
		Год	4,2	3,7	3,6	3,2	3,8	3,8	4,4	3,8	3,4	4,5	4,2	4,4	3,5	3,1

Дискуссия

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов о качестве воспроизведения и прогноза гидродинамическими моделями рассмотренных в работе климатических характеристик в регионах России.

Не все модели сохраняют способность удовлетворительно воспроизводить климат исследуемых регионов в различные интервалы времени, причем точность воспроизведения уменьшается по мере удаления в прошлое. Ансамбль из моделей, хорошо воспроизводящих климат периода 1940-1969 гг., и в современном периоде работает лучше ансамбля всех моделей. Данные CMIP5 показывают заметное улучшение воспроизведения осадков по сравнению с CMIP3. Часть моделей, показывающих лучшие результаты в воспроизведении осадков, также хорошо воспроизводят температуру. Исходя из этого, можно предложить алгоритм составления оптимизированного ансамбля, состоящий в исключении моделей, воспроизводящих температурные параметры в различные периоды прошлого с наибольшими ошибками, ранжировании оставшихся моделей по качеству воспроизведения осадков и объединении лучших в ансамбль.

Главным вопросом является уменьшение неопределенности прогноза будущих последствий изменений климата за счет ее компоненты, связанной с модельными проекциями. Анализ того, насколько это осуществимо при различной заблаговременности прогнозов, дан в работе (Hawkins, Sutton, 2009). Авторы показывают, что межгодовая изменчивость значительно превышает ожидаемую величину изменений в первые десять лет прогноза, что делает его крайне неопределённым, принимая во внимание сложность точного задания начальных условий. Заметим, что, по-видимому, это нашло отражение и в полученных нами результатах прогноза на 2011-

2030гг. В (Frame, Stone, 2012) было показано незначительное влияние выбора сценария эмиссии на временном промежутке до 20 лет, после чего обусловленная этим неопределенность начинает расти, и на временном интервале более 50 лет эта компонента становится доминирующей. При этом компонент неопределённости, связанный с ошибкой самих моделей остаётся примерно одинаковым, а относительная ошибка постепенно уменьшается по мере роста ожидаемого значения изменений. Из этого следует, что наиболее информативной является климатическая проекция на период 20-50 лет, поскольку при этом суммарная неопределённость, обусловленная всеми факторами, минимальна.

Не следует забывать, что, помимо осредненной по ансамблю, целесообразно рассматривать и проекции по отдельным составляющим ансамбль моделям, каждая из которых описывает возможную траекторию развития климатической системы. Некоторые исследователи сосредотачивают усилия на переводе результатов модельных расчётов в термины вероятности, при этом вероятность какого-либо будущего состояния климатической системы определяется количеством моделей или расчётов, в которых оно реализуется. Нам представляется, что современный уровень развития моделей едва ли позволяет рассчитывать с достаточной надежностью вероятностную функцию распределения состояний будущего климата. Неоправданно приписывать им различные вероятности на основании арифметического подсчета числа моделей, прогнозирующих соответствующие условия. На наш взгляд более оправдано использовать оптимально отобранные модели, рассматривая их ансамблевое осреднение как наиболее вероятную проекцию, а межмодельный разброс внутри ансамбля – как интервал неопределенности в пределах которого равновероятны все возможные траектории развития климата.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 13-05-00072 и 13-05-91171-ГФЕН_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. 2012. Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений. Метеорология и гидрология. № 6. С. 95-107.

2. Анисимов, О.А., Жильцова Е.Л., О.К. Захарова. 2010. Анализ и прогноз пространственных закономерностей полей температуры воздуха и осадков с учетом атмосферной циркуляции: применение в экосистемном моделировании. Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Т. 23. – М.: ИГКЭ. С. 22-37.
3. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Кокорев В.А. 2011. Пространственные и временные закономерности динамики температуры воздуха на территории России в 20 – начале 21 века. Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Т. 24. –М.: ИГКЭ. С. 83-98.
4. Анисимов О.А., Кокорев В.А. 2013. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу. Лед и Снег. № 1. С. 83-92.
5. Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. 2007. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века. Метеорология и гидрология. № 10. С. 20-30.
6. Бекряев Р.В. 2010. Дискриминация климатических моделей. Вероятностный подход. Труды главной геофизической обсерватории. Катцов В.М., Мелешко В.П. (ред.). –С.-Пб. С. 47-67.
7. Генихович Е.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. 2010. О комплексировании климатических моделей. Труды главной геофизической обсерватории. Катцов В. М., Мелешко В. П. (ред.). –С.-Пб. С. 28-46.
8. Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М. 2008. Оценка пригодности моделей общей цииркуляции атмосферы и океана CMIP3 для расчетов будущих изменений климата России. Метеорология и гидрология. № 8. С. 5-20.
9. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2009. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации. Метеорология и гидрология. № 11. С. 5-29.
10. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Аристова Л.Н., Клещенко Л.К. 2006. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России. Метеорология и гидрология. № 10. С. 5-23.
11. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е. 2008. Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3. Метеорология и гидрология. № 9. С. 5-22.
12. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет. 288 С.
13. Anisimov O.A., Kokorev V.A., Ziltcova E.L. 2013. Temporal and Spatial Patterns of Modern Climatic Warming: Case Study of Northern Eurasia. Climate Change. doi: 10.1007/s10584-013-0697-4
14. Annan J.D., Hargreaves J.C. 2010. Reliability of the CMIP3 ensemble. Geophysical Research Letters. 2010. P. 1-5.
15. CMIP3 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI. www-pcmdi.llnl.gov
16. Frame D.J., Stone D.A. 2012. Assessment of the first consensus prediction on climate change. Nature Climate Change. №3. P. 357-359. doi:10.1038/nclimate1763

17. Hawkins E., Sutton R. 2009. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. Bulletin of the American Meteorological Society. № 8. P. 1095-1107.
18. Knutti R. 2010. The end of model democracy? Climatic Change. №102. P. 395-404. doi: 10.1007/s10584-010-9800-2
19. Meehl G.A., Covey C., McAvaney B., Latif M., Stouffer R.J. 2005. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. Bulletin of the American Meteorological Society. № 1. P. 89-93.
20. Meehl G.A., Covey C., Taylor K.E., Delworth T., Stouffer R.J., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F. B. 2007. THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. Bulletin of the American Meteorological Society. № 88. P. 1383-1394. doi: 10.1175/BAMS-88-9-1383
21. Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., Vuuren D.P.P. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic Change. №. 1. P. 213-241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z
22. Nakicenovic N., Swart R. et al. (Eds.) 2000. Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge and New York. 599 P.
23. Raisanen J., Ylhaisi J.S. 2011. How Much Should Climate Model Output Be Smoothed in Space? Journal of Climate. № 3. P. 867-880. doi: 10.1175/2010JCLI3872.1
24. Reichler T., Kim J. 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? Bulletin of the American Meteorological Society. № 3. P. 303-311. doi:10.1175/BAMS-89-3-303
25. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society. №93. P.485-498. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
26. Walsh J.E., Anisimov O., Hagen J.O.M., Jakobsson T., Oerlemans J., Prowse T.D., Romanovsky V., Savelieva N., Serreze M., Shiklomanov I., Solomon S. 2005. Cryosphere and Hydrology, in Arctic Climate Impacts Assessment. Cambridge University Press: Cambridge, UK. P. 183-242.

НОВЫЕ ОЦЕНКИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ ХРЕБТА ОРУЛГАН

М.Д. Ананичева, А.Н. Кренке-мл.*

Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., д.29, Институт географии РАН. *Maria_anan@rambler.ru

Реферат. Современное оледенение Орулгана, наиболее высокой северной части Верхоянья, расположено в узкой полосе вдоль главного водораздельного хребта двумя участками северным и южным. Главный фактор существования современного оледенения этого района – климатический, поскольку высоты рельефа не велики (до 2300 м). Одна из задач работы − оценка современного состояния ледников хребта – была решена с помощью анализа снимков ASTER за летний период и соответствующей цифровой модели рельефа. Оцифровка ледников проводилась через визуальную идентификацию границ ледника. Для этих целей были составлены несколько трехцветных композиций из разных каналов спутника ASTER. В ходе этой работы удалось найти и идентифицировать лишь 70% ледников, обозначенных в Каталоге ледников СССР. По-видимому, 30% ледников за 50 лет, прошедших со времени каталогизации, исчезли. Среднее значение степени относительного сокращения площади для ледников Орулгана составила 62%. По четырем ледниковым системам Орулгана значения сокращения таковы: Северный Массив, Западный склон − 53%; Северный массив, Восточный склон – 69,9%; Южный массив, Западный склон – 62,1%; Южный массив, Восточный склон – 72,5%. Отступившие ледники было рассортированы по группам с одним морфологическим типом и экспозицией. Максимально сократили площадь ледники каровых типов Северной и северо-восточной экспозиций. Расчетные оценки будущего состояния оледенения Орулгана при увеличении глобальной температуры на 1,5^{o}C по сравнению с уровнем 1981-2000 гг., а также при реализации сценария RCP4,5 (в 2049-2060 гг. он приводит к близкому значению потепления) показало, что оледенение фактически исчезнет. Выполнено сравнение этих перспективных оценок с прогнозом, сделанным с помощью модели ECHAM 4.

Ключевые слова. Ледник, ледниковая система, морфологический тип, экспозиция склона, сокращение площади, космический снимок, прогноз, климатический сценарий, температура, осадки.

NEW ASSESSMENT AND SOME PREDICTIONS OF GLACIERS' STATE OF ORULGAN RANGE

M. D. Ananicheva, A. N. Krenke-jr.*

Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia. *Maria_anan@rambler.ru

Abstract. The contemporary glaciation of Orulgan, the highest range of the northern Verkhoyansk area, is located in a narrow strip along the main dividing ridge. It has two sections, the northern and the southern ones. Climate is the main factor ensuring existence of contemporary glaciation in this region, because altitudes are moderate there (up to 2300 m). One of the goals of the paper is an assessment of the glaciers' current state. It was achieved with the analysis of ASTER images for the summer period and the corresponding ASTER GDEM. Deciphering of the glaciers was conducted through visual identification of glacier boundaries. Several three-color tracks of different color channels of the ASTER satellite were composed for this purpose. We have managed to find and identify only 70% of the glaciers outlined in the USSR Inventory of glaciers. Apparently, other 30% of the glaciers have disappeared since the cataloging, i.e. during past 50 years. The mean relative area reduction for glaciers of Orulgan is 62%. Relative area reductions for the fourth glaciers system of Orulgan were assessed as follows: North massif, western slope – 53%: North massif, eastern slope – 69,9%: Southern Massif, western slope – 62,1%: Southern Massif, eastern slope – 72,5 %. All retreating glaciers were sorted out into groups of the similar morphological type and access. Maximum reduction of area referred to cirque glaciers types of the northern and north-eastern aspect. Calculations of the future state of the Orulgan glaciation were made for two potential climates: one corresponding to the 1,5^{o}C rise in the global temperature vs. 1981-2000 level and another one corresponding to RCP4.5 scenario (it leads to the similar level of warming in 2049-2060). The assessment showed that the glaciation will practically disappear in both cases. These results are compared with the projection obtained with ECHAM 4 climate model.

Key words. Glacier, glacier system, morphological type, access, area reduction, satellite image, projection, climatic scenario, temperature, precipitation.

Введение

Орулган (продолжение Хараулахских гор) – меридиональная, наиболее высокая северная часть Верхоянья. Высшая точка (2389 н.у.м.) расположена на юге хребта, в верховьях реки Собопол. Центральная и южная части хребта Орулган наиболее приподняты, всюду встречаются ледниковые формы рельефа. Характерны пикообразные вершины, острые гребни, глубокие кары, троговые верховья долин и глубокие ущелья (Пармузин, 1967).

Климат обусловлен высокими широтами, строением рельефа, близостью Северного ледовитого океана, влиянием северо-восточного отрога Азиатского антициклона зимой и арктического фронта – летом. Субмеридиональное простирание самого хребта Орулган, служащего климатическим барьером на пути влагонесущих воздушных потоков, определяет основные особенности оледенения.

Ледники в хребте Орулган были открыты в 40-е годы XX века. Современное оледенение расположено в узкой полосе вдоль главного водораздельного хребта двумя участками (северным, протяженностью около 112 км и южным – 25 км), прерываемыми пониженной частью хребта. Наибольшие высоты горных вершин в пределах ледниковой зоны – 2000 м (в северной части) и 2300 м (в южной). Очевидно, что при таком низком рельефе главный фактор существования современного оледенения этого района – климатический. По данным Каталога ледников СССР, оледенение здесь представлено в основном всеми разновидностями каровых и висячих ледников, и только двумя долинными. Каталог содержит данные по 74 ледникам (Каталог ледников СССР, 1972).

Данные и методы

Для решения задачи оценки современного состояния ледников хребта Орулган было решено использовать снимки ASTER за летний период и соответствующую цифровую модель рельефа. В летний период хребет практически свободен от снежного покрова, и этот позволяет с помощью комбинаций каналов снимка идентифицировать границы покрывающих его ледников (Kaab at al.,

2002; Miller at al., in press). Цифровая модель рельефа ASTER согласно спецификациям имеет точность в пределах 20 м (ASTER…, 2009) для доверительного интервала в 95%. Указанной точности вполне достаточно для определения примерных верхней и нижней точки ледника. Эти данные необходимы для определения текущей высоты границы питания ледника ($\mathbf{H_{ELA}}$).

Однако известно, что для данных ASTER GDEM характерны искажения на пиковых высотах доходящие до ста метров (Akira at al., 2003), поэтому наиболее точной стоит считать определение нижней границы ледника. Таким образом, следует учитывать возможность существенных искажений определения высоты верхней точки ледника, однако, в случае обнаружения таких искажений (существенное расхождение с данными Каталога ледников СССР) можно принять данные Каталога как условно истинные. Это объясняется тем, что верхняя точка ледника практически не может существенно меняться. Нижняя высотная отметка ледника почти во всех случаях должна лежать внутри доверительного интервала для данных ASTER. Данные ASTER, с учетом этих соображений, позволяют оценить многолетнюю динамику ледников (в данном случае более чем за 50 лет) так как речь идет об изменениях в сто и более метров. Оценка многолетней динамики и привязка идентифицированных ледников к прошлым измерениям производится с помощью картосхемы (Каталог ледников СССР, 1972) и соответствующей таблицы, содержащей площадь, верхнюю и нижнюю границу ледника. Картосхема, хотя и не имеет географической привязки и весьма схематична, однако отображает порядок, в котором расположены ледники по сторонам света, это позволяет с высокой точностью определить все относительно крупные ледники и большую часть мелких. Трудности, связанные с идентификацией мелких ледников, вызваны исчезновением многих и них.

Оценка современного состояния ледников в районе хребта Орулган осуществлялась в три этапа:

- Оцифровка ледников на территории исследований по космическим снимкам;
- Соотнесение полученных ледников с данными таблицы и картосхемы, идентификация ледников;

- ❖ Составление таблицы содержащей следующие прошлые и текущее состояния ледника: верхнюю (по абсолютной высоте) точку, нижнюю точку, площадь.

Оцифровка ледников проводилась через визуальную идентификацию границ ледника, для этих целей были составлены несколько трехцветных композиций из разных каналов спутника ASTER. Наиболее удачной комбинацией оказалось соотношение четвертого и третьего канала, что подтверждается работой (Kaab at al., 2002).

Соотнесение ледников с данными из Каталога ледников (1972) производилась на основе соотнесения пяти параметров: длин ледников, их площади и положения относительно друг друга, а также бассейна питаемой ими реки и экспозиции склона. Информация о бассейнах рек была получена через использование оцифрованной топографической карты масштаба 1:1 000 000. Работа велась через идентификацию опорных ледников (таких, как ледник Колосова) и последующее соотнесение ледников лежащих между ними с данными таблицы. В ходе работы учитывалась возможность исчезновения или существенно сокращения площадей наиболее мелких ледников, а также вероятность фрагментации крупных.

В результате были получены данные о количестве существующих на настоящий момент ледников, их площади, длины, оценки верхней и нижней высотных отметок ледников хребта Орулган.

Для оценки климата региона мы использовали данные наблюдений метеостанций, расположенных в относительной близости от хребта. По имеющимся записям метеопараметров, наблюденных на метеостанциях (средние месячные значения температуры и осадков) мы рассчитали тренды средней летней и средней годовой температуры $\mathbf{T_{лет}}$, $\mathbf{T_{год}}$, и осадков твердых и жидких – $\mathbf{P_{тв}}$, $\mathbf{P_{ж}}$ за 50 лет до 2010 года для региона Северо-востока Азии, куда вошел и хребет Орулган. Использовалась экспоненциальная аппроксимация, как наиболее точно отражающая колебания температуры и осадков за последние 50 лет. Ряды метеопараметров для Орулгана есть лишь длительностью 60-70 лет, в 90% случаев для остальной территории ряды были более 120 лет (с конца 19 века по 2010г). Использованы проверенные данные наблюдений

температуры и осадков из базы данных ВНИГМИ МЦД (http//www.meteo.ru).

Для расчетов современной высоты границы питания все ледники Орулгана были разделены на 4 ледниковые системы: 1 − Северный Массив, Западный склон (ледники 48-73), 2 − Северный массив, Восточный склон (ледники 1-32), 3 − Южный массив, Западный склон (ледники 38-47), 4 − Южный массив, Восточный склон (ледники 33-37).

Методика прогноза развития систем Орулгана дана в соответствующем разделе ниже.

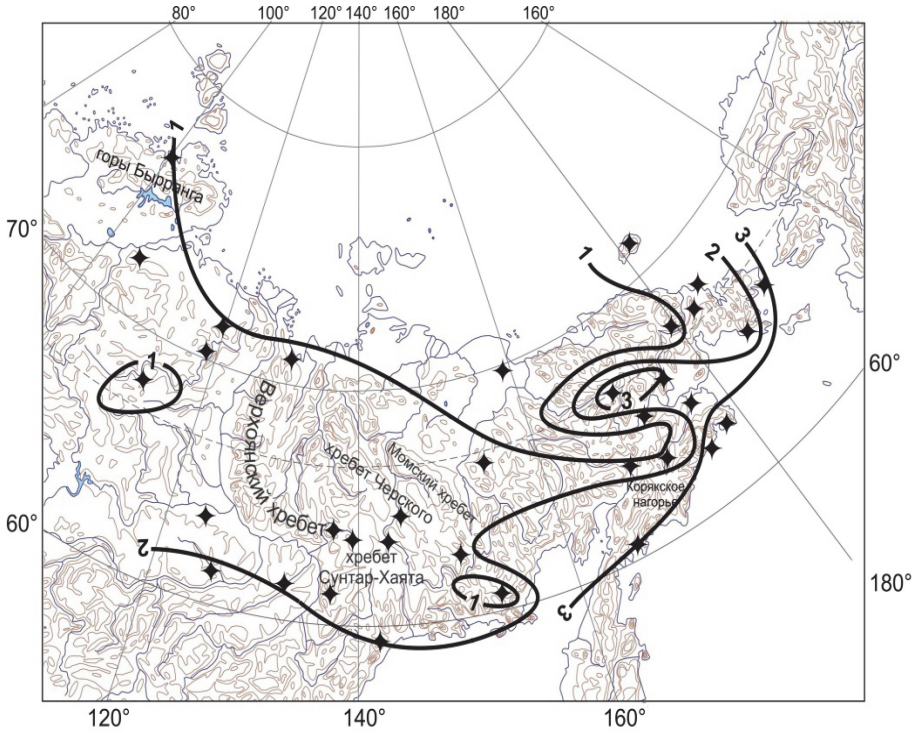

Рис. 1. *Схема трендов средней летней температуры воздуха °С/50 лет (1960-2010 гг.), значками показаны метеостанции, данные которых, использовались при расчете.*

Результаты

Карты трендов летней температуры воздуха $\mathbf{T_{лет}}$ и твердых осадков $\mathbf{P_{тв}}$ за 50 лет (Рис. 1 и 2), как наиболее важных для баланса ледников климатических характеристик, показывает, что потепление летом, во время абляции ледников в районе Верхоянья идет уже длительной время, но интенсивность его не велика – тренд $\mathbf{T_{лет}}$ от 1°С до 2°С/50 лет. Однако продолжительность положительного тренда температуры, наряду с недостатком снегового питания (тренд $\mathbf{P_{тв}}$ нулевой за 50 лет, см. рис 1б) сказываются на состоянии оледенения здесь, которое представлено небольшими по площади ледниками карово-долинных, каровых, висячих морфрологических типов.

С помощью анализа снимков ASTER на территорию хребта Орулган нам удалось найти и идентифицировать лишь 70% ледников, обозначенных в Каталоге. По-видимому, 30% ледников за 50 лет со времени каталогизации исчезли, или в Каталоге были ошибки, которые исключать нельзя (Ананичева, 2012).

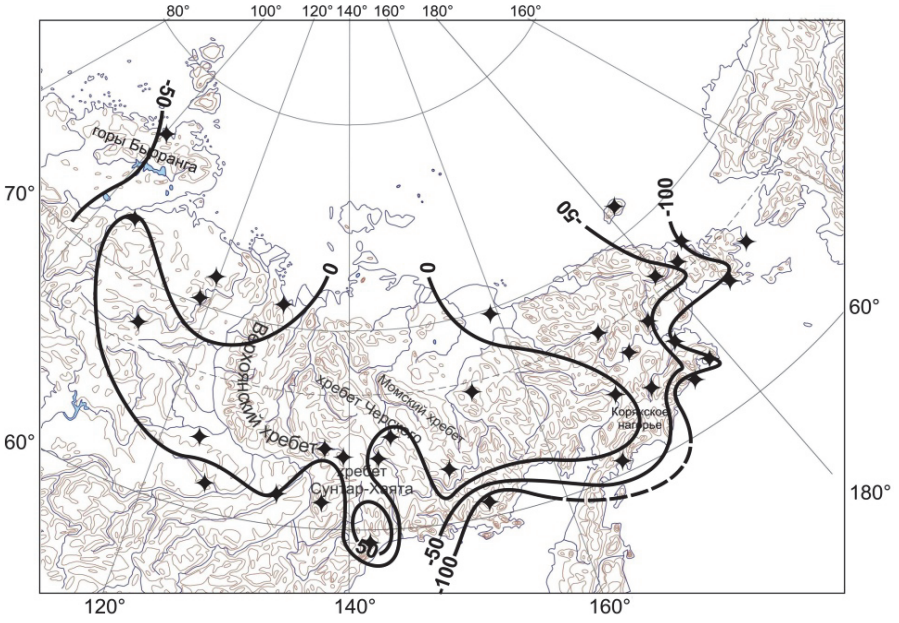

Рис. 2. *Схема трендов осадков холодного периода, мм/50 лет (1960-2010 гг.).*

На рис. 3 дан фрагмент мозаики снимков ASTER с дешифровкой ледников, цифры − номера ледников по каталогу. Из всех найденных 12 ледников исследовать сравнением с данными каталога нам представляется некорректным, поскольку они больше по площади указанной в Каталоге, все они расположены в северном массиве Орулгана, но в разных его частях.

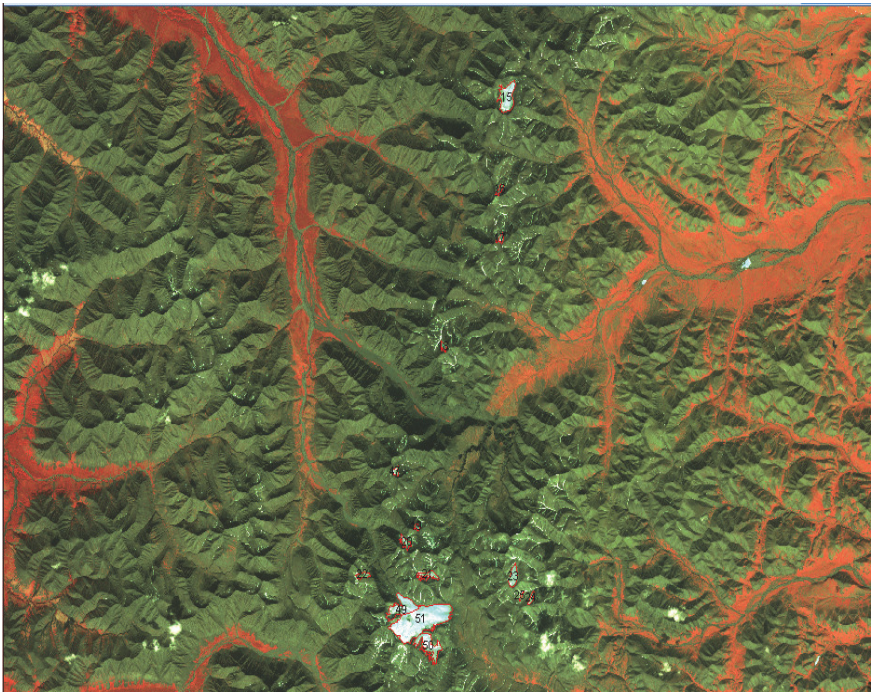

Рис. 3. *Фрагмент мозаики снимков ASTER с дешифровкой ледников, цифры − номера ледников по Каталогу ледников СССР (1972).*

Среднее значение степени относительного сокращения площади для ледников Орулгана составила 62%, ледники уменьшились более чем наполовину, поэтому допускать, что 12 ледников увеличили свою площадь − не корректно, скорее всего, это либо ошибка Каталога, либо невозможность точно дешифрировать контуры этих конкретно ледников по данным снимкам. Среди четырех ледниковых систем Орулгана, относительное сокращение составило: Северный Массив, Западный склон − 53%, Северный массив, Восточный склон – 69,9%, Южный массив, Западный склон – 62,1%, Южный массив,

Восточный склон – 72,5%. Наименьшее уменьшение площади характерно для 1-й ледниковой системы, получающей больше осадков в результате западной циркуляции (осадки с Атлантики); системы же, находящиеся на подветренном макросклоне, потеряли больше своей площади, покрытой льдом.

Отступившие ледники мы сортировали по группам с одним морфологическим типом и экспозицией, чтобы понять какие из этих групп «пострадали» больше всего.

Как видно из рисунков 4 и 5, больше всего уменьшили свою площадь (отступили) ледники северных и восточных экспозиций. И по числу ледников лидирует в сокращении площади группы обращенных на север и северо-восток. Даже если учесть, что в Орулгане преобладают ледники северных экспозиций, факт их массового сокращения (и исчезновения) отражает климатическую тенденцию – потепление Арктики в последние десятилетия

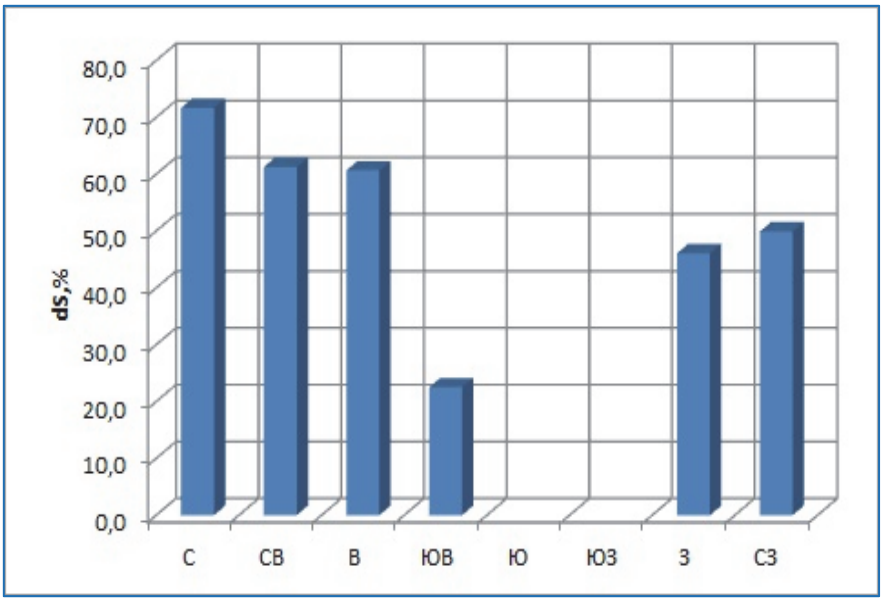

Рис. 4. *Степень уменьшения площади ледников среди групп с одинаковой экспозицией.*

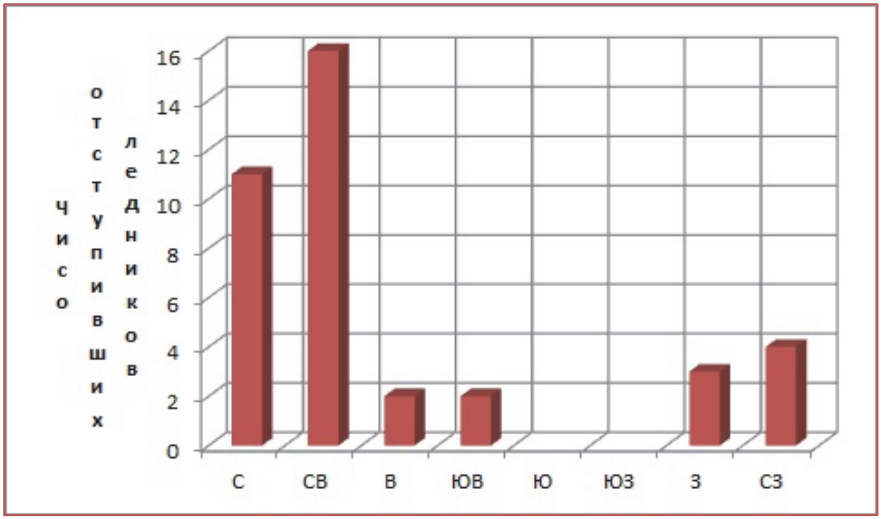

Рис. 5. *Число отступивших ледников, сортированным по группам с одинаковой экспозицией.*

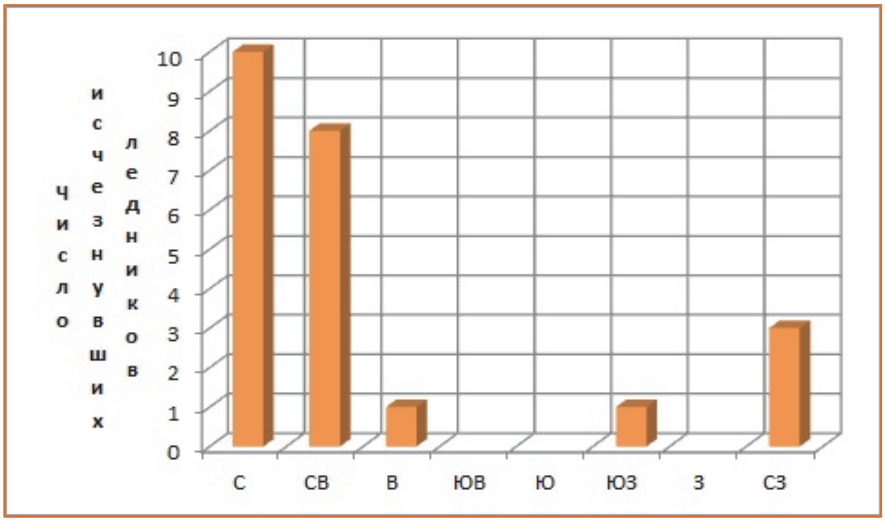

Рис. 6. *Число исчезнувших ледников, сортированным по группам с одинаковой экспозицией.*

Та же картина (рис. 6), естественно, − с исчезнувшими ледниками, максимальное их число принадлежит группам Северной и Северо-восточной экспозиции.

Что касается степени сокращения площади среди ледников с одинаковым морфологическим типом, то, как показано на рис. 7, 8, 9, максимум отступания приходится на кары и карово-долинные ледники (по числу) и каровые и висячие – по его относительной степени в %. Из исчезнувших – каровые резко преобладают по числу, что объясняется их небольшим размером и неглубоким залеганием в цирковых формах рельефа.

С помощью высотной модели рельефа ASTER GDEM мы получили отметки рельефа – высшую и низшую точку ледника, применив подход Гефера-Куровского (Кренке, 1982) к определению высоты границы питания. Мы рассчитали также подъем $\mathbf{H_{ELA}}$ ледников Орулгана к настоящему времени для каждого ледника. В среднем для всего региона он составил 120 м по сравнению со временем каталогизации ледников (Каталог ледников СССР, 1972).

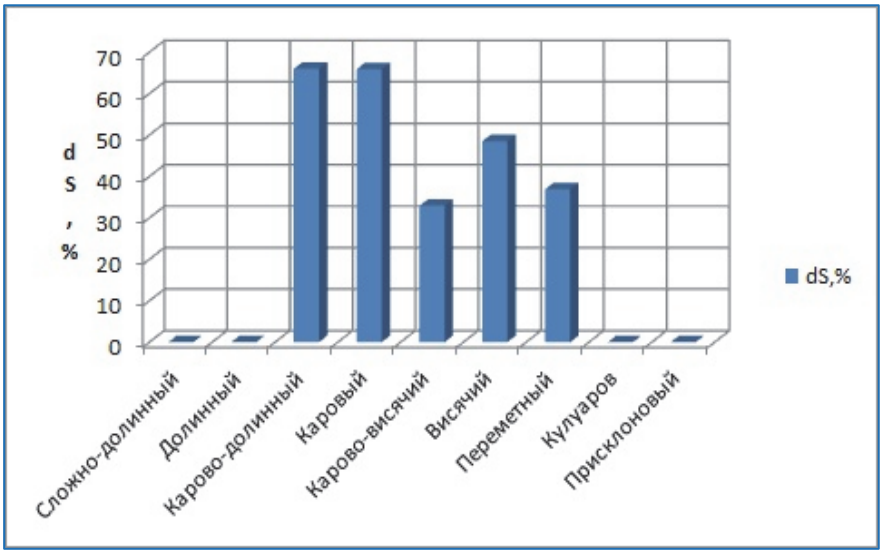

Рис. 7. *Степень уменьшения площади ледников среди групп с одинаковым морфологическим типом.*

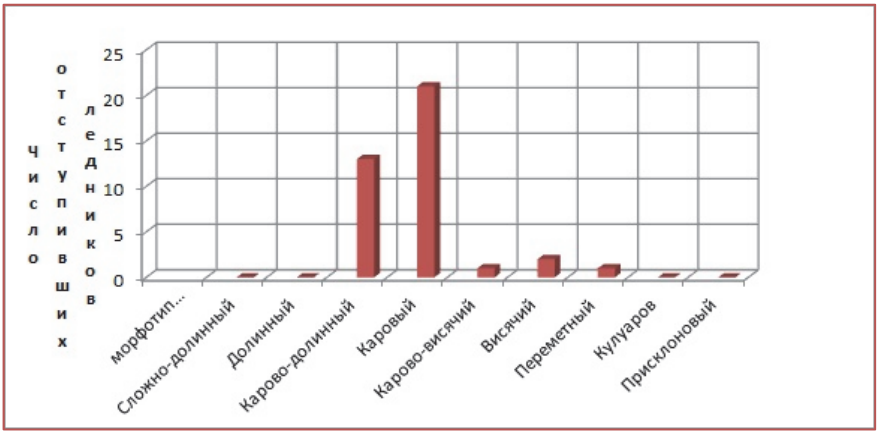

Рис. 8. *Число отступивших ледников, сортированным по группам с одинаковым морфологическим типом.*

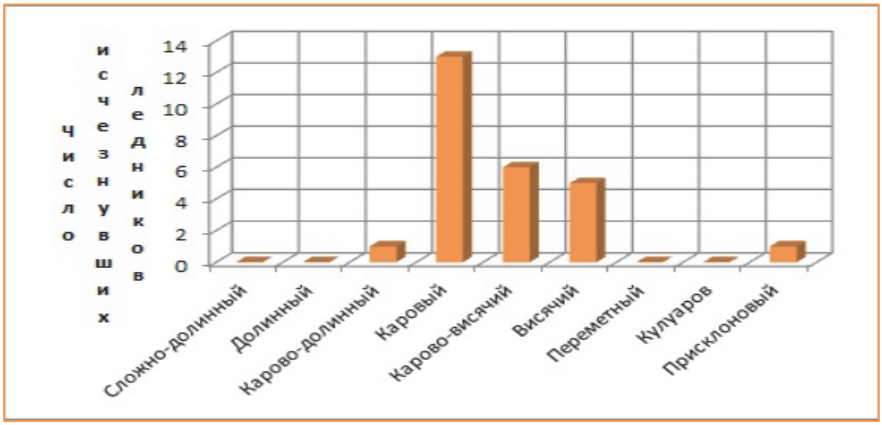

Рис. 9. *Число исчезнувших ледников, сортированным по группам с одинаковым морфологическим типом.*

Учитывая ошибки использования ASTER GDEM в районах с горным рельефом, а также ошибки определения высшей и низшей точки ледника в Каталоге (они не даны), эта оценка носит приблизительный характер.

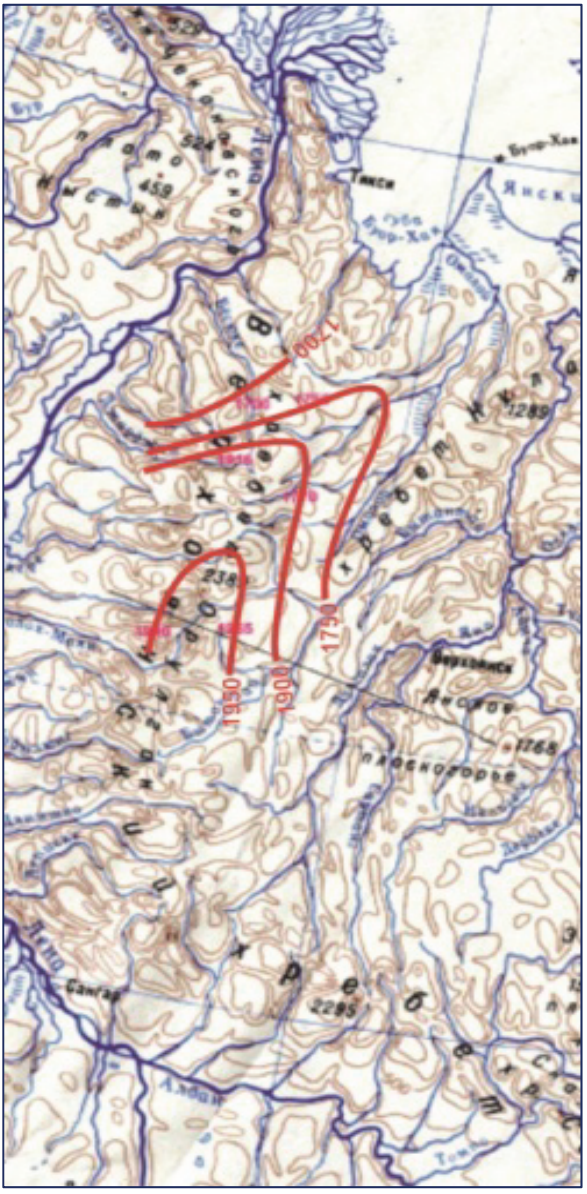

Рис. 10. *Картосхема современной* H_{ELA} *ледников Орулгана, рассчитанная по высотам, полученным по ASTER GDEM.*

На картосхеме (рис. 10) показаны изолинии $\mathbf{H_{ELA}}$ ледников Орулгана, рассчитанные по высотам, полученным по ASTER GDEM; они закономерно меняются от 1700 м до 2000 м н.у.м. с севера к центру оледенения, вокруг самого большого ледника Колосова. Ошибка определения может составлять до 50-70 м.

Оценки $\mathbf{H_{ELA}}$ ледников важны для моделирования режима ледников в отсутствии прямых измерений, последние получить крайне дорого и не реально для ледников изучаемого района. Более точно значения $\mathbf{H_{ELA}}$ можно определить по космическим снимкам, содержащим подробную информацию о поверхности ледника, которыми для данного района мы не располагали.

Оценка эволюции оледенения к середине XXI века

В этом разделе кратко излагается опыт построения схемы изменения морфологии и режима ледниковых систем на основе сценария изменений климата, по которому определяются средние для ледниковых систем или их частей значения $\mathbf{H_{ELA}}$, зависящие от эволюции нижней поверхности хионосферы (термин С.В. Калесника, (1963)) на дату конкретного сценария. Полученные результаты следует рассматривать в первую очередь в методическом плане. Ценность самого прогноза ввиду неопределённости такого рода сценариев изменения климата, учитывающих лишь изменения состава атмосферы по разным, в несколько раз различающимся вариантам, достаточно условна.

Методика оценки эволюции ледниковых систем описана в наших статьях (Ананичева, Кренке, 2005; Ананичева, Капустин, 2010; Ананичева и др, 2012; Ананичева, 2012), в данной работе нам пришлось внести в нее определённые изменения, вызванные спецификой климатического сценария.

В качестве температурного сценария была взят массив температур, полученных Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, соответствующий +1,5°С к средней глобальной температуре 1981-2000 гг. (Семенов и др., 2013). Значения осадков, соответствующие этой добавке, рекомендованы и любезно предоставлены ГГО им. А.И. Воейкова из сценария поколения RCP, в частности, RCP4.5 (Xie, Arkin, 1998). Эти параметры даны для территории России и стран ближнего зарубежья в узлах сетки 1° х 1°; центры ячеек – в «полградусных» точках. Используемый сценарий осадков – «среднемодельный» – т.е.

получен осреднением результатов расчетов по 31 глобальным моделям циркуляции атмосферы, которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему.

Прогноз развития оледенения состоял из двух блоков – построение балансовых кривых абляции и аккумуляции, и расчет $\mathbf{H_{ELA}}$ и, если возможно, − высот концов ледников для базового («современность») и прогнозного (2040-69 гг.) периодов.

Для построения базовой схемы вертикального распределения балансовых компонент ледниковых систем на современность нами были использованы имевшиеся климатические данные, в основном середины и конца XX века. Период охвата мало отличается от принятого в модели базового периода реанализа (1960-90 гг.) по сравнению с полученными в модели изменениями за последующие 80 лет. Наш базовый период приблизительно соответствует состоянию оледенения, отражённому в Каталоге ледников СССР (1972), охватывая отчасти время, предшествовавшее его составлению.

Для двух крупных ледниковых систем (Северо-запад и юго-восток Орулгана) по данным имеющихся метеостанций построены вертикальные профили аккумуляции и абляции. Помимо рядов метеопараметров станций использовались значения средних высот границы питания, взятых по каталогам или снятых с карт их полей (Кренке, 1982; Ананичева, Кренке, 2005). В Северо-восточной Сибири, где ледники холодные, преобладает наложенное питание, и значительная часть талой воды повторно замерзает, а потом вновь тает на поверхности. В этом случае правомерно использование *регионального* варианта глобальной формулы связи абляции с летней температурой (Корейша, 1991):

$$A = 0{,}1(T_л + 7{,}0)^3 \text{г см}^{-2} \quad (1)$$

Где **А** – абляция, $\mathbf{T_л}$ – средняя температура воздуха над поверхностью льда за июнь, июль и август.

Температура над поверхностью льда как для базового, так и для прогнозного периодов вычислялась по кривой летней температуры над безлёдной поверхностью $\mathbf{T_б}$ по формуле Н.В. Давидович (1983):

$$T_л = 0{,}85\ T_б - 1{,}2 \quad (2)$$

Расчет профилей *аккумуляции* состоял в преобразовании вертикального распределения твердых осадков с помощью коэффициента концентрации.

Доля твёрдых осадков для каждого месяца, а затем и в годовом выводе, определялась по методу Э.Г. Богдановой (Богданова, 1976) в зависимости от средней месячной температуры и высоты и затем использовалась для расчёта вертикальных кривых твёрдых осадков в абсолютном выражении. Затем, в зависимости от преобладающего морфологического типа ледников в ледниковой системе, вводился коэффициент концентрации (Кренке, 1982), учитывающий метелево-лавинный перенос снега или его снос со склонов.

Следующим этапом было построение ***прогнозных*** кривых $\mathbf{A_п}$ и $\mathbf{C_п}$ для климата 2040 – 2069 гг. на базе полученных кривых **A** и **C** для современного периода. Для расчета абляции было сделано допущение, что температурный сдвиг, данный в модели для узлов ячейки, в которой располагается ледниковая система, распространяется для всего её диапазона высот. Если ледниковая система охватывалась несколькими ячейками, мы брали средне-взвешенное значение сдвига. Для 1-й системы (табл. А) прогнозные значения температуры составляли на средней высоте 900 м н. у. м. 12,7°С, для 2-й – на 810 м – 10,8°С.

Абляция $\mathbf{A_п}$ рассчитывалась по той же формуле (1), но температура была использована прогнозная (на 2 м от поверхности реального рельефа), высотный температурный градиент полагался таким же, как в базовый период, поэтому за основу взяты градиенты температуры из работы М.М. Корейши (1991), а также из атласа (Аэроклиматический атлас Северного полушария, 1963). Высота рельефа была рассчитана средним взвешенным осреднением высотных точек сценария, попадающих в область ледниковой системы.

Для расчета *аккумуляции* на прогнозный период мы допустили, что высотный градиент осадков остался неизменным по сравнению с базовым периодом. В сценарии осадков даны общие осадки (мм сут$^{-1}$), поэтому сначала мы рассчитали твердые осадки $\mathbf{P_{тв}}$ по доле твердых осадков годовом количестве, полагая, что эта доля будет не сильно отличаться от той, что будет в прогнозный период.

В результате применения градиентов осадков, которые М.М.Корейша измерял до высот 2500м (Корейша, 1963), к прогнозному значению $\mathbf{P_{тв}}$ на поверхности земли, были получены вертикальные кривые твердых осадков, а при умножении на коэффициент концентрации были рассчитаны $\mathbf{C_{п}}$ для двух ледниковых систем на 2040-69 гг. (см пример профилей на Рис. 11).

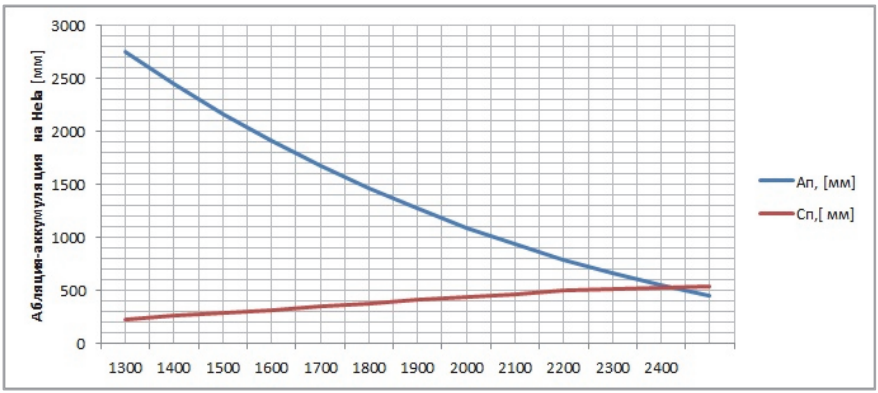

Рис. 11. *Профили абляции-аккумуляции ледников для прогнозного периода. Северо-запад Орулгана.*

Высотные отметки их пересечения с прогнозными кривыми $\mathbf{A_{п}}$ приняты за искомую среднюю высоту границы питания для ледниковой системы – $\mathbf{H_{ELA/п}}$. В случаях её смещения выше самой высокой точки области аккумуляции ледников ($\mathbf{H_{в}}$) в системе, соответствующее оледенение должно исчезнуть. В остальных случаях принято, что после приспособления оледенения к новому климату в соответствии с методом определения этой высоты по Геферу (Калесник, 1963), высотный перепад между началом ледников и $\mathbf{H_{ELA/п}}$ равен высотному перепаду между $\mathbf{H_{ELA/п}}$ и концом ледника.

Время приспособления оледенения к изменениям климата для каждой ледниковой системы зависит от соотношения объёма и скорости массообмена ледников, она оценивается по соотношению характерной толщины ледников и абляции их концов (Johanneson at al., 1989).

Ледники хребта Орулган по данным Каталога ледников СССР (1972) находились в высотных интервалах 1500 – 2250 м на севере и 1520 – 2280 м на юге.

Для обеих крупных ледниковых систем Орулгана, исходя из сценария, пересечение высотных профилей абляции и аккумуляции произошло за пределами высших точек рельефа ($\mathbf{H_{ELA/п}}$: 2400 м для Северо-запада, и 2460 м для Юго-востока), что означает, что при таком сочетании температур и осадков, как принято в сценарии, небольшие по размеру ледники Орулгана не имеют возможности сохраниться.

Как видно из таблицы, к настоящему времени наибольшему сокращению в целом подверглась юго-восточная часть Орулгана (изменение площади ледников 56% по сравнению с Каталогом ледников СССР). Северо-восток региона потерял более 40% своей ледниковой площади. А высоты границы питания поднялись на 70 и 100 м соответственно.

При дальнейшем росте температуры, исходя из сценария ко второй половине XXI столетия, твердые осадки не смогут компенсировать убыль массы ледников за счет абляции, ледники фактически исчезнут. Абляция на H_{ELA} резко снизится, а при исчезновении ледников будет естественно равно нулю.

Таблица А

Изменения основных характеристик ледниковых систем Орулгана к 2010 и 2040-2069 гг.

Название ледниковой системы	Подъем H_{ELA} м		Площадь оледенения, км^2, %			Абляция–аккумуляция на H_{ELA}, мм	
	К настящему времени	От базового периода к прогнозному	Базовый период, км^2	К 2010 г, км^2 (%)	Прогнозный период*, км^2 (%)	Базовый период	Прогнозный период,
1.Северо-запад	70	500	10,9	6,4 (41,2)	~0	710	400
2. Юго-восток	100	570	5,0	2,2 (56,0)	~0	700	550

***Примечание:** без 12 ледников, о которых в тексте упомянуто выше.*

В работах (Ананичева, Кренке, 2007; Ananicheva, et al.,, 2010) был дан прогноз развития оледенения на изучаемый регион по модели ECHAM 4. Согласно этому климатическому сценарию, на севере хребта $\mathbf{T_{л/п}}$ должна вырасти на 3,7°С, а на юге − на 3,5°С,

твёрдые же осадки ($P_{тв/п}$) также возрастут благодаря усилению циклоничности и достаточно низким температурам (несмотря на потепление) − на 46% и 21% соответственно. $\mathbf{H_{ELA/п}}$ в соответствии со прогнозными балансовыми кривыми поднимется на севере на 250 м от 1700 до 2050 м, а на юге при меньшем росте осадков − на 500 м и сменит позицию − от 2000 до 2500 м, тем самым окажется выше верхнего предела оледенения (2280 м). Таким образом, несмотря на некоторое различие параметров сценариев, результаты оценки развития ледниковых систем не сильно отличаются. Использованный нами в этой работе сценарий предоставляет такое сочетание летней температуры и зимних осадков, при котором результат наименее благоприятен для ледников Орулгана.

Выводы

1. Недавние и современные изменения климата Субарктики приводят к отрицательному балансу массы горных ледников Орулгана. Рост их питания не компенсирует рост их таяния.

2. На малых ледниках расчёты по различным моделям приводят к выводу о возможном исчезновении целых ледниковых систем, которые они образуют. В том числе вероятно полное исчезновение оледенения хребта Орулган к середине XXI века.

3. Анализ точности определения контуров и концов ледников Орулгана по космическим и аэрофотоснимкам приводит к выводу о приблизительности оценок величины, но не знака их изменений.

Благодарности

Выражаем благодарность главе Главной геофизической обсерватории проф. В.М. Катцову и директору Института Глобального климата и экологии Госкомгидромета и РАН проф. С.М. Семенову за предоставление сценария осадков по 31 МОЦАО, проект CMIP5 и массива данных температур ИГКЭ, а также консультации. Спасибо А.Н. Кренке, д.г.н., ИГ РАН − за прочтение статьи и ценные советы, а также Г.А. Носенко, к.г.н. ИГ РАН – за помощь в предоставлении снимков территории изучаемого региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананичева М.Д. 2012. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия. Лед и снег. №1 (117). С. 15-24.
2. Ананичева М.Д., Кренке А.Н. Гляциологический прогноз. Горное оледенение (на примере Северо-Востока России и Камчатки). 2007. В кн.: Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем. –М.: Наука. С. 277-293.
3. Ананичева М.Д., Кренке А.Н. 2005. Эволюция высот климатической снеговой линии и границы питания ледников на Северо-востоке Сибири в XX веке. Материалы гляциологических исследований (МГИ). Вып. 98. С. 225-233.
4. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Михайлов А.Ю. 2012. Ледники Мейныпильгынского хребта: современное состояние и прогноз эволюции ледниковых систем. Лед и снег. № 2 (118). С. 40-560.
5. Ананичева М.Д., Капустин Г.А. Оценка изменений ледников гор Быранга по космическим снимкам и Каталогу ледников СССР. Лёд и снег. 2010. № 3(111). С. 19-24.
6. Аэроклиматический атлас Северного полушария. 1963. Под ред. И.Г.Гутермана и И.В. Ханевской. –Л.: Гидрометеоиздат. 213 С.
7. Богданова Э.Г. 1976. Способ расчета доли твердых, жидких и смешанных осадков в их месячной норме. Материалы гляциологических исследований (МГИ). Вып. 26. С. 202-207.
8. Давидович Н.В. 1983. Охлаждающее воздействие горных ледников умеренных широт. Изв. АН СССР. Сер. геогр. №5. С. 74-82.
9. Калесник С.В. 1963. Очерки гляциологии. –М.: Учпедгиз. 182 С.
10. Каталог ледников СССР. 1972. Т. 17. Вып. 5. Ч. 2. Хребет Орулган. –Л.: Гидрометеоиздат. 67 С.
11. Корейша М.М. 1963. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. Результаты исслед. по программе МГГ. Гляциология. №11. –М.: Наука. 98 С.
12. Корейша М.М. 1991. Оледенение Верхоянско-Колымской области. Результаты исследований по программе МГГ. –М.: Изд-во РАН. 141 С.
13. Кренке А.Н. 1982. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. – Л.: Гидрометиздат. 288 С.
14. Пармузин. Ю.П. Северо-Восток и Камчатка: очерк природы. –М. : Мысль, 1967. – 368 с.
15. Семенов С.М., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Попов И.О., Титкина С.Н. 2013. Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. –М.: ИГКЭ. (В печати).
16. Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. 2010. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios. The Cryosphere. V. 4. P. 435-445.
17. ASTER Global DEM Validation Summary Report. Prepared by ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC NASA/LPDAAC USGS/EROS In cooperation with NGA and Other Collaborators June 2009. 28 p.

18. Akira H., Welch R., Lang H. 2003. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. V. 57. P. 356-370.
19. Johanneson T., Remond D., Waddington E. 1989. Timescale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. Journal of Glaciology. V. 5. P. 355-369.
20. Kaab A., Huggel C., Paul F., Wessels R., Raup B., Kieffer H., Kargel J. 2002. Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and applications. Proceedings of E ARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space. Bern, March 11 – 13, 4EARSeLeProceedings. №. 2. P. 43-52.
21. Miller P.E., Kunz M., Mills J.P., King M.A, Murray T., James T.D., Marsh S.H. Assessment of glacier volume change using ASTER-based surface matching of historical photography. (In press)
22. Xie P., Arkin P.A. 1998. Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing longwave radiation. J. Climate. V.11. P.137-164. (Updated).

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГРАНИЦЫ АРЕАЛОВ ВРЕДИТЕЛЕЙ И ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БОЛЕЗНЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ, И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ АРЕАЛОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Е.Н. Попова *[1), 2)], *И.О. Попов* [1)]

[1)]Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, *en_popova@mail.ru
[2)]Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., 29, Институт географии РАН,

Реферат. Выделены основные климатические факторы, влияющие на распространение и экологические свойства вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений. Дан обзор климатических критериев, определяющих размножение, развитие и границы ареалов отдельных их представителей. Выполнено обобщение способов расчета зависимости биологических параметров различных организмов от климатических переменных. Показано, что вслед за климатическим потеплением на территории России расширились и границы ареалов и зон массового размножения отдельных видов. Для рассчитанного с помощью различных моделей будущего климата, показаны возможные изменения климатического ареала колорадского жука при разном протекании дальнейшего климатического потепления.

Ключевые слова. Климатические факторы, методы моделирования, ареалы, экология, вредители, возбудители болезней, сельское хозяйство, изменение климата, перспективная оценка.

CLIMATIC FACTORS DETERMINING RANGES OF AGRICULTURAL PESTS AND AGENTS OF PLANT DISEASES AND MODEL METHODOLOGY FOR ASSESSMENT OF CHANGE IN RANGES

E.N. Popova [1),2)], *I.O. Popov* [1)]

[1)]Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, *en_popova@mail.ru
[2)]Institute of Geography of RAS, 29, Staromonetnij per., 109017 Moscow, Russia.

Abstract. The main climatic factors influencing distribution and ecological features of agricultural pests and agents of plant diseases are identified. A review of climatic criteria determining reproduction, development and range boundaries for some of them is presented. Methods for calculations of biological parameters of some organisms from climatic variables are summarized. It is shown that climate warming over Russia was followed by an expansion of ranges and mass reproduction zones of some species. For future climates produced by various models under different global warming scenarios, possible changes in climatic range of Colorado potato beetle are computed.

Key words. Climatic factors, model methodologies, ranges, ecology, pests, diseases' agents, agriculture, climate change, projection.

Введение

Распространение всех живых организмов зависит от совокупности целого ряда биотических и абиотических факторов, важнейшими из которых являются погодные условия, определяющие климат конкретной географической территории. Наиболее значимые из них – это температура и влажность. Ареал каждого вида ограничивают свои температурные и влажностные критерии, при изменении которых жизнедеятельность представителей вида существенно угнетается, а достижение некоторого критического их значения приводит к исчезновению вида или невозможности его вселения в данный регион. Существуют как стенобионтные (приспособленные к узкому спектру колебаний условий окружающей среды), так и эврибионтные виды (способные выдерживать значительные колебания изменений в окружающей среде) (Одум, 1975). Однако для всех живых организмов существуют свои минимумы, оптимумы и максимумы, соответствующие определенным значениям того или иного фактора. При этом выделяют как летальные минимумы и максимумы, приводящие к гибели организмов, так и нелетальные, при которых особи вида выживают, но их развитие прекращается. На рис. 1 показана зависимость наиболее важных стадий развития организма от количественного значения конкретного фактора, выраженная параболической кривой, максимум которой соответствует наиболее благоприятному значению (Гиляров, 1990, Бигон и др., 1989).

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения, выражающиеся, прежде всего, в увеличении среднегодовой температуры приземного воздуха и изменении характера увлажнения территорий приводят к тому, что границы ареалов и зон массового размножения вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур также смещаются. Косвенно этому может служить и изменение зон произрастания климатозависимых культурных растений, являющихся для них источником пищи. Вредители и возбудители болезней сельскохозяйственных растений постепенно заселяют, и в дальнейшем будут заселять, все пригодные для их проживания регионы, поэтому необходимо тщательно изучать их экологию, в частности их поведение, развитие и способность выживать при различных значениях температуры и влажности, а также оценивать изменение этих значений в различных сельскохозяйственных регионах России и соседних стран, особенно на границах их современных ареалов.

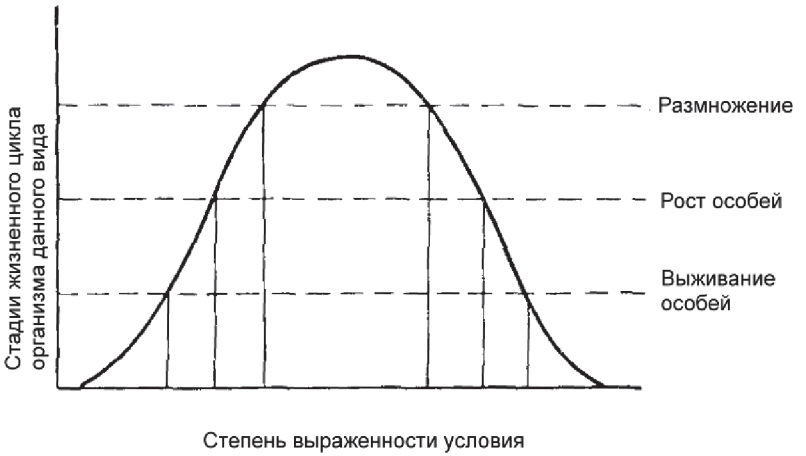

Рис. 1. *Зависимость проявлений жизнедеятельности организмов данного вида от степени выраженности внешнего условия. Интервал, в пределах которого особи могут размножаться, обычно предопределяет те условия, в которых возможно длительное существование вида (Бигон и др., 1989).*

Данные и методы

Зависимость вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур от температуры и методы ее определения

От температуры окружающей среды особенно зависят организмы, самостоятельно не вырабатывающие тепловую энергию. Это – пойкилотермные организмы (температура тела которых зависит от окружающей среды) или, по более точному определению, эктотермы (организмы, поддерживающие температуру тела за счет внешних источников тепла) (Бигон и др.. 1989). К ним относится большинство известных вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур, наиболее опасные из которых – насекомые, грибы, оомицеты, вирусы, бактерии и нематоды. Для них губительны как экстремально низкие, так и экстремально высокие значения температуры окружающей среды. Крайние минимум и максимум температур нижнего и верхнего пессимумов (наихудших условий окружающей среды) называют нижним и верхним порогом развития вида (биологическим нулем).

Наиболее часто применяемыми критериями для оценки влияния температурного режима на распространение и развитие биологических объектов являются такие прикладные климатические индексы, как сумма активных и сумма эффективных температур воздуха или почвы (тот или иной критерий используют в зависимости как от местообитания вида – подземного или надземного, так и от поставленных перед исследователем задач).

Под суммой активных температур подразумевается сумма среднесуточных температур выше определенного температурного порога (обычно >10°C) за заданный временной период: $\sum T_{>10^{o}C}$

Сумма эффективных температур, также являющаяся одной из наиболее часто применяемых размерных величин при описании температурных критериев развития эктотермных организмов, представляет собой интеграл превышения текущей температурой воздуха или почвы некоторого порогового значения t_0 (нижний температурный порог развития вида) за временной период, необходимый для развития вида: $\Sigma(t_n - t_o)$, и определяется по формуле (Blunk, 1923):

$$C = (t_n - t_o) \bullet D, \qquad (1)$$

где t_n – температура окружающей среды; t_0 – нижний температурный порог развития вида; D – продолжительность развития.

Размерность величин суммы активных и эффективных температур есть [°С × время]. Иногда, в том случае, если эти прикладные климатические индексы вычисляются, исходя из среднесуточных значений температуры окружающей среды, то по традиции сумма эффективных и/или активных температур дается просто в °С. Для суммы эффективных температур в зависимости от условий проведения эксперимента часто используют также размерности «градусо-дни», «градусо-сутки» и «градусо-часы».

Биологическое значение этих двух величин заключается в том, что они показывают количество тепла, необходимое для развития зависящих от температуры окружающей среды живых организмов. Сумма активных температур выше 10°С имеет более широкое применение в агроэкологии и биогеографии, так как она определяет границы ареалов и зон массового размножения многих животных и растений и является критерием выделения целых биоклиматических поясов по тепловому режиму (Шашко, 1967; Димо, Розов, 1974). Сумма эффективных температур в значительной степени видоспецифична, это – количество тепловой энергии, необходимое для развития данного вида. Только эффективные температуры могут вывести организм из «нулевого состояния» и активизировать в нем физиологические процессы. Бигон с соавторами предложили в качестве аналога сумм эффективных температур использовать термин «физиологическое время» определяемое, как некую комбинацию времени и температуры, требуемую эктотермам. Если температура падает ниже порога развития эктотермного вида, то это время «останавливается» (Бигон и др., 1989).

Сумма эффективных температур, необходимая для развития каждого вида-эктотерма – величина относительно постоянная, если остальные условия среды находятся в оптимуме и нет каких-либо осложняющих факторов. Эта закономерность получила название «правила суммы температур». Данное правило выражается в виде следующей формулы (Blunk, 1923; Peairs, 1927):

$$(t - t_o) \cdot D = (t' - t_o) \cdot D' = const, \qquad (2)$$

где t и t' – активные температуры в °С, D и D' – продолжительности развития при этих температурах, t_o – нижний,

холодовой, порог развития. Разности между активными температурами и порогом развития – эффективные температуры.

Определив экспериментальным путем продолжительность развития выбранного вида при двух заданных температурах можно рассчитать нижний температурный порог развития этого вида по формуле:

$$t_o = \frac{t \times D - t' \times D'}{D - D'} \qquad (3)$$

Другими важными температурными величинами, ограничивающими распространение эктотермных вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур, помимо сумм активных и эффективных температур, являются:

- среднегодовая температура воздуха или почвы, °С;
- среднемесячная температура воздуха или почвы самого холодного месяца года (обычно января), °С;
- среднемесячная температура воздуха или почвы самого теплого месяца года (обычно июля), °С;
- самая низкая (холодная) температура воздуха или почвы в течение одного года или ряда лет, °С;
- самая высокая (теплая) температура воздуха или почвы в течение одного года или ряда лет, °С;
- количество дней в году с самой холодной температурой воздуха или почвы в течение одного года или ряда лет, сут;
- количество дней в году с самой теплой температурой воздуха или почвы в течение одного года или ряда лет, сут;
- продолжительность безморозного периода, т.е. количество дней в году, когда температура воздуха превышает значение 0°С, сут;
- продолжительность периода, т.е. количество дней в году, когда температура воздуха превышает нижнее или верхнее пороговое значение развития вида, сут;

При исследовании влияния различных факторов, зависящих от температуры окружающей среды, на эктотермные живые организмы обычно используют величину, обратную продолжительности развития *D*, которая показывает скорость протекания того или иного процесса ***V*** и имеет размерность [ед. времени $^{-1}$], что означает, какая доля от общей продолжительности рассматриваемого периода

протекания биологического процесса приходится на единицу времени (Винберг, 1968):

$$V = 1/D \quad (4)$$

На основе этой формулы можно рассчитывать скорость развития определенной стадии жизненного цикла, скорость потребления кислорода, скорость метаболизма и т.п.:

$$D \bullet (t - t_o) = const = 1/k \quad (5)$$

$$1/D = k(t - t_o) = kt - kt_o = kt - a, \text{ где } a = kt_o \quad (6)$$

Отсюда получаем:

$$V = kt - a, \quad (7)$$

где $k, a - const$

Это правило, выраженное линейной функцией, также как и правило суммы температур выполняется при условии, что остальные факторы окружающей среды находятся в оптимуме и $t_o < t < t_{max}$, где t_{max} и t_o – верхний и нижний пороги развития вида соответственно.

При $t \sim t_o$ или $t \sim t_{max}$ функция отклоняется от линейной и общая зависимость скорости от температуры принимает вид S-образной кривой (рис. 2). В этом случае зависимость скорости биологических процессов от внешней температуры может быть выражена с помощью других уравнений (Винберг, 1968, 1983).

1. Скорость биологических процессов при значениях температуры, существенно меньших t_{max}, обычно в диапазоне 0–20°C, хорошо описывает следующая показательная функция ее зависимости от температуры t:

$$V_2 / V_1 = \alpha^{(t_2 - t_1)}, \quad (8)$$

где V_2 и V_1 – скорости биологических процессов при температурах t_2 и t_1 соответственно, $a - const.$ При $t_1 = 0$ эта формула выглядит следующим образом:

$$V = V_o \alpha^{t}. \quad (9)$$

Если прологарифмировать уравнение (8), то оно превратиться в линейную функцию зависимости логарифма скорости от температуры, которая может быть графически представлена в виде прямой линии:

$$\log V_2 = \log V_1 + (t_2 - t_1)\log \alpha \quad (10)$$

Если взять $\alpha = Q_{10}^{1/10}$, то получим:

$$V_2/V_1 = Q_{10}^{(t_2 - t_1)/10}, \text{ или} \quad (11)$$

$$\log Q_{10} = 10(\log V_2 - \log V_1)/(t_2 - t_1) \quad (12)$$

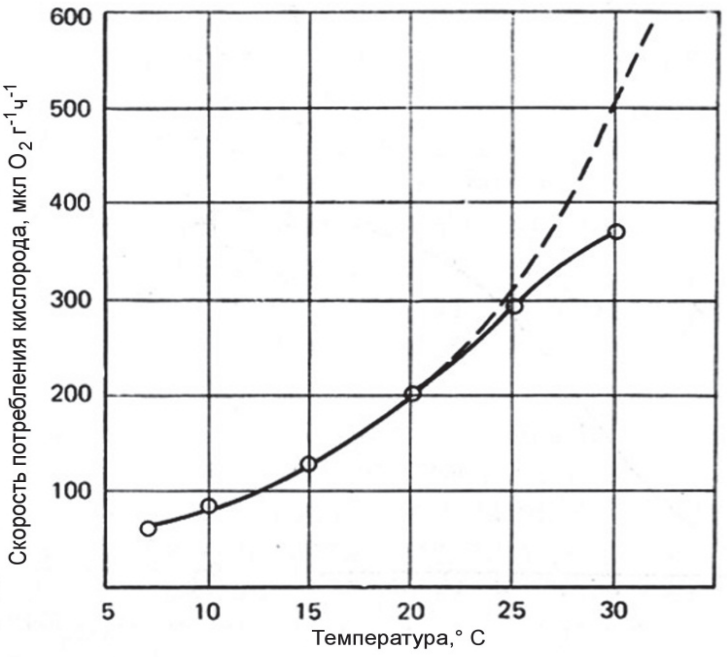

Рис. 2. *Скорость потребления кислорода колорадским жуком. Сплошная линия – эмпирическая кривая зависимости скорости потребления кислорода колорадским жуком от температуры. Штриховая линия – теоретическая кривая, построенная на основе показательной функции зависимости скорости потребления кислорода колорадским жуком от температуры (Marzusch, 1952).*

Коэффициент Q_{10} показывает, во сколько раз увеличится скорость биологических процессов (развития, дыхания, метаболизма и т.д.) эктотермных организмов при увеличении температуры t на 10°С. В диапазоне температур, близком к 0-25°С в экологии выполняется правило, сходное с правилом Вант-Гоффа, а именно, что при увеличении температуры на каждые 10°С, скорость

метаболических реакций у различных эктотермов возрастает в 2,2-2,5 раза или: $Q_{10} = 2{,}2 \div 2{,}5$. При дальнейшем увеличении температуры это правило не соблюдается, а эмпирическая кривая отклоняется от теоретической (рис. 2). Так, скорость потребления кислорода колорадским жуком возрастает по мере повышения температуры (сплошная линия). На большей части охваченного температурного интервала с повышением температуры на каждые 10°С эта скорость увеличивается в 2,5 раза ($Q_{10} = 2{,}5$). Штриховая линия показывает, как выглядел бы график, если бы коэффициент Q_{10} при самых высоких температурах не понижался, а сохранял бы постоянное значение, равное 2,5.

2. При температурных значениях, превышающих нижний порог развития вида и стремящихся к максимальным значениям t_{max}, скорость биологических процессов хорошо описывается с помощью показательной функции от обратной абсолютной температуры (уравнение Вант-Гоффа – Аррениуса):

$$V = V_0 e^{-E_a/RT}, \qquad (13)$$

где E_a – энергия активации рассматриваемого биологического процесса, Дж • моль$^{-1}$, R – универсальная газовая постоянная, равная 8,3 Дж•моль$^{-1}$•(град К)$^{-1}$, Т – абсолютная температура в градусах Кельвина (град К), равная t (°С) + 273,15

Таким образом, E_a/RT – безразмерный коэффициент, передающий ускорение процесса с возрастанием температуры. Уравнение (13) после логарифмирования также как и уравнение (8), превращается в линейную функцию зависимости скорости интересующего нас биологического процесса от обратной абсолютной температуры:

$$\ln V = \ln V_0 - E_a/RT \qquad (14)$$

Приведенные выше уравнения зависимости скорости различных биологических процессов от температуры у эктотермных организмов показывают, каким жизненно важным компонентом является для них температура.

Влияние влажности на вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур и методы ее определения

Вода, наряду с температурой, является важным экологическим фактором в жизни организмов. Вода – основа протоплазмы клеток и

межклеточного вещества. Только при наличии воды в организме протекают физиологические и метаболические процессы. Благодаря растворенным в воде веществам поддерживается осмотическое давление клеточных и тканевых жидкостей и межклеточный обмен.

По отношению к влажности различают эвригигробионтные и стеногигробионтные организмы. Эвригигробионтные способны жить при значительных колебаниях влажности, а стеногигробионты – выживают в узком диапазоне колебаний влажности. Также живые организмы подразделяются на три основные экологические группы:

1. Гигрофильные – влаголюбивые, приспособленные к обитанию в условиях высокой влажности (на болотах, во влажных лесах, по берегам водоемов, во влажной почве). Механизмы регуляции их водного обмена слабо развиты или вообще отсутствуют. К этой группе относятся многие почвенные нематоды, в том числе фитопаразитические. К влаголюбивым переносчикам болезней принадлежат и грибы, и оомицеты одним из которых является переносчик фитофтороза – *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary.

2. Ксерофильные – сухолюбивые, не переносящие высокой влажности и способные выдерживать сухость воздуха в сочетании с высокой температурой. У них хорошо развиты механизмы регуляции водного обмена и приспособления к удержанию воды в теле. К этой группе относятся некоторые представители насекомых – вредителей сельскохозяйственных культур, в частности, саранчовые. Они получают воду с пищей, а также избегают дефицита влаги путем отложения жиров, при окислении которых образуется небольшое количество воды.

3. Мезофильные – организмы, обитающие в условиях умеренной влажности и сравнительно легко переносящие ее колебания. Эта группа самая многочисленная, к ней относятся и многие насекомые, в том числе опасный вредитель картофеля и некоторых других овощных культур – колорадский жук (*Leptinotarsa decemlineata* Say).

Совокупность всех процессов поступления, передвижения и расхода воды на территории конкретного географического региона определяет его водный режим. Основным источником поступления влаги служат атмосферные осадки, количество и распределение которых во времени зависят от климата данной местности и метеорологических условий отдельных лет. Однако живые организмы могут получать воду и из других источников –

близлежащих водоемов, грунтовых вод, конденсата водяного пара из атмосферы, почвенной влаги, растений. Наиболее часто используемыми критериями для оценки влияния увлажненности территории на живые организмы являются:

- количество атмосферных осадков за определенный период (год, вегетационный период, сезон, период с суммой активных или эффективных температур, выше заданного порога), мм;
- относительная влажность воздуха (r) – отношение фактического парциального давления водяного пара P к давлению насыщенного водяного пара P^S при данной температуре, выраженное в процентах:

$$r = P/P^S \bullet 100\% \qquad (15)$$

Этот показатель, например, играет важную роль в жизнедеятельности и проявлении вредоносности оомицета *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, вызывающего наиболее опасное заболевание картофеля и томатов во всем мире – фитофтороз:

- влажность почвы, выраженная в % от полной полевой влагоемкости (ППВ), то есть того количества воды, которое необходимо для заполнения всего порового пространства почвы. Этот критерий имеет первостепенное значение для вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур или их промежуточных стадий, обитающих в почве (фитопаразитические нематоды, личинки насекомых);
- продолжительность почвенных и атмосферных засух, определяемая числом дней без осадков в течение определенного временного интервала (год, месяц и т.д.) и связанная с этим показателем продолжительность осадков, т.е. число дней с осадками за тот же период;
- степень неравномерности в годовом распределении осадков, характеризующаяся показателем неравномерности w:

$$w = (\sum|m_i - R/12|)/R, \qquad (16)$$

где R – годовая сумма осадков, $\sum|m_i - R/12|$ – сумма абсолютных величин разностей между количеством осадков каждого месяца и 1/12 частью годовой суммы осадков (Хромов, Петросянц, 2012).

При изучении ареала распространения того или иного вида важно оценивать и близость или удаленность различных водоемов (рек, прудов, озер), которые также могут стать для них источником влаги. Для обитающих в почве популяций фитопаразитических нематод важным критерием оценки их распространения является уровень залегания грунтовых вод, зависящий от геоморфологического характера местности (Романенко, 2000).

При анализе влияния влаги на живые организмы важно также учитывать и температурный режим среды обитания. Соотношение температуры и влажности характеризует климат конкретной территории и важно для выбора популяцией вида стации обитания. Фактор влажности, как правило, имеет первостепенное значение для распространения вида вблизи южных границ ареала, тогда как северные границы в большей степени определяются температурными критериями (Гиляров, 1990).

Для оценки совокупного влияния температуры и влажности на данной территории чаще всего используют следующие коэффициенты:

– гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова (1928):

$$\text{ГТК} = \frac{r}{0,1\Sigma T_{>10^0}}, \qquad (17)$$

где r – сумма осадков за выбранный временной период с температурой воздуха, превышающей 10°С, а $\Sigma T_{>10^0}$ – сумма активных температур воздуха выше 10°С за тот же период;

– радиационный индекс сухости (ИС) Будыко (1948):

$$\text{ИС}=R/Lr,$$

где R – годовой радиационный баланс подстилающей поверхности, Lr – сумма тепла, необходимая для испарения годового количества осадков r на той же площади (L – скрытая теплота парообразования).

Модельные методы оценок влияния климатических факторов на численность и возможные границы ареалов и зон массового размножения вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений в условиях наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений

Основой современных методов оценки последствий изменения климата для вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений является построение агроклиматических моделей, которые отражают как количественные взаимосвязи численности изучаемого биологического объекта и конкретных погодных условий, так и его возможное пространственное распространение и/или область массового размножения в зависимости от значений климатических показателей. Одно из направлений математического моделирования – построение уравнений, характеризующих взаимосвязи в системах: «растение – вредитель – среда обитания» или «вредитель – урожай», которые позволяют количественно описать наблюдаемые в них взаимоотношения (Вольвач, 1987; Малинина, 1984; Полуэктов и др., 1981; Сагитов и др., 1987; Ройтман и др.. 2002).

Другим методом моделирования является картографический метод, который заключается в том, что полученные с помощью расчетных моделей ряды данных наносятся на картографическую основу и сравниваются визуально. С помощью таких моделей также можно оценивать произошедшие за разные временные периоды изменения выбранных климатических параметров, оказывающих наиболее существенное влияние на распространение и развитие вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений, в заданный временной интервал.

В качестве исходной метеорологической информации для оценки последствий изменения климата для вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений на территории России и стран бывшего СССР используются ряды среднесуточных значений данных измерений температуры воздуха и количества осадков (мм), полученные из сети метеорологических станций международного

обмена, расположенных на территории России и соседних стран. Такие ряды периодически размещаются на сайте Всероссийского института гидрометеорологической информации − Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета) в сети Интернет для свободного использования (http://www.meteo.ru). Результаты и методика расчета и определения изменений климата для подобных моделей представлены в следующих работах: Семенов, Гельвер, 2002, Семенов и др., 2006, Ясюкевич и др., 2007, 2011; Попова, Попов, 2009: Попова, 2011.

Основой для выделения параметров модели служат имеющиеся в различных литературных источниках данные о распространении и массовых вспышках размножения вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений на территории России и соседних стран, а также значения различных климатических величин, определяющие их распространение, размножение и развитие. При исследовании зависимости того или иного вида от климатических факторов и их изменения во времени часто выделяют так называемый «климатический ареал» – часть пространства, где условия климата допускают устойчивое существование вида. Для его выделения используют как известные климатические параметры, определяющие границы ареала вида, так и подобранные при сопоставлении сформировавшихся устойчивых границ ареала вида с изолиниями климатических величин, проходящих в непосредственной близости от этих границ.

В дальнейшем для выбранных климатических величин, определяющих климатический ареал вида, рассчитывают средние значения за исследуемый период (или периоды). На основе полученных пространственных и временных рядов климатических данных строят климатические карты, которые потом сравнивают с картами распространения и зон массового размножения изучаемого патогенного вида. Данный метод позволяет, как уточнять современные климатические границы распространения и массового размножения отдельных биологических объектов, так и прогнозировать их дальнейшее смещение при изменении отдельных климатических величин или их совокупности.

Результаты и обсуждение

Моделирование границ ареалов и зон массового размножения отдельных вредителей сельскохозяйственных растений, формирующихся в условиях глобальных климатических изменений

В качестве объектов исследования мы взяли два наиболее опасных вида насекомых-вредителей сельскохозяйственных растений на территории России – итальянского пруса (*Calliptamus italicus* L.) – представителя саранчовых и колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say), причиняющих значительный ущерб сельскому хозяйству. Для выяснения возможного смещения границ их ареалов и зон массового размножения были проведены модельные картографические оценки на основе имеющихся данных о температурных критериях, ограничивающих возможное распространение и массовое размножение этих двух видов.

Для построения климатического ареала, ограничивающего массовое размножение и развитие итальянского пруса в северном направлении, выбраны следующие параметры:

- сумма активных среднесуточных температур воздуха (> 10°C) должна быть больше или равна 2250°C (Попова, Попов, 2009);
- количество осадков за вегетационный период с мая по сентябрь должно составлять менее 400 мм (Никитенко, 2004).
- В качестве критериев возможного ограничения ареала колорадского жука на территории России использованы:
- сумма эффективных температур воздуха, составляющая 360°C при нижнем пороге 11,5°C, которая необходима для развития хотя бы одной генерации вредителя (Злотников, 1967);
- среднегодовая температура воздуха, находящаяся в пределах от 0 до 20°C (Trouvelot, 1936).

Далее на основе выбранных величин были построены модельные климатические ареалы итальянского пруса и колорадского жука за два временных периода: 1951-1970 гг. и 1991-2010 гг. (рис. 3, 4). На построенных картах видно существенное продвижение границ климатических ареалов вредителей в северном и северо-восточном направлениях, что свидетельствует о потеплении

климата на этих территориях. Незначительное сокращение климатического ареала итальянского пруса в районе Северного Кавказа связано с увеличением в этом регионе количества осадков.

Рис. 3. *Изменение модельного климатического ареала итальянского пруса (Calliptamus italicus L.) на территории России и соседних стран в 1991-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1970 гг.*

1 – территория вне границ климатического ареала итальянского пруса в оба периода; 2 – территория сокращения климатического ареала итальянского пруса в 1991-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1970 гг.; 3 – территория приращения климатического ареала итальянского пруса в 1991-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1970 гг.; 4 – территория климатического ареала итальянского пруса в оба периода

Рис. 4. *Изменение климатического ареала колорадского жука (Leptinotarsa decemlineata Say) на территории России и соседних стран в 1991-2010 гг. по сравнению с 1951-1970 гг.*
1 – территория вне границ климатического ареала в оба указанных периода; 2 – территория приращения климатического ареала в 1991-2010 гг. по сравнению с 1951-1970 гг.; 3 – территория, входящая в климатический ареал в оба периода времени.

Полученные модельные данные по изменению границ зоны массового размножения итальянского пруса вполне согласуются с данными экологических и сельскохозяйственных наблюдений за состоянием и географическим местонахождением популяций этого опасного насекомого-вредителя. Так, зафиксировано появление и массовое размножение итальянского пруса в тех районах, где ранее его распространение не отмечалось или носило спорадический

характер. Это характерно для Среднего Поволжья (Татарстан, Пензенская, Самарская и Ульяновская области), южного Урала (Башкортостан, Челябинская и Оренбургская области), юга Сибири (Алтайский край, Омская, Новосибирская и Оренбургская области), южных областей Центрально-Черноземного района (Белгородская и Воронежская области). Именно в этих районах в последние годы наблюдаются вспышки массового размножения вредных саранчовых (Сергеев, 2010; Долженко, 2011; Саранчовые вредители, 2012).

Другой вредитель – колорадский жук – также значительно продвинулся далее на север и распространился в ряде районов, где его акклиматизация ранее считалась невозможной. Это юг Карелии, Архангельской области, Республики Коми – до 62-63º с.ш. Но более значительно в последние годы расширился ареал колорадского жука в восточном направлении, на территории Сибири, где нами отмечено увеличение его климатического ареала (рис. 4). В настоящее время расселение колорадского жука на территории Сибири достигло южных районов Красноярского края, куда вредитель проник в последние годы (Павлюшин и др, 2009; Рябова 2011). Именно здесь, у границы с Иркутской областью заканчивается его климатический ареал, сформировавшийся в период 1991-2010 гг. Если тенденция дальнейшего потепления климата сохранится и в последующие годы, то колорадский жук сможет благополучно продолжить свое продвижение в восточные и северо-восточные районы РФ. Заселение колорадским жуком Приморского края и его появление в Амурской области и Хабаровском крае, наблюдаемое в последние годы (Мацишина, 2012; Вредители и болезни картофеля, 2012), согласно рассчитанному по выбранным температурным критериям климатическому ареалу вполне закономерно и является следствием природных возможностей колорадского жука, заселяющего доступные для него регионы. В дальнейшем, исходя из полученного модельного ареала, колорадский жук может продвинуться в северном направлении на Дальнем Востоке, а также заселить южную часть острова Сахалин. Кормовая база вряд ли станет ограничивать дальнейшее распространение колорадского жука и итальянского пруса, потому что являющийся основным источником питания для колорадского жука картофель имеет более широкий ареал (к тому же колорадский жук способен питаться и на некоторых других видах пасленовых растений (Ясюкевич и др., 2007)), а пищевые предпочтения саранчовых достаточно разнообразны.

Прогнозирование дальнейших изменений климатических величин и связанных с ними границ климатических ареалов вредителей сельскохозяйственных растений на территории России

Наблюдаемое в настоящее время смещение границ климатических ареалов опасных вредителей сельскохозяйственных растений на территории России, о чем было сказано в предыдущей главе, ставит перед нами закономерный вопрос, до каких же пределов могут увеличиться эти границы в будущем? Ответ на этот вопрос очень важен при планировании своевременных защитных мероприятий, которые позволят снизить потери урожая при вторжении этих биологических объектов в новые регионы. Для прогнозирования и оценки дальнейшего изменения климатических ареалов вредителей может быть предложено несколько методов. Один из них – метод линейной экстраполяции. Он заключается в следующем. Выбираются два временных интервала. На основе имеющихся климатических данных рассчитываются средние климатические значения и/или прикладные климатические индексы (например, сумма активных или эффективных температур) за каждый из этих периодов, которые затем интерполируются на центры квадратов градусной сетки 1° × 1°, как показано в работе (Семенов и др., 2006). Затем рассчитывается разность между средними значениями за оба эти периода. Далее эта разность прибавляется ко всем значениям более позднего временного интервала, и строятся новые ряды данных, отображающие прогнозные значения климатических параметров, которые будут наблюдаться в следующий промежуток времени. Таким образом, данный метод позволяет оценить изменения климатических значений и связанных с ними границ климатических ареалов вредителей сельскохозяйственных растений при условии, что в дальнейшем климат будет изменяться таким же образом, как это наблюдалось за

прошедшие годы, т.е. при условии сохранения наблюдаемого линейного тренда. Подобная методика была применена при расчете дальнейшего расширения ареала колорадского жука (*L. decemlineata*) на территории России (Попова, Семенов, 2013).

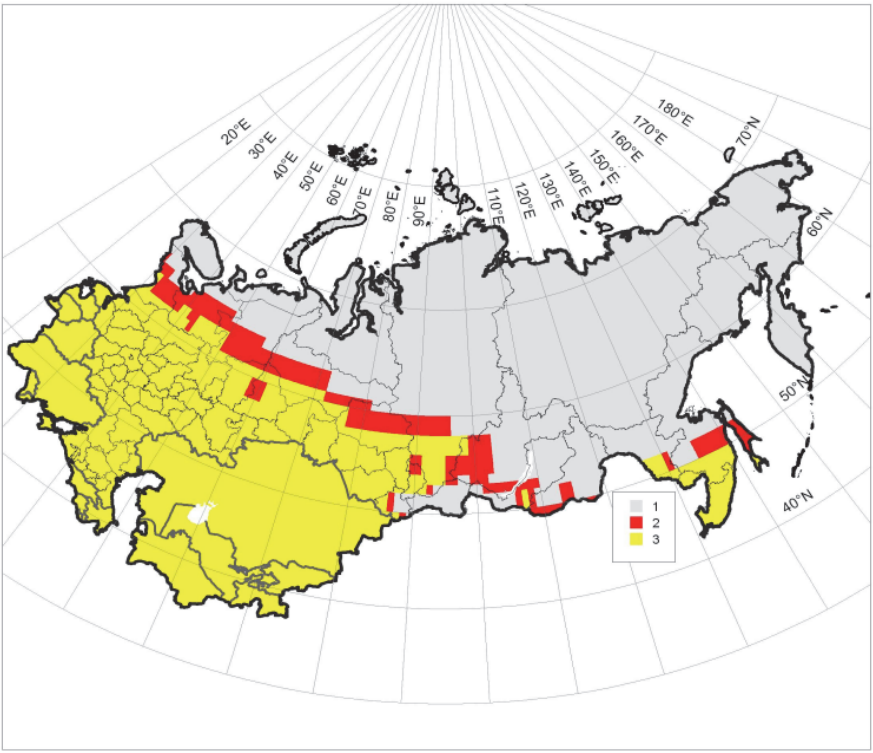

Рис. 5. *Потенциальное изменение климатического ареала колорадского жука (Leptinotarsa decemlineata Say) на территории России и соседних стран в 2031-2050 гг. по сравнению с 1991-2010 гг. при сохранении наблюдаемых тенденций изменения климата.*
1 – территория вне границ климатического ареала в оба указанных периода; 2 – территория приращения климатического ареала в 2031-2050 гг. по сравнению с 1991-2010 гг.; 3 – территория, входящая в климатический ареал в оба периода времени.

При этом на основе разности значений за периоды 1951-1970 гг. и 1991-2010 гг. было оценено возможное изменение климатического ареала *L. decemlineata*, рассчитанного по перечисленным в предыдущем разделе критериям, которое будет наблюдаться в период 2030-2050 гг. (рис. 5).

Следующий метод оценки изменения климата и, как следствие, изменения климатических ареалов вредителей сельскохозяйственных растений заключается в моделировании новых климатических показателей, полученных из расчета, что средняя за базовый период температура воздуха в каждой ячейке квадратов с выбранным разрешением (1°×1°, 5°×5° и т.д.) на исследуемой территории увеличится на определенную величину. В самом простом случае при аппроксимированной оценке эта величина будет одинаковой для всего выбранного пространства, при более точном анализе она будет варьировать в зависимости от особенностей местных климатических условий, учтенных тем или иным способом. Нами были рассчитаны прогнозируемые климатические величины, которые будут наблюдаться при увеличении средней по сравнению с периодом 1991-2010 гг. температуры воздуха на 1°С, 1,3°С и 1,5°С, в каждой ячейке градусной сетки 1°×1° на территории России и сопредельных стран. На основе полученных значений был смоделирован новый климатический ареал колорадского жука по тем же критериям. На рисунках (рис. 6 а-в) показано закономерное расширение этого ареала при различном увеличении средней среднегодовой температуры воздуха. Климатический ареал колорадского жука, соответствующий увеличению средней среднегодовой температуры воздуха на 1,3°С (6б) наиболее сходен с тем, который был рассчитан нами методом линейной экстраполяции для периода 2030-2050 гг. Это вполне объяснимо, так как мы использовали данные за период, когда линейный тренд температуры воздуха имел сходную величину. Так в целом по России прирост среднегодовой температуры приземного воздуха за 100 лет (1907-2006 гг.) составил 1,29°С, а за последние десятилетия (1976-2006гг.) – 1,33°С (Оценочный доклад…, 2008а).

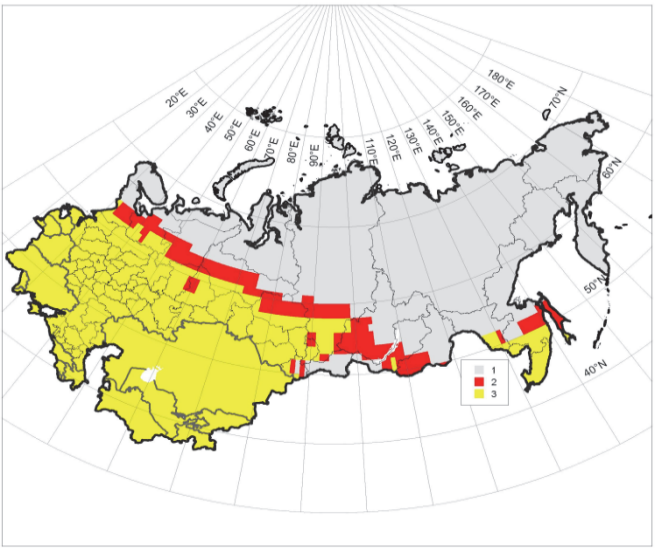
20°E
30°E
40°E
50°E
60°E
70°E
80°E
90°E
110°E
120°E
130°E
140°E
150°E
160°E
170°E
180°E
70°N
60°N
50°N
40°N
1
2
3

Рис. 6а.

20°E
30°E
40°E
50°E
60°E
70°E
80°E
90°E
110°E
120°E
130°E
140°E
150°E
160°E
170°E
180°E
70°N
60°N
50°N
40°N
1
2
3

Рис. 6б.

Рис. 6в.

Рис. 6 (а, б, в). *Потенциальное расширение климатического ареала колорадского жука (Leptinotarsa decemlineata Say) на территории России и соседних стран при увеличении средней среднегодовой температуры воздуха на 1°С (а), 1,3°С (б) и 1,5°С (в) по сравнению с нормой 1991-2010 гг. 1 – территория вне границ климатического ареала колорадского жука; 2 – территория приращения климатического ареала колорадского жука при увеличении температуры воздуха; 3 – территория, входящая в климатический ареал как до, так и после увеличения температуры воздуха.*

Наиболее сложный и трудоемкий метод прогнозирования будущих климатических изменений связан с созданием различных математических моделей. Методы такого модельного анализа могут быть весьма разными, но все они основаны на информации о «теоретической» зависимости состояния объекта

$$\bar{q}(t) = (q_1(t), q_2(t), \ldots, q_L(t))$$

от климатических $\bar{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), ..., x_K(t))$

и неклиматических $\bar{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \ldots, y_M(t))$ параметров среды: $\bar{q} = \Phi(\bar{x}, \bar{y})$, где Ф – некоторая вектор-функция (Методы оценки…, 2012). Чем точнее учтены все факторы и степень их влияния на

состояние выбранного объекта, тем точнее будет работать данная модель и тем реалистичнее будет сделанный с ее помощью прогноз. Для прогнозирования будущих климатических изменений и их последствий, в том числе связанных с изменениями состояния различных вредителей сельскохозяйственных растений, используют динамические модели природных систем. Под этим термином подразумевается вычислительная схема, позволяющая определять состояние природной системы в следующий момент времени, исходя из ее состояния в предыдущий момент (моменты) времени, а также учитывая внешние воздействия на систему. Наиболее сложными математическими моделями, относящимися к группе динамических, являются модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). С помощью этих моделей количественно описывается изменение во времени глобального климата со значительным пространственным разрешением. Они с очень большой степенью подробности учитывают свойства основных компонентов климатической системы Земли – гидросферы, атмосферы, почвы и биосферы, процессы, в них протекающие, а также их взаимодействия между собой и с внешними системами (в частности, с излучением Солнца). Несколько таких моделей создано в ведущих мировых климатических центрах (Climate Change 2007, 2007a). Принимая современное состояние климатической системы Земли за начальное условие, МОЦАО запускают, как правило, на мощных суперкомпьютерах и получают траекторию эволюции климатической системы в будущем (Методы оценки…, 2012). Для оптимизации полученных с помощью таких моделей прогностических данных применяют «ансамблевый» подход, при котором одновременно используют несколько МОЦАО, а затем результаты расчетов усредняют. При проведении расчетов используют различные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, в которых учитываются разные режимы глобальных антропогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу и степень будущего радиационного воздействия. С помощью полученных в результате запуска подобных моделей или их «ансамбля» климатических данных можно также рассчитать и предполагаемое изменение климатических ареалов различных сельскохозяйственных вредителей. Для построения прогнозируемого таким способом климатического ареала колорадского жука *(Leptinotarsa decemlineata* Say) были использованы данные,

полученные в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) и являющиеся осреднением результатов расчетов по 31 МОЦАО, которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей (CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5) и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли семейства RCP – Representative Concentration Pathways (Moss et al., 2008). Для своих расчетов мы выбрали климатические данные, соответствующие сценарию RCP8,5, который предполагает наиболее высокий уровень увеличения значений факторов, ведущих к общему потеплению климата, а именно, что радиационное воздействие в 2100 году будет более 8,5 Вт/м^2, а концентрация парниковых газов, соответствующая CO_2-эквиваленту, превысит 1370 *ppm* (Riahi, 2007; Moss et al., 2008). Прогнозируемый климатический ареал колорадского жука, построенный по вышеуказанным данным, относится к периоду, когда средняя по ансамблю глобальная температура воздуха увеличится на 2°С по отношению к доиндустриальному уровню, что соответствует увеличению этой температуры на 1,5°С по сравнению с уровнем 1981-2000 гг. и является неким критическим порогом дальнейшего потепления климата (рис. 7). По взятому нами сценарию RCP8.5 это произойдет в 2028-2047 гг.. Для сравнения на карте показан ареал колорадского жука для базового периода 1981-2000 гг., рассчитанный по температурным данным, взятым из работы (Rienecker et al., 2011) и используемый в модельном анализе, подготовленном ГГО, в качестве начальных условий при запуске моделей (рис. 7). При данной модельной оценке наблюдается не только уже отмеченное по другим расчетам расширение климатического ареала колорадского жука в северном и северо-восточном направлениях, но и его сокращение на юге. Это связано с тем, что при потеплении климата в соответствии с подобными модельными расчетами, среднегодовая температура воздуха превысит в этих районах значение 20°С, которое является верхним порогом, ограничивающем распространение *Leptinotarsa decemlineata*. При построении предполагаемого климатического ареала колорадского жука по ранее приведенным оценкам изотерма среднегодовой температуры воздуха 20°С проходила вне пределов изучаемого географического пространства (рис. 5-6 а-в).

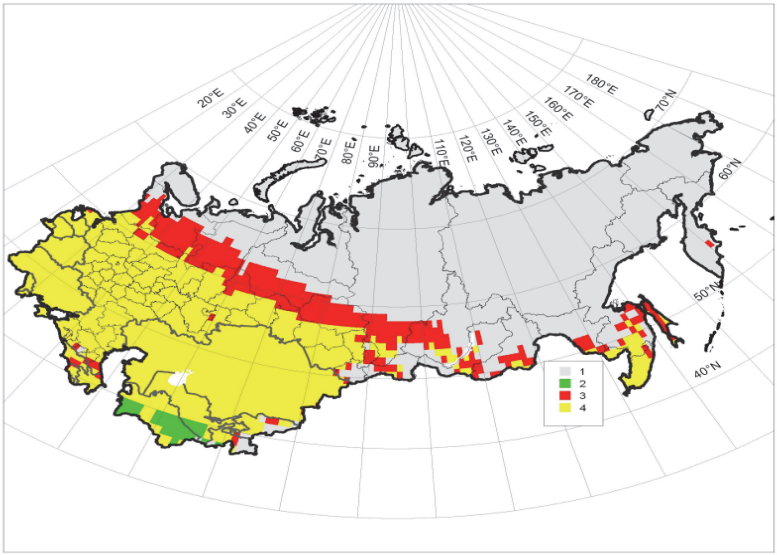

Рис. 7. *Потенциальные изменения климатического ареала колорадского жука на территории России и соседних стран, рассчитанные на основе климатических данных, полученных при использовании 31 модели МОЦАО по сценарию RCP8.5. Расчет производили относительно базового периода 1981-2000 гг. Потенциальные изменения относятся к временному интервалу 2028-2047 гг., когда согласно вышеуказанным модельным данным произойдет увеличение среднегодовой температуры воздуха на 2°С по сравнению с доиндустриальным периодом.*
1 – территория вне ареала вредителя; 2 – территория сокращения климатического ареала вредителя при увеличении среднегодовой температуры воздуха; 3 – территория приращения климатического ареала вредителя при увеличении среднегодовой температуры воздуха; 4 – часть климатического ареала вредителя, оставшаяся неизменной в оба исследуемых периода

Заключение

Большинство вредителей и возбудителей сельскохозяйственных растений, являясь эктотермными организмами, существенно зависят от температуры окружающей среды. Другой важный фактор в их распространении и развитии – характер увлажнения территории. Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения,

связанные, в первую очередь, с общим потеплением климата и изменением количества выпадающих осадков, неизбежно приводят к смещению границ ареалов и зон массового распространения отдельных вредителей и возбудителей сельскохозяйственных растений в ставшие более пригодными для их проживания регионы. По большинству расчетов, в том числе с помощью ансамбля сложных физико-математических моделей, климатические изменения на территории России в XXI веке, в основном, будут продолжать, а, возможно, и превосходить по своим масштабам и интенсивности тенденции, наблюдавшиеся в последнюю четверть XX, начале XXI веков (Climate Change 2007, 2007a, b, c; Оценочный доклад…, 2008а, б; Moss R. et al., 2008.). Это значит, что будут расширяться и границы ареалов многих вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений, как показано нами с помощью различно проведенных вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К. 1989. Экология. Особи, популяции и сообщества. –М.: Мир. Т. 1. 667 С.
2. Будыко М.И. 1948. Испарение в естественных условиях. –Л.: Гидрометеоиздат. 136 С.
3. Винберг Г.Г. 1968. Зависимость скорости развития от температуры. В кн.: Методы определения продукции водных животных. Методическое руководство и материалы. Под ред. Г.Г.Винберга. Минск: Вышейшая школа. 248 С.
4. Винберг Г.Г. 1983. Температурный коэффициент Вант-Гоффа и уравнение Аррениуса в биологии. Общая биология. Т. 44. № 1. С. 31-42
5. Вольвач В.В. 1987. Моделирование влияния агрометеорологических условий на развитие колорадского жука. –Л.: Гидрометеоиздат. 240 С.
6. Вредители и болезни картофеля. 2012. Фитосанитарный мониторинг. Защита растений. Официальный сайт ФГБУ «Россельхознадзор», www.rosselhoscenter.ru/index.../380-vrediteli-i-bolezni-kartofelya.
7. Гиляров А.М. 1990. Популяционная экология. –М.: Изд-во МГУ. 191 С.
8. Димо В.Н., Розов Н.Н. 1974. Термические критерии как основа фациально-провинциального разделения почв. Почвоведение. № 5. С. 12-22.
9. Долженко В.И. 2011. Фитосанитарная обстановка по саранчовым вредителям и луговому мотыльку по состоянию на июнь 2011 года. Фитосанитарный мониторинг 2011. Сайт РАСХН, отдел защиты растений: greenport.ru/fitosanitarnyij-monitoring.html.
10. Злотников М.Д. 1967. Возможный ареал распространения и сроки развития колорадского жука в Европейской части СССР. Труды Всесоюзн. н.-и. ин-та защиты растений. Вып. 27. С. 68-74.
11. Малинина В.Г. 1984. Математическая модель агроэкосистемы картофель − вредитель − среда обитания. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к. т. н. –Л.: 19 С.

12. Мацишина Н.В. 2012. Особенности биологии и экологии колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata (*Say, 1824) (Coleoptera, Chrysomelidae) в Приморском крае. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.б.н. Владивосток. 19 С.
13. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. 2012. Под ред. С.М. Семенова. –М.: НИЦ «Планета». 512С.
14. Никитенко Ю.В. 2004. Совершенствование системы мер борьбы с вредными саранчовыми (Orthoptera, Acridoidea) в условиях Ставропольского края. Диссертация на соиск. уч. ст. к.б.н. Ставрополь. 185 С.
15. Одум Ю. 1975. Основы экологии. –М.: Изд-во «Мир». 740 С.
16. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008а. Том I. Изменения климата. –М.: Росгидромет. 227 С.
17. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008б. Том II. Последствия изменений климата. –М.: Росгидромет. 288 С.
18. Павлюшин В.А., Сухорученко Г.И., Фасулати С.Р., Вилкова Н.А. 2009. Колорадский жук: распространение, экологическая пластичность, вредоносность, методы контроля. Приложение к журналу «Защита и карантин растений». № 3. 32 С.
19. Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов Н.А. 1981. Динамические модели экологических систем. –Л.: Гидрометеоиздат. 286 С.
20. Попова Е.Н. 2011. Изменение биоклиматических показателей на территории России в последние десятилетия. В кн.: Девятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Материалы Рос. конф. 3-6 октября 2011 г. Томск: изд-во Аграф-Пресс. С. 64-66.
21. Попова Е.Н., Попов И.О. 2009. Вредные саранчовые на юге России и климатические факторы, влияющие на их размножение и распространение. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 22. –М.: ИГКЭ. С. 124-146.
22. Попова Е.Н., Семенов С.М. 2013. Современные и ожидаемые изменения границ климатического ареала колорадского жука в России и соседних странах. Метеорология и гидрология. № 7. С. 103-110.
23. Ройтман В.А., Молоканова И.А., Казаков Б.Е., Беэр С.А., Перевертин К.А. 2002. К методологии изучения взаимодействующих паразитарных систем. В сб.: Теоретические и прикладные проблемы паразитологии. Труды Ин-та паразитологии. Отв. Ред. С.А. Беэр. Т. XLIII. –М.: Наука. С. 183-194.
24. Романенко Е.Н. 2000. Фауна почвенных нематод и почвенно-экологические закономерности их распространения. Диссертация на соиск. уч. ст. к.б.н. –М.: 267 С.
25. Рябова Н.В. 2011. Влияние экологических факторов на структуру и динамику численности популяции колорадского жука в условиях Кемеровской области. Диссертация на соиск. уч. ст. к.б.н. Кемерово. 185 С.
26. Сагитов А.О., Васильев С.В., Перевертин К.А. 1987. Методика по обработке данных полевого опыта и построению прогностических моделей с использованием вычислительной техники. Алма-Ата: изд-во «Кайнар». 41 С.

27. Саранчовые вредители. 2012. Фитосанитарный мониторинг. Защита растений. Официальный сайт ФГБУ «Россельхознадзор», www.rosselhoscenter.ru/index.php/.../231-saranchovye-vrediteli.
28. Селянинов Г.Т. 1928. О сельскохозяйственной оценке климата. Труды по с.-х. метеорологии. Вып. 20. С. 169-178.
29. Семенов С.М., Гельвер Е.С. 2002. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. Доклады РАН. Сер. Геофизическая. Т. 386. № 3. С. 389-394.
30. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. –М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.
31. Сергеев М.Г. 2010. Вредные саранчовые России и сопредельных регионов: прошлое, настоящее, будущее. Защита и карантин растений. № 1. С. 18-22.
32. Хромов С.П., Петросянц М.А. 2012. Метеорология и климатология. –М.: Изд-во Моск. университета. 582 С.
33. Шашко Д.И. 1967. Агроклиматическое районирование СССР. –М.: «Колос». 336С.
34. Ясюкевич В.В., Попова Е.Н., Гельвер Е.С., Ривкин Л.Е. 2007. Влияние климатических факторов на формирование ареала колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say). В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 21. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 348-379.
35. Ясюкевич В.В., Давидович Е.А., Титкина С.Н., Попова Е.Н., Ясюкевич Н.В. 2011. Изменения климата во второй половине XX века – начале XXI века и связанные с ними изменения потенциального ареала колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say). В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т.24. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 354-370.
36. Blunk M. 1923. Die Entwicklung von *Dytiscus marginalis* L. vom Ei bis zur Imago. Ztschr. Wisst. Zool. Bd. 121. S. 115-117.
37. Climate Change 2007, 2007a. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon S.D., Qin M., Manning Z., Chen M., Marquis K.B., Averyt M., Tignor M., Miller H.L. (Eds.)) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 P.
38. Climate Change 2007, 2007b. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E., Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976 P.
39. Climate Change 2007, 2007c. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (Eds.)), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 841 P.
40. Marzusch K. 1952. Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit von Lebensprozessen bei Insekten unter besonderer Berücksichtigung winterschlafender Kartoffelkäfer. Journal of comparative physiology. ISSN 1432-1351. V. 34. № 1. P. 75-92.
41. Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J. et al. 2008. IPCC Expert Meeting Report: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. 132 P.

42. Peairs L. 1927. Some phases of the relation of temperature to the development of Insects. Bull. West. Vd. Agr. Exper. Sta. V. 208. P. 1-62.
43. Trouvelot B. 1936. Le doryphore de pomme de terre en Amérique du Nord. Ann. epiphyt. N. S. V. 1. P. 277-336.
44. Riahi K., Gruebler A., Nakicenovic N. 2007. Scenarios of long-term socioeconomic and environmental development under climate stabilization. Greenhouse Gases – Integrated Assessment. Special Issue of Technological Forecasting and Social Change. V.74. №7. P.887-935. doi:10.1016/j.techfore.2006.05.026.
45. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R.D., Lucchesi R., Molod A.M., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C.R., Reichle R., Robertson F.R., Ruddick A.G., Sienkiewicz M., Woollen J. 2011. MERRA – NASA's Modern-Era Retrospective. Anal. Res. Appl., J. Climate. V. 24. P. 3624-3648, doi:10.1175/JCLID-11-00015.1.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ХОЗЯЙСТВЕННО ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Л.Ю. Новикова, И.Г. Лоскутов, Е.В. Зуев, О.Н. Ковалева, Е.А. Пороховинова, А.М. Артемьева, С.Д. Киру, Е.В. Рогозина*

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Б.Морская, 42, ГНУ ВНИИР им.Н.И.Вавилова Россельхозакадемии, *l.novikova@vir.nw.ru

Реферат. Исследованы тенденции в динамике хозяйственно ценных признаков сельскохозяйственных культур: яровой пшеницы, овса, ячменя, льна, капусты, картофеля. Данные получены в результате многолетних (20-50 лет) наблюдений за ростом и развитием сортов-стандартов при оценке коллекции растительных ресурсов ВИР им. Н.И. Вавилова. Был использован метод регрессионного анализа, в том числе в последовательных разностях. Для синхронно наблюдаемых культур и сортов («панельных данных») были построены объединенные модели. Было выявлено, что решающим климатическим фактором, вызывающим ускорение вегетации районированных ранее сортов, является рост эффективных температур выше 15°С. Это воздействие частично компенсируется увеличением продолжительности весеннего периода с температурами от 5 до 15°С и ростом осадков. В 2000 гг. наблюдались положительное влияние роста уровня агротехники. Для исследованных сортов были рассчитаны суммы активных и эффективных температур за вегетацию по рассчитанному для каждого сорта биологическому минимуму температур.

Ключевые слова. Изменения климата, регрессия в разностях, панельные данные, пшеница, овес, ячмень, лен, капуста, картофель.

THE ANALYSIS OF ECONOMICALLY VALUABLE CHARACTERS OF CROP VARIETIES AT NORTHWESTERN REGION OF RUSSIA UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

L.Yu. Novikova, I.G. Loskutov, E.V. Zuev, O.V. Kovaleva, E.A. Porokhovinova, A.M. Artemieva. S.D. Kiru, E.V. Rogozina*

N.I. Vavilov Research Institute of Plant Industry RAAS, 42, ul. B.Morskaya, St.-Petersburg, Russia, *l.novikova@vir.nw.ru

Abstract. Trends of long-term (20 – 50 years) series of economical valuable characters of wheat, oat, barley, flax, cabbage, potato varieties of collection of N.I. Vavilov Research Institute of Plant Breeding (VIR) were evaluated. The method of regression analysis, including in consecutive differences, was used. For synchronously observed crop varieties and cultivars (panel data) pooled models were constructed. It was shown that the climatic factor causing reduction of vegetation zoned before varieties is effective temperatures under 15°C growth. This effect may be partly compensated by precipitation growth and increasing duration of period with temperatures between 5 and 15°C. For the investigated accessions the sums of biological and effective temperatures with individual temperature threshold of vegetation were calculated.

Key words. Climate changes, regression in differences, panel data, wheat, oats, barley, flax, cabbage, potato.

Введение

Традиционной задачей ВИР им. Н.И. Вавилова является создание, поддержание и изучение мировой коллекции генетических ресурсов растений. Одним из ключевых моментов этой работы является экологическая оценка сортов. Н.И. Вавилов уделял большое внимание изучению климатических потребностей сортов культурных растений, связывая их с условиями в центрах происхождения видов (Вавилов, 1957). На первое место среди параметров «экологического паспорта» сорта он ставил различия в продолжительности периода вегетации и отдельных межфазных периодов. Начавшееся в 70 гг. XX века глобальное потепление вызвало изменение биоклиматического потенциала регионов. Тренды агроклиматических характеристик локальны и различны в различных регионах (Гордеев и др. 2008; Мищенко, 2009; Сиротенко и др., 2011): к середине XXI века прогнозируется рост урожайности зерновых на 10-20% в северных регионах Европейской территории России с достаточным увлажнением и снижение на 6-26% в южных (Гордеев и др., 2008). Актуальной задачей современного растениеводства является его адаптация к наблюдающимся изменениям климата, оптимизация видовой и сортовой структуры регионального растениеводства (Гордеев и др. 2008; Сиротенко и др.,

2011), внедрение на севере сортов, способных более полно использовать увеличивающийся вегетационный период, и более засухоустойчивых сортов на юге.

Целью данного исследования являлось уточнение тенденций и прогнозирование динамики хозяйственно ценных признаков сортов культурных растений на Северо-Западе РФ, где наблюдаются значительные изменения условий тепло- и влагообеспеченности вегетации сельскохозяйственных культур. Материалом для исследования послужили уникальные многолетние наблюдения за сортами, используемыми как стандарты при оценке коллекции ВИР. Эти сорта высеваются ежегодно в повторностях на протяжении многих лет и оцениваются по одной и той же методике. На текущий момент стандартами являются сорта, районированные в 50 − 80 гг. прошлого века, т.е. адаптированные к условиям до начала климатических изменений.

Для анализа действующих факторов и прогнозирования был использован регрессионный анализ. Поскольку изменения климата происходят на фоне агротехнических трендов, для исключения их влияния на зависимости от климатических факторов был использован анализ в разностях (Елисеева и др., 2007), позволивший существенно улучшить качество моделей. Для более общей оценки вклада различных агроклиматических факторов в изменчивость хозяйственно ценных признаков культур, были построены объединенные модели сортов в разностях, использующие логику исследования так называемых «панельных данных» (Елисеева, 2007).

Исследованные сорта охарактеризованы суммами активных и эффективных температур за вегетацию, причем минимальная температура вегетации определена для каждого сорта индивидуально. Эффективные температуры редко используются при агроклиматической оценке сортов и культур (Мищенко, 2009) из-за сложности их определения, однако обладают большей точностью, чем суммы активных температур. Точное определение температурных потребностей сортов может помочь при агроклиматическом районировании в складывающихся новых климатических условиях регионов.

Методы и материалы

Объектами исследования были длинные (20 − 50 лет) ряды наблюдений за хозяйственно ценными признаками сортов яровой

пшеницы, овса, ячменя, льна, капусты на полях Пушкинских лабораторий ВИР (г.Санкт-Петербург) и картофеля на Полярной опытной станции ВИР (Мурманская обл.). Анализировались продолжительность вегетации и межфазных периодов, высота, урожайность. Динамика агроклиматических показателей проводилась по данным ближайших метеостанций.

Методом регрессионного анализа были определены линейные тренды в динамике климатических характеристик и вегетационного периода сортов. Для каждого исследованного пункта и каждого сорта методом регрессии с последовательным включением переменных в пакете StatSoftStatistica 6,0 были построены регрессионные модели хозяйственно ценных признаков. В качестве возможных предикторов исследовались среднемесячные среднесуточные температуры, суммы осадков за месяц, обобщенные агроклиматические характеристики: даты устойчивого перехода температур через 10°С, 15°С, продолжительности периодов между ними, суммы температур и осадков, ГТК этих периодов. По полученным уравнениям были построены прогнозы продолжительности вегетации изученных сортов в случае продолжения наблюдающихся тенденций гидротермических показателей. В исследовании принят уровень значимости 5%.

Одна из проблем анализа климатической зависимости хозяйственно ценных признаков − наличие в многолетних наблюдениях агротехнического тренда (Сиротенко и др., 2011; Николаев, 1994; Руководство..., 1984). Например, повышение технологического уровня возделывания сои в Краснодарском крае 2000-х гг. способствовало получению высоких урожаев в годы с неблагоприятными климатическими условиями (Баранов, 2008). Для выделения собственно климатической составляющей существует несколько способов исключения тенденций из исследуемых рядов: включение в регрессионную модель времени в явном виде, анализ связей отклонений от трендов, анализ переменных в разностях (Елисеева и др., 2007). Из-за нелинейного характера агротехнических трендов в последние 30 лет был использован анализ в разностях.

Рассмотрим анализ в первых разностях. Предположим, что зависимость хозяйственно ценного признака y в момент времени t y_t аппроксимируется линейной зависимостью от климатической характеристики K_t, с коэффициентом регрессии b_K, и y_t линейно

растет со временем с повышением уровня агротехники со скоростью b:

$$y_t = a + b_K K_t + bt$$

Тогда анализ связи приростов переменных за год (разностей уровней соседних лет) позволяет определить коэффициент регрессии исходных уровней b_K хозяйственно ценного признака и климатической характеристики:

$$\Delta_t y = y_t - y_{t-1} = b_K (K_t - K_{t-1}) + b = b_K \Delta_t K + b$$

По формуле $b_K \Delta K$ можно сделать прогноз − рассчитать климатически обусловленной динамики признака по тенденции изменения климатической характеристики ΔK.

При параболическом агротехническом тренде климатическая тенденция выявляется при переходе к регрессии во вторых разностях, т.е. анализу связей разностей первых разностей (Елисеева и др., 2007), этот случай был исследован нами при анализе ряда урожайности сои длиной 37 лет (Сеферова и др., 2011).

Было получено, что ряд исследованных нами синхронно наблюдаемых культур и сортов имел сходную реакцию на изменение погодно-климатических условий, т.е. одинаковые спецификации регрессионных моделей (Новикова и др. 2011, 2012). Это позволило использовать логику анализа «панельных данных» (Елисеева и др., 2007) и создать объединенные модели для этих объектов (Новикова и др., 2011, 2012). Анализ в разностях дает возможность извлекать дополнительную информацию за счет увеличения объема выборки.

Исследованные сорта были охарактеризованы средней продолжительностью вегетации, суммами активных и эффективных температур за вегетацию. В основе определения сумм эффективных температур сорта лежит предположение о постоянстве сумм температур выше пороговой для каждого межфазного периода (Шиголев, 1951; Руководство..., 1984). Обозначим среднюю суточную температуру T, пороговую для сорта температуру B, тогда сумма эффективных температур за сутки $T - B$, за вегетацию продолжительностью L сут. их сумма постоянна, обозначим ее A:

$$\sum_l (T - B) = A\,, \quad \text{т. е.} \quad \sum_l T = A + BL$$

Тогда по графику зависимости сумм среднесуточных температур исследуемого периода (ΣT) от его продолжительности (L) определяют пороговую температуру как коэффициент регрессии B, и среднюю эффективную температуру сорта как A. Суммы температур за вегетацию имеют меньший коэффициент вариации, чем продолжительность вегетации, что подтверждается экспериментальными исследованиями (Шашко, 1958), а суммы эффективных температур имеют меньшую дисперсию, чем суммы температур за вегетацию, т.е. являются более стабильными оценками потребности сортов в тепле. Однако метод действует при зависимости темпов развития только от температуры (Шашко, 1958), были исследованы факторы, действующие на средние суммы эффективных температур сорта.

Наши предыдущие исследования (Новикова, 2012) опытов с выращиванием 9 образцов сои с умеренной фотопериодической чувствительностью в условиях Краснодарского края и Санкт-Петербурга показали, что продолжительность периода «всходы – цветение» в этих контрастных условиях значительно различалась. Однако по суммам активных и эффективных температур, определенных в Санкт-Петербурге, можно прогнозировать продолжительность периода «всходы – цветение» в Краснодарском крае, причем по суммам эффективных температур точность была выше.

Результаты

Изменения агроклиматических характеристик

В таблице 1 и на рис. 1 представлены оценки линейных трендов агрометеорологических показателей на полях Пушкинских лабораторий ВИР (1980 – 2012 гг.) и Полярной опытной станции ВИР (1980 – 2004 гг.). Наблюдался рост летних температур, особенно июля – августа, а также сумм температур за периоды устойчивого перехода температур через 5, 10, 15°С (рис. 1). В условиях Пушкинских лабораторий увеличилась продолжительность периода с температурами от 5 до 15°С весной. Осадки значимо не меняются, но наблюдается тенденция к их увеличению. На Полярной опытной станции ВИР с 1980 гг. также наблюдается тенденция к повышению теплообеспеченности, осадки значимо не меняются.

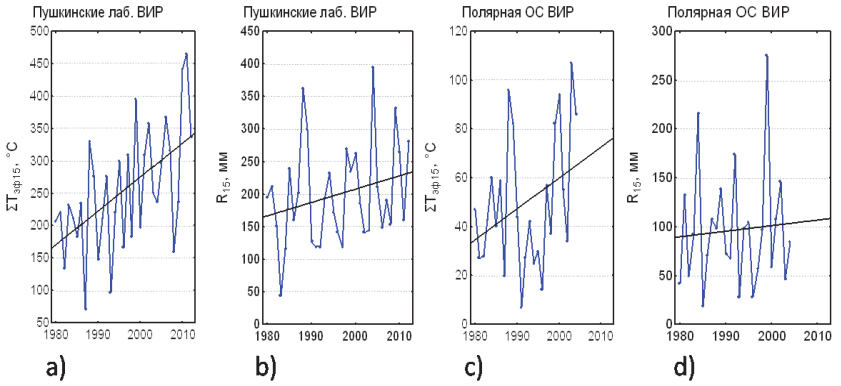

Рис. 1. *Динамика сумм эффективных температур ($\Sigma T_{эф15}$) и осадков (R_{15}) за период устойчивого перехода температур через 15°С в Пушкинских лабораториях ВИР (a, b) и на Полярной опытной станции ВИР (c, d), 1980 – 2012 гг.*

Динамика хозяйственно ценных признаков.

Динамика исследованных хозяйственно ценных признаков за полные периоды наблюдений, как, например, с 1954 г. у льна сорта Светоч, имела сложный нелинейный характер. Для оценки тенденций настоящего момента был взят период с 1980 г., когда началось активное воздействие климатических изменений. В таблице 2 представлены исследованные сорта и показаны линейные тренды в динамике хозяйственно ценных признаков с 1980 г.

Зерновые

Динамика вегетационного периода исследованных сортов показана на рис. 2. В Пушкинских лабораторий все исследованные сорта яровых зерновых показали тенденцию к сокращению вегетации. У сортов овса и ячменя при более ранних датах посева наблюдались все более ранние даты всходов, колошения, созревания. Сокращение вегетации происходило за счет сокращения продолжительности периода колошение – созревание, при этом период от всходов до колошения слабо удлинялся. Сокращение генеративной фазы происходило, очевидно, из-за роста температур июля – августа, а очень незначительное увеличение вегетативной фазы за счет роста температур весны, более раннего посева и

увеличения продолжительности периода с температурами от 10 до 15°С. Наблюдалось слабое уменьшение массы 1000 зерен у всех исследованных сортов зерновых, ряд отрицательных тенденций в динамике высоты и массы зерна с 1м^2, повышение массы зерна с 1м^2 и высоты растения и в 2000 гг., связанное возможно, с мелиорацией полей Пушкинских лаб.

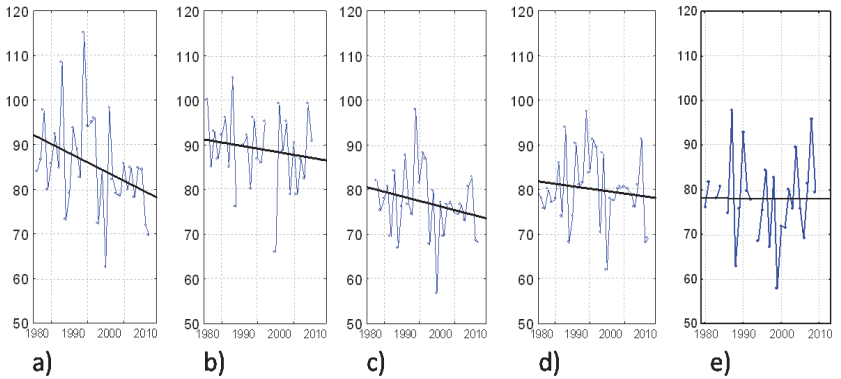

***Рис. 2**. Динамика продолжительности вегетации стандартных сортов овса, пшеницы, ячменя и льна в Пушкинских лабораториях ВИР, 1980 – 2011 гг., сутки: a) овес Боррус, b) пшеница Ленинградка, c) ячмень Белогорский, d) ячмень Московский 121, e) лен Светоч, f) картофель Хибинский ранний, Полярная опытная станция ВИР*

Лен

У льна сорта Светоч при более раннем посеве наблюдались более ранние всходы, цветение, желтая спелость. В период 1954 – 1979 гг. желтая спелость наступала в среднем 12 августа, в 1980-1999 – 6 августа, в 2000 – 2 августа. В 1980 – 2009 гг. слабо удлинялся период «всходы – цветение», а «цветение – созревание» сокращался, в итоге продолжительность периода «всходы – желтая спелость» практически не изменилась. Высота растения с 1980г. практически не менялась, существенно увеличившись в 1980 – 2009 гг. по сравнению с 1954 – 1979 (88,8 – 99,1 см средние по периодам соответственно). Продуктивность по соломе, семенам и волокну показали нелинейные тенденции с минимумом в 90-гг. XX века и повышением в 2000 гг.

Капуста

У исследованных в условиях Пушкинских лабораторий сортов белокочанной капусты и кольраби наблюдалось сокращение периода от всходов до начала хозяйственной спелости, у цветной капусты тенденции в динамике нет. Два сорта белокочанной капусты достоверно снизили массу кочана (Номер первый Грибовский 147 и Слава Грибовская 231), у остальных тенденции были слабыми, в двух случаях также отрицательными.

Таблица 1.

Оценка скорости изменения агроклиматических характеристик, Пушкинские лаборатории ВИР 1980 – 2012 гг., Полярная опытная станция ВИР 1980 – 2004 гг. Подчеркнуты значимые изменения.

Показатель	Пушкинские лаб. ВИР	Полярная ОС ВИР
Сумма активных температур за период устойчивого перехода температур через 15°С ($\Sigma T_{акт15}$)	**<u>15,73</u>**	5,69
Сумма эффективных температур за период устойчивого перехода через 15°С ($\Sigma T_{эф15}$)	**<u>5,23</u>**	1,27
Осадки за период устойчивого перехода температур через 15°С (R_{15})	2,42	0,57
Продолжительность периода между датами устойчивого перехода температур через 5 и 15°С весной ($L_{5–15}$)	**<u>0,53</u>**	0,14
Продолжительность периода между датами устойчивого перехода температур через 10 и 15°С весной ($L_{10–15}$)	0,47	0,26

Картофель

Картофель Хибинский ранний, являющийся стандартом на Полярной опытной станции ВИР, интересен в качестве сорта, возделываемого при крайнем дефиците тепла за Полярным кругом. Даты посадки, всходов практически не изменились с 1968г. В 1980-2000 гг. даты бутонизации, цветения и, в меньшей степени, уборки показали тенденцию к смещению на более ранние сроки. В этот период достоверно (табл. 2) увеличилась масса клубней с куста, сократились периоды «посадка – бутонизация», «посадка – цветение», несколько увеличилась продолжительность «цветение – уборка».

Таблица 2.

Скорости изменения хозяйственно ценных признаков изученных сортов с 1980г. Подчеркнуты значимые тренды.

Культура	Сорт	Годы изучения	Всходы – цветение, сут/год	Цветение – созревание, сут./год	Вег. период, сут./год	Высота, см/год	Масса 1000 зерен, г/год	Урожайность, г/год	
Овес	Боррус	1980-2011	0,05	**−0,46**	**−0,41**	−0,26	−0,40	Масса зерна с 1 м^2	1,90
Пшеница	Ленинградка	1972-2009	0,07	−0,23	−0,14	0,27	−0,14		−2,12
Ячмень	Белогорский	1982-2011	0,06	**−0,26**	−0,21	0,06	−0,02		2,38
	Московский 121	1975-2011	0,03	−0,13	−0,09	−0,29	−0,03		−1,15
Лен	Светоч	1954-2009	0,15	−0,14	0,01	−0,04	—	—	
Капуста белокочанная	Номер первый Грибовский 147	1980-2012	—	—	**−0,49***	—	—	Масса кочана, г/год	**−26,9**
	Слава Грибовская 231	1980-2012	—	—	−0,39*	—	—		**−40,1**
	Амагер 611	1980-2012	—	—	**−0,68***	—	—		−20,8
Кольраби	Венская белая 1350	1980-2012	—	—	−0,14*	—	—		4,2
Цветная капуста	МОВИР-74	1980-2012	—	—	−0,01*	—	—		−16,7
Картофель	Хибинский ранний*	1968-2012	**−0,52****	0,40**	−0,12**	—	—	**16,12****	

**У сортов капусты указана динамика продолжительности периода всходы – начало хозяйственной спелости*

***Картофель Хибинский ранний исследовался на Полярной ОС ВИР. Указаны продолжительности периодов «посадка – цветение», «цветение – уборка», «посадка – уборка», масса клубней с куста*

Регрессионные модели

Для построения регрессионных моделей использовались данные за весь период наблюдения. Для расчета прогнозов использовались последние тенденции, рассчитанные с 1980г. и показанные на рис. 2 – 4.

Зерновые

Были построены регрессионные зависимости продолжительности вегетационного периода стандартных сортов овса, пшеницы и ячменя от климатических характеристик. Значения переменных указаны в таблице 1, R^2 – коэффициент детерминации уравнения:

Овес Боррус $L = 110{,}614 - 0{,}101\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}65$

Пшеница Ленинградка $L = 108{,}809 - 0{,}083\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}60$

Ячмень Белогорский $L = 92{,}402 - 0{,}061\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}53$

Ячмень Московский 121 $L = 94{,}705 - 0{,}059\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}51$

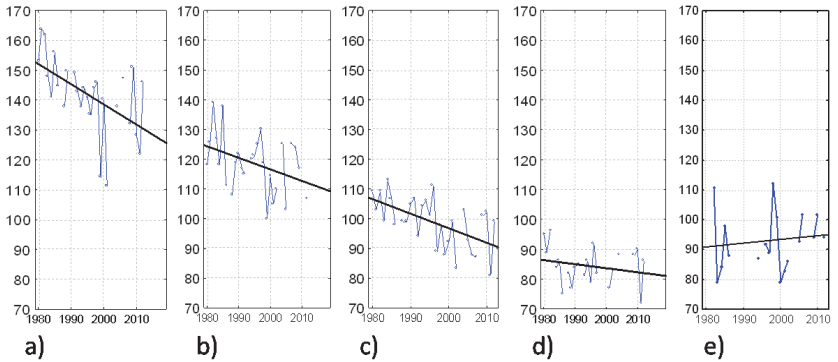

Рис. 3. *Динамика продолжительности периода «всходы – начало хозяйственной спелости» стандартных сортов капусты в Пушкинских лабораториях ВИР, 1980 – 2012 гг., сутки: a) Белокочанная поздняя Амагер 611, b) Белокочанная среднеспелая Слава Грибовская 231,c) Белокочанная скороспелая Номер первый Грибовский,d) Кольраби Венская белая 1350, e) Цветная МОВИР-74*

Выяснилось, модели продолжительности вегетации сортов овса, пшеницы и ячменя имели сходные спецификации. Решающим климатическим фактором, оказывавшим отрицательное влияние на продолжительность вегетации, был рост эффективных температур выше 15°С. Этот фактор обусловил более 50% наблюдавшейся дисперсии продолжительности вегетации по годам.

Общность предикторов позволила сформулировать обобщенные уравнения для овса, пшеницы, ячменя в разностях, т.к. абсолютные значения продолжительностей вегетации исследованных сортов различались:

$$\Delta L = 0{,}297 - 0{,}089\Delta\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}67$$

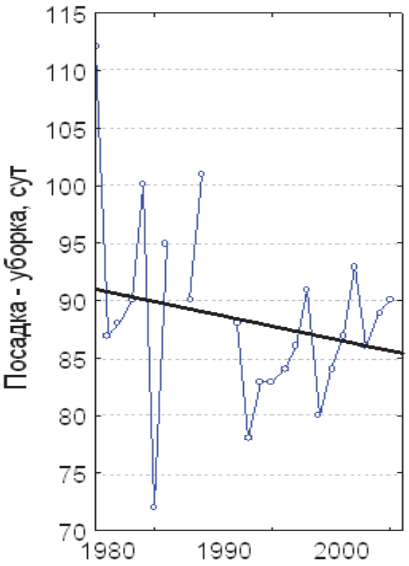

Рис. 4. *Динамика продолжительности вегетации картофеля сорта Хибинский на Полярной опытной станции ВИР, 1980 – 2004 гг.*

Лучшие регрессионные модели для признаков высота растения, масса 1000 зерен, урожайность получились в разностях, что отражает более выраженное влияние агротехники на эти признаки, чем на фенологию. Так, например, высота растений пшеницы в Пушкинских лаб. уменьшалась с ростом сумм температур выше 15°С. На рис. 5 показана динамика высоты растения и суммы температур выше 15°С, взятая с обратным знаком: 5a) в исходных уровнях и 5b) первых разностях. Виден сдвиг высоты растения при сохранении синхронности зависимости в 2000 гг., который, возможно, связан с мелиорацией полей Пушкинских лаб. в 2001г. Корреляция исследуемых признаков была равна −0,3 в исходных уровнях и достигла −0,7 в первых разностях.

Уравнения менее детерминированы погодными условиями. Для сортов стандартов овса, пшеницы, ячменя на четырех станциях ВИР получились следующие объединенные уравнения в разностях:

Высота растения (H):

$$\Delta H = -0{,}103 - 0{,}084\ \Delta\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}32$$

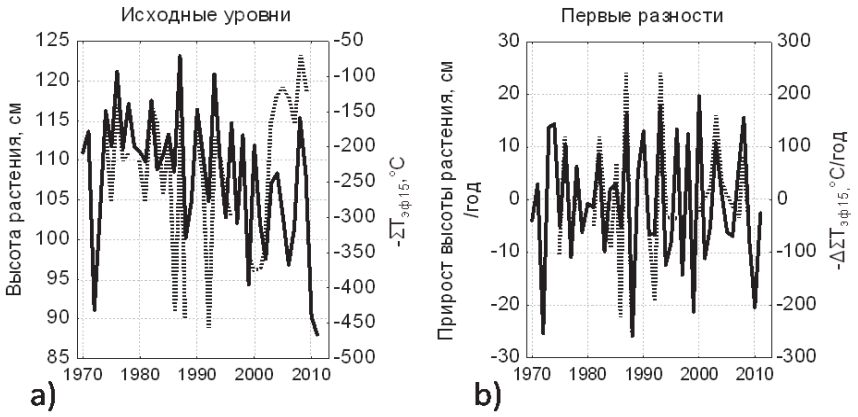

Рис. 5. *Динамика высоты растения пшеницы Ленинградка 1972–2009 гг.(пунктирная линия) и взятых с обратным знаком сумм температур выше 15°С (сплошная линия) в исходных уровнях (а) и в первых разностях (b), Пушкинские лаборатории ВИР.*

Для формирования массы 1000 зерен не обнаружена связь с климатическими условиями, что, возможно, является следствием консервативности этого признака и опосредованного характера его формирования.

Масса зерна с 1м^2 (Y) зависела от эффективности прохождения вегетативного и генеративного этапов посредством зависимости от высоты растения и массы 1000 зерен:

$$\Delta Y = -3{,}477 + 4{,}020\ \Delta H + 7{,}7677\Delta M_{1000} R^2 = 0{,}31$$

Лен

На продолжительность периода от всходов до цветения с одной стороны отрицательно влияет рост температур июня, с другой – положительно − удлинение весеннего периода с температурами 5 – 15°С и более ранние всходы:

$$L_{\text{всходы-цветение}} = 68{,}166 - 2{,}003T_{\text{июнь}} + 0{,}171L_{5-15} R^2 = 0{,}63$$

Сокращение продолжительности периода цветение – желтая спелость связано с ростом температур июля:

$$L_{\text{цветение-желтая спелость}} = 92{,}453 - 3{,}127T_{\text{июль}} R^2 = 0{,}68$$

Продолжительность всходы – желтая спелость льна также более чем на 50% детерминируется суммой эффективных температур выше 15°С:

$$L = 93{,}099 - 0{,}086\ \Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}68$$

Получим уравнение для скорости изменений вегетационного периода в разностях. Зависимость получается такой же детерминированности:

$$\Delta L = 0{,}417 - 0{,}095\Delta\ \Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}66$$

На показатели продуктивности по соломе и волокну положительное влияние оказывают более ранние всходы (r = −0,39, r = −0,46), высота наиболее сильно связана с годом возделывания, т.е. с агротехническими особенностями.

Капуста

Построены модели продолжительности периода «всходы – начало хозяйственной годности» (L) для 5 сортов-стандартов:

Белокочанная поздняя Амагер 611 – уравнение лучше в первых разностях:

$$\Delta L = -1{,}058 - 0{,}051\Delta\Sigma T_{эф15} + 0{,}094\Delta R_{15} R^2 = 0{,}59$$

Белокочанная среднеспелая Слава грибовская 231

$$L = 140{,}964 - 0{,}068\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}41$$

Белокочанная скороспелая Номер первый грибовский 147

$$L = 114{,}893 - 0{,}072\Sigma T_{эф15} + 0{,}015 R_{15} R^2 = 0{,}52$$

Кольраби Венская белая 1350

$$L = 95{,}522 - 0{,}035\Sigma T_{эф15} R^2 = 0{,}25$$

Цветная МОВИР-74

$$L = 82{,}942 + 7726\Gamma TK_{15} R^2 = 0{,}15$$

Модели выявили решающую роль температурного фактора из всех исследованных погодных факторов в регуляции продолжительности исследуемого периода у видов капусты, это оказались эффективные температуры выше 15°С и осадки за этот период.

Для сортов белокочанной капусты со сходной реакцией на $\Sigma T_{эф15}$ было создано объединенное уравнение в разностях для скорости

динамики продолжительности периода «всходы – начало хозяйственной спелости»:

$$\Delta L = -1{,}644 - 0{,}047\Sigma T_{эф15} + 0{,}047R_{15}\ R^2 = 0{,}39$$

Отрицательный свободный член уравнения свидетельствует о невыявленном отрицательном воздействии на продолжительность исследуемого периода. Средняя масса кочана всех сортов капусты положительно связана с осадками августа – сентября, которые увеличиваются, т.е. объяснения падению урожайности найти не удалось.

Картофель

У картофеля сорта Хибинский ранний на Полярной опытной станции ВИР роль основного регулирующего климатического фактора играли температуры выше 15°С, их рост вызывал сокращение периода посадка – цветение и удлинение периода «цветение – уборка»:

$$L_{посадка-цветение} = 64{,}752 - 0{,}035\Sigma T_{акт15}\ R^2 = 0{,}63$$

$$L_{цветение-уборка} = 21{,}216 + 0{,}041\ \Sigma T_{акт15}\ R^2 = 0{,}52$$

Из-за разнонаправленных тенденций воздействия температур для периода «посадка – уборка» уравнения зависимости от климатических условий не получается, но можно ожидать увеличения продолжительности вегетации с ростом температур, т.к. скорость роста продолжительности периода «цветение – уборка» выше. В 90 гг. продолжительность периода от посадки до уборки возрастала. Положительное влияние ускорения развития на начальных фазах на севере с ростом температур отмечено в литературе (Котова, 2009).

Продуктивность картофеля Хибинский ранний на ПОС ВИР менее зависима от климатических характеристик, чем продолжительности межфазных периодов. Масса клубней с растения наиболее сильно связана с датой цветения ($r = -0{,}52$) – чем раньше цветение, тем больше масса клубней.

По средним скоростям изменений климатических характеристик были рассчитаны прогнозы скорости изменения вегетационного периода однородных групп сортов (табл. 3). Последний столбец

таблицы 3 рассчитан по обобщенному уравнению в разностях без свободного члена, т.е. представляет собой климатически обусловленный тренд. Прогнозируется сокращение вегетационного периода из-за решающего значения роста температур по сравнению с другими факторами, частично этот эффект может быть компенсирован ростом осадков или более ранним посевом. Для большинства рядов реальные тенденции оказались выше расчетных (положительный посторонний тренд), возможно, за счет положительных агротехнических трендов 2000 гг. В объединенном уравнении для образцов капусты – отрицательный посторонний тренд.

Оценка температурных требований сортов

Для сортов зерновых с известными датами всходов и созревания были рассчитаны суммы температур, накапливаемых за вегетацию, за каждый год исследования. Это позволило определить пороговую температуру сорта и сумму температур выше пороговой (эффективных) за каждый год исследованием коэффициентов регрессии сумм накопленных за вегетацию температур от продолжительности вегетации. Для каждого сорта были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения признаков: продолжительности вегетации, сумм температур за вегетацию и сумм эффективных температур (табл. 4), сумма эффективных температур имеет меньшее стандартное отклонение у всех сортов, т.е. представляет собой более устойчивую характеристику. Кроме того, она позволяет учесть невозможность завершения вегетации в случае накопления слишком низких для сорта температур.

В таблице 4 показаны температурные характеристики исследованных сортов. Пороговые температуры исследованных зерновых получились 5-9°С. В литературных источниках (Мищенко, 2009) биологическим температурным нулем этих зерновых культур считается температура 5˚С, для льна − 7˚С. Для картофеля биологический ноль равен 7-8°С, у северных сортов ростовые процессы наблюдаются до 2-3°С (Мельничук, 1990).

Недостатком метода эффективных температур является необходимость большого количества наблюдений для построения уравнения регрессии.

Таблица 3.

Оценка и прогноз линейного тренда продолжительности вегетации исследованных культур, сут./год.

Культура	Фактический средний тренд	Расчет с учетом неклиматической составляющей	Расчет климато-обусловленного тренда
Овес, пшеница, ячмень	−0,21	−0,17	−0,47
Лен Светоч	0,01	−0,08	−0,50
Капуста белокочанная	−0,52	−1,78	−0,13

Таблица 4.

Характеристики вегетационного периода сортов овса, пшеницы, ячменя и картофеля. Указаны средние значения и стандартные отклонения, для пороговой температуры – стандартная ошибка определения.

Сорт	Продолжи-тельность, сут.	Сумма среднесуточных температур, °С	Пороговая температура, °С	Сумма эффектив-ных температур выше поро-говой, °С
Овес Боррус	85,4±10,9	1408,2±100,5	7,2±1,2	805,0±66,6
Пшеница Ленинградка	89,5±9,6	1485,0±88,5	8,7±1,5	726,3±37,6
Ячмень Белогорский	77,0±8,0	1265,5±84,84	6,3±1,6	778,9±68,2
Ячмень Московский 121	80,2±7,8	1318,6±87,0	6,0±1,6	835,4±73,3
Лен Светоч	79,8±9,1	1296,8±70,5	6,0±0,7	818,1±44,6
Картофель Хибинский ранний, посадка − цветение	51,0±8,3	614,0±62,6	4,4±1,3	389,5±48,8

Имитационное моделирование устойчивости полученных оценок на примере овса сорта Боррус показало, что необходим ряд в 20 лет для получения значений пороговой температуры в доверительном интервале 30-летних наблюдений, если удалить сильно отклоняющиеся от среднего значения, определенные методом Jacknife, достаточно 10 лет. Кроме того, не должно быть

лимитирования другими факторами – осадками, например (Новикова, 2012).

Выводы

1. Важнейшими агроклиматическими факторами динамики хозяйственно ценных признаков изученных сортов яровой пшеницы, овса, ячменя, льна, капусты, картофеля на Северо-Западе РФ за последние 30 лет являлись: рост эффективных температур за период устойчивого перехода температур через 15°С и осадков за этот период, увеличение продолжительности периода с температурами 5 − 15°С весной – в начале лета.

2. Прогнозируется сокращение вегетационного периода районированных ранее сортов сельскохозяйственных культур в случае продолжения роста температур. Оно может быть частично компенсировано ростом осадков и продолжительности периода с температурами от 5 до 15°С. В 2000 гг. наблюдалось компенсирующее влияние повышения уровня агротехники. Возможно понижение урожайности районированных ранее сортов зерновых.

3. Для картофеля в условиях лимитирования температурами возможно увеличение вегетационного периода и повышение урожайности за счет увеличения продолжительности периода «цветение – уборка».

4. Метод последовательных разностей увеличивает точность регрессионного анализа климатической зависимости продолжительности вегетационного периода при наличии агротехнических трендов.

5. Суммы эффективных температур за вегетацию являются более стабильной характеристикой сорта, чем, чем суммы активных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.Ф. 2008. Проблемы стабилизации продуктивности агроценозов сои в связи с глобальными изменениями климата. Современные проблемы селекции и технологии возделывания сои (Сборник статей 2-й международной конф. по сое, Россия, Краснодар, 9-10 сентября 2008г.) Краснодар. С. 253 – 256.
2. Вавилов Н.И. 1957. Мировые ресурсы сортов хлебных злаков, зерновых бобовых, льна и их использование в селекции. Опыт агроэкологического обозрения важнейших полевых культур. –М.–Л.: Изд. АН СССР. 462 С.

3. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко, Темников В.Н., Усков И.Б., Романенков В.А., Рухович. 2008. Биоклиматический потенциал России: меры адаптации в условиях изменяющегося климата. –М.: 207С.
4. Елисеева И.И., Курышева С.В., Костеева Т.В. и др. 2007. Эконометрика. –М.: Финансы и статистика. 576 С.
5. Котова З.П. 2009. Развитие растений и потенциальная продуктивность у районированных сортов картофеля в Северном регионе в зависимости от погодных условий. Сельскохозяйственная биология. № 1. С. 72-76.
6. Мельничук Г.Ю. 1990. Морфогенез картофеля в условиях Крайнего Севера и его значение для селекции. Автореф. ... канд. с/х наук. –Л.: 21 С.
7. Мищенко З.А. 2009. Агроклиматология. Киев: КНТ. 512 С.
8. Николаев М.В. 1994. Современный климат и изменчивость урожаев. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат. 201 С.
9. Новикова Л.Ю., Дюбин В.Н., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В., Сеферова И.В. 2011. Моделирование динамики хозяйственно ценных признаков сортов зерновых культур в условиях изменения климата. Агрофизика –С.-Пб.: АФИ. № 4. С. 1-9.
10. Новикова Л.Ю., Дюбин В.Н., Сеферова И.В., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В. 2012. Прогнозирование продолжительности вегетационного периода сортов яровых зерновых культур в условиях изменения климата. Сельскохозяйственная биология. №5. С. 78 – 87.
11. Руководство по агрометеорологическим прогнозам. 1984. –Л: Гидрометеоиздат. Т.1, 2.
12. Сеферова И.В., Новикова Л.Ю., Некрасов А.Ю. 2011. Оценка реакции сои сорта Комсомолка на изменения климата в Краснодарском крае. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК. 1 (146-147). С. 72-77.
13. Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К. 2011. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства. Агрофизика. №3. С. 31 – 39.
14. Шашко Д.И. 1958. Принципы агроклиматического районирования. Вопросы агроклиматического районирования СССР. –М.: Гидрометеоиздат. С. 38-92.
15. Шиголев А.А. 1951. Руководство для составления фенологических прогнозов (озимая рожь, озимая пшеница, яровая пшеница, плодовые культуры, древесные растения лесных насаждений). Сельскохоз. метеорология. Методические указания. Вып. 15. –М.-Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 43С.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОДУКТИВНОСТИ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

И.А. Шульгин

Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ufarin@yandex.ru

Реферат. Представлены основные компоненты приходной и расходной части энергетического баланса (ЭБ) растений, обусловливающие продуктивность. Их значения позволяют оценивать максимально возможные продуктивность (МВП) и урожайность (МВУ) посевов яровых сельскохозяйственных культур в оптимальных условиях.

На основе физиологических подходов к описанию продукционного процесса у растений и результатов актинометрических и агрометеорологических наблюдений рассмотрены модели ЭБ посевов яровой пшеницы и ячменя в Центральных черноземных областях (ЦЧО) РФ. С их помощью рассчитана средняя за 1996-2010 гг. МВУ: 50 − 55 ц/га с диапазоном варьирования 25 − 70 ц/га за счет разного прихода фотосинтетически активной радиации (ФАР) в течение вегетации в разные годы.

Показано, что для обеспечения таких средних значений МВУ необходимо (согласно ЭБ) иметь около 210 − 230 мм доступной влаги, расходуемой за период роста растений. Реальные запасы продуктивной влаги (ЗПВ) в слое 0-100 см почвы не превышают 150 − 170 мм. Они способны, в соответствии с функциональными соотношениями компонентов ЭБ, обеспечить среднемноголетнюю урожайность лишь в 35 − 37 ц/га.

Отсутствие тренда приходящей суммарной солнечной радиации в период вегетации яровых культур в ЦЧО в течение второй половины XX века позволяет полагать, что и в ближайшие десятилетия среднемноголетние МВП и МВУ сохранятся на прежнем уровне, хотя потенциально урожайность могла бы увеличиться за счет возрастания ЗПВ.

Ключевые слова. Солнечная радиация, энергетический баланс, яровые злаки, посевы, фотосинтез, транспирация, потенциальная продуктивность, урожай.

ENERGY BUDGET AND PHYSIOLOGICAL CRITERIA FOR CROPS' PRODUCTIVITY UNDER CLIMATE CHANGE

I.A. Shulgin

Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leniskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation, ufarin@yendex.ru

Abstract. The main physiological input and output components of plant energy budget (EB) controlling its productivity are presented. The values allow to estimate maximum possible productivity (MPP) and yield (MPY) of spring crops under optimum conditions.

On the basis of physiological approache to the description of the plant productivity and results of actinometric and agrometeorological observations, a model for EB of spring wheat and barley crops is developed for the central chernozem region (CCR) of the Russian Federation. Average MPY of 50 − 55 centner/ha for 1996-2010 was calculated with the model. It ranges from 25 to 70 centner/ha due to varying income flux of photosynthetic active radiation over vegetation season in different years.

It is shown that (according to EB) such average MPY require about 210 − 230 mm of available moisture to be used during the plant growing season. Actual productive moisture content in 0 − 100 cm soil layer does not exceed 150 − 170 mm. According to physiological functional ratios of PB components, this can ensure average lon-term yield just of 35 − 37 centner/ha.

Absence of a trend in the total income flux of solar radiation over vegetation period of spring crops in CCR in the second half of the 20th century allows to hypothesize that long-term average MPP and MPY will remain unchanged, although potentially productivity may increase under enhanced productive moisture content.

Key words. Solar radiation, energy balance, spring cereals, crops, photosynthesis, transpiration, potential productivity, yield.

Введение

Одной из актуальных проблем стоящих перед фитометеорологией и, в частности, с.-х. метеорологией, является решение задачи выявления «потолка» и возможностей получения максимально возможной продуктивности (МВП, т.е. общей биомассы) и урожайности (МВУ, т.е. хозяйственно ценных органов)

возделываемых культур в наиболее благоприятных условиях роста применительно к погодно-климатическим режимам физико-географических регионов.

Актуальность этой проблемы связана и с проблемами продовольственной безопасности России, для решения которых необходимо, в частности, знание потенциальных ресурсов растениеводства и возможности их реализации в условиях изменения климата.

Как известно, процесс формирования и величина биологической продукции растений – в посевах и насаждениях – обусловлены фотосинтетической деятельностью (ФД), совершаемой за счет поглощаемой лучистой энергии Солнца (Ничипорович, 1956, 1963; Ничипорович, Шульгин, 1976; Тооминг, 1977; Шульгин, 1973, 2004).

Продукционный процесс посевов изучается достаточно давно – к нему привлечено внимание специалистов различных областей науки и практики – физиологии растений и экологии, физики, метеорологии и климатологии, почвоведения, математики и других. Результаты исследований и общее состояние проблемы представлены в монографиях, сборниках трудов, статьях, учебниках и учебных пособиях (Алехина и др., 2005; Гордеев и др., 2006; Грингоф, Клещенко, 2011; Кошкин, 2010; Кузнецов, Дмитриева, 2006; Росс, 1975; Шульгин, 1973, 2002, 2004, 2009) и учитываются в математических моделях системы «погода-урожай-математика» (Сиротенко, 1981).

При решении отмеченных задач из многих факторов продуктивности основное внимание уделялось гидротермическому режиму почвы и воздуха и меньше – солнечной радиации. Об этом говорит и то, что в настоящее время в Центрально-Черноземных областях лишь на 3 из 30 метеостанций, ведущих агрометеорологические наблюдения, измеряются суммы приходящей суммарной солнечной радиации (Q).

Одной из причин такого положения является убежденность многих агрометеорологов в том, что солнечная радиация – фактор, не поддающийся регуляции, достаточный для растений.

Между тем, еще К.А.Тимирязевым, разработавшим принципиальные подходы к оценке потенциальной продуктивности растений и опиравшимся на законы сохранения энергии Р.Майера и Г.Гельмгольца, неоднократно подчеркивалось, что только на основе изучения энергетики физиологических процессов можно получить

представление о максимальной производительности растительности, включая посевы.

Он прозорливо и точно, словно к сегодняшнему дню, писал, что *«Мы можем доставить растению сколько угодно удобрений, сколько угодно воды, можем, пожалуй оберегать его от холода в теплицах, можем ускорить круговорот углекислоты, но не получим органического вещества более того количества, которое соответствует количеству солнечной энергии, получаемой растением от солнца. Это – предел, преступить за который не во власти человека. Но раз мы узнаем этот предел, мы получим настоящую, строго научную меру для предела производительности данной площади земли, а, в то же время, будем в состоянии судить о том, насколько наши культуры приближаются к совершенству…*» (Тимирязев, 1948).

Из фундаментальной значимости мнения К.А. Тимирязева для последующего развития физиологии растений и начались исследования энергетического баланса (ЭБ) листа, растения и посева в целом, позволяющего составить общее представление о МВП и реальной, действительно возможной (ДВП) в данных условиях, продуктивности.

Энергетический баланс растений и посевов

Основные результаты исследований ЭБ принципиального характера представлены в ряде работ (Клешнин и др., 1955; Шульгин и др. 1960; Шульгин, Щербина, 1981, 1988, 1990; Шульгин, 2004; Шульгин, Тарасова, 2009).

В этих исследованиях использовались методики, позволившие экспериментально изучать основные компоненты ЭБ – приход солнечной радиации (Q, 0,29-4,0 мкм), ее поглощение листьями и посевами в отдельных участках спектра. Наряду с этим изучались и другие компоненты ЭБ – газообмен, транспирация, теплообмен и т.д.

Как известно, все физиологические процессы в растениях совершаются за счет солнечной радиации, поглощаемой в области 380-750 нм и называемой физиологически активной радиацией (ФАР).

Энергия этого диапазона регулирует многочисленные регуляторно-информационные процессы (гелиотропизм, фототропизм, фотопериодизм, фотоморфогенез и др). Особенно

важна радиация в области 380-450, 650-670 и 730-750 нм (Алехина и др., 2005).

В пределах ФАР, в более узкой ее области (380-710 нм), протекают высокоэнергетические светозависимые (f) процессы – истинный фотосинтез P', фотосинтез P_f, фотодыхание R_f, фототранспирация T_f, а так же теплообмен между листом и воздухом t_f (Шульгин, 2004) хотя эту область по прежнему называют «фотосинтетически» активной радиацией (ФАР, Q_f).

Сам ЭБ растения или посева с.-х. культур за сутки (основную единицу биологического времени) может быть представлен для области ФАР в упрощенном виде следующим образом (Шульгин, 2004):

$$[Q \bullet k_f \bullet A_f = Q_{Af}] = [Q_{Af} \bullet \eta_{Af} \bullet = Q_P = (Q_P - Q_R) = Q_M] + Q_T + Q_t + Q_{ir}.$$

Здесь Q – приход суммарной интегральной солнечной радиации; k_f – коэффициент перехода от Q к суммарной радиации в области ФАР (Q_f); A_f – коэффициент поглощения ФАР растением или посевом; Q_{Af} – поглощенная ФАР. В расходной части баланса Q_P – доля поглощенной ФАР, идущей на фотосинтез (газообмен, P) в соответствии с коэффициентом эффективности ее использования (ЭИ ФАР) или, что то же, с коэффициентом ее полезного действия ($КПД_A$, η_{Af}). Одновременно Q_P характеризует использование Q_{Af} на ее запасание (Q_M) в сухой биомассе M.

Фотосинтез P (газообмен) и необходимая для него энергия Q_P – разность между $Q_{P'}$, используемой на *истинный фотосинтез* P′ (поглощение CO_2 и H_2O, образование продуктов) и расходом энергии Q_R на *суммарное дыхание R* за сутки, состоящего из компонента Q_{Rf} (*фотодыхания* R_f автотрофных тканей на свету) и компонента Q_{Rd} *(«темнового»*, т.е. светонезависимого дыхания этих же тканей в темноте и всех гетеротрофных тканей и органов как на свету, так и в темноте).

Q_T – энергия, расходуемая на *транспирацию* T, осуществляемую в листьях (в сопряженных с истинным фотосинтезом процессах) в виде *фототранспирации* T_f (Шульгин, Мурей, 1978) и «темновой» (т.е. светонезависимой) *термотранспирации* T_d, идущей во всех гетеротрофных органах на свету и в темноте за счет выделяемой тепловой энергии при их «темновом» дыхании, а так же за счет притока тепла из воздуха.

Для T_f и T_d, независимо от механизма превращения в этих процессах жидкой воды на внешней стороне клеток в парообразную, затрачивается около 580 кал/г (2420 Дж/г) при 20-25°С. По существу $Q_T = K_T \cdot T$, где K_T – энергия (теплота) парообразования, а Т – транспирация.

Для растений и посева в период активной фотосинтетической деятельности (ФД) за сутки Т почти равна влагопотреблению. За весь период вегетации в величину Т входит около 10-12% влаги в конечной воздушно-сухой биомассе, а 88-90% поглощаемой влаги представлены подвижной, «свободной» влагой, быстро транспирируемой, и временно «запасаемой» в структурах органов в виде «рыхло-» и «прочносвязанной» воды, медленно проходящей через них и также в итоге испаряемой (Гусев, 1967)

При дефиците подаваемой из корней влаги, часть поглощенной энергии, не используемой на Р и T_f, расходуется на нагрев тканей листьев (Q_t) на свету (Q_{tf}) и градиент температуры между листом и воздухом может быть больше нуля. Если же нет дефицита влаги в зоне корней (например, при выращивании риса на «затопляемых» или хлопчатника на орошаемых полях), то температура листьев за счет Т может быть на несколько градусов ниже температуры воздуха.

Забегая вперед, отметим, что распределение Q_{Af} в расходной части ЭБ при оптимальных условиях роста растений примерно таково: за сутки на Q_P, идет около 16%, на Q_R – около 6%, так что на Q_P приходится и запасается в биомассе около 10% (Шульгин, 2004). Отношение же Q_M к Q_{Af} – величина КПД$_A$ (η_{Af}), достигающая 8-12%.

Значение 10%-го КПД ФАР по газообмену и приросту М является теоретически и фактически максимально возможным для целого растения за сутки вне посева и в посеве, независящим от его возраста (до репродуктивной фазы) и видовой принадлежности растений к С-3 или С-4 типам (Шульгин, Мурей, 1978). В посеве η_{Af} по М может достигать в период C_{max} 12,5%. На Q_T расходуется в оптимальных условиях до 88-90% от Q_{Af}, тогда как Q_t близка к нулю.

Наконец, часть (1-2%) Q_{Af} расходуется на регуляторно-информационные процессы Q_{ir}, первая фаза которых протекает за счет лучистой энергии. Способность использовать крайне низкие интенсивности Q_f адаптивно связана с тем, что в природе растения сталкиваются с «полутемнотой» (в сумерки) перед ночью и после нее, когда ФД фактически прекращается, но есть необходимость

настраивать «биологические часы» и ритмику процессов (Алехина и др., 2005; Шульгин, 2004).

Из уравнения ЭБ (основной модели ЭБ) следует, что для получения информации о МВП и МВУ растений и посевов за тот или иной интервал, их активной ФД, необходимо знать, во-первых, численные значения компонентов приходной части ЭБ и, во-вторых, величину ЭИ ФАР (η_{Af}), позволяющую рассчитать количество энергии, запасенной в Q_M и саму биомассу М.

Разработке экспериментальных основ ЭБ содействовало то, что в это же время (1950-1970 гг.) в Институте физиологии растений им. КА. Тимирязева АН СССР под эгидой Научного Совета по фотосинтезу интенсивно разрабатывалась академиком А.А.Ничипоровичем и его коллегами теория ФД растений и посевов (Ничипорович, 1963), согласно которой продуктивность – результат многих сопряженных процессов, включая и фотосинтез. Внимание было направлено, во-первых, на оценку прихода ФАР к посевам, на роль структурной организации посевов, влияющей на радиационный режим в посевах (Росс, 1975; Росс, Тооминг, 1968; Нийлиск, Росс, 1969 и др.). Внимание уделялось, во-вторых, на выявление максимально возможного КПД ФАР на образование общей биомассы (МВП) и урожая (МВУ). Это делалось путем оценок реальных и формирования максимально продуктивных посевов, выращиваемых в разных зонах СССР при не лимитируемом водно-корневом питании, чтобы соотнести энергию в конечной биомассе с приходящей к посеву ФАР и расчету величины КПД.

Были выявлены максимальные значения КПД приходящей ФАР для образования М посевов (4-6%, Ничипорович, 1963), которые и по ныне приводятся в ряде работ (Грингоф, Клещенко, 2011; Кошкин, 2010). Работами в фитотронах с высшими растениями и одноклеточными зелеными водорослями было показано, что η_{Af} по Р и М за сутки может достигать 10-12%. Таким образом, оба направления исследований – изучение ФД и ЭБ, проводившихся в естественных условиях и в фитотронах, позволило детальнее рассматривать продукционный процесс.

Задачи работы и полученные результаты

В работе рассмотрены две основные задачи:

- во-первых, оценить среднемноголетнюю потенциальную продуктивность (МВП) и хозяйственную урожайность (МВУ)

посевов ранних яровых культур (пшеницы и ячменя) в наиболее благоприятном климатическом регионе для сельскохозяйственного производства России, какими являются ЦЧО, имеющие развитую сеть метеорологических станций;

- во-вторых, оценить возможный диапазон МВП и МВУ этих культур в ЦЧО в зависимости от прихода Q в те или иные годы.

Определим понятие «максимально возможная продуктивность» (МВП). Под ним понимается та величина конечной общей абсолютно сухой биомассы, которую обуславливают только три фактора – приход радиации, ее поглощение посевом и эффективность использования на создание биомассы М.

Принимается, что состояние посевов при оценке МВП в целом «идеальное»: оно обусловлено оптимальной нормой высева семян, количеством растений на единице площади земли, площадью листьев с характерной для них ориентацией и распределением по высоте. Такой посев имеет оптимальные для вида (сорта) листовой индекс (LAI, м²/м²), оптико-физиологическую плотность (Ничипорович, Шульгин, 1976; Росс, 1975; Тооминг, 1977; Шульгин и др, 1975), что позволяет посеву работать наиболее эффективно при разных интенсивностях ФАР в течение дня. Принимается, что посевы не испытывают недостатка (или избытка) ни во влаге, ни в минеральном питании и т.д.

При рассмотрении этих двух задач можно оценить, наряду с радиационными компонентами ЭБ и величинами МВП, не менее важный компонент – расход Q_{Af} на взаимосвязанные процессы влагопотребления и транспирации (Q_T). Это позволяет выявить соотношение между реальными запасами продуктивной влаги (ЗПВ) в почве с той влагой, которая минимально необходима посеву для его максимальной продуктивности.

Конкретная задача заключалась в том, чтобы в уравнение ЭБ, причем упрощенное, ввести фактическую информацию[2] для его

[2] *Данные актинометрических наблюдений за период 1996-2010 гг. по просьбе автора предоставлены ФГБУ «ГГО» из режимно-справочного банка данных «Актинометрия». Результаты агрометеорологических наблюдений предоставлены ФГБУ «Гидрометцентр РФ» из банка данных «Отдела агрометеорологических прогнозов» и их обработка выполнена Л.Л. Тарасовой.*

компонентов и произвести необходимые расчеты (Тарасова, Шульгин, 2010; Шульгин, Тарасова, 2009).

Прежде всего, рассматривали сроки вегетации пшеницы и ячменя, продолжительность фаз, периода фотосинтетической деятельности (ФД, «всходы-молочная спелость») (табл. 1). За период ФД рассчитаны суммы Q за каждый год и годы наблюдений, и при K_f = 0,48 получены среднемноголетние суммы Q_f (табл. 2).

Таблица 1.

Продолжительность периодов роста ранней яровой пшеницы и ячменя и приход суммарной солнечной радиации за период их активной фотосинтетической деятельности

Область	Станция	Продолжительность периодов, дни			Суммы суммарной солнечной радиации (Q), МДж/м²
		Всходы – выход в трубку	Всходы – молочная спелость	Всходы – восковая спелость	
Курская	Петринка	25 16…39	64 53…75	77 59…85	1336 1066…1602
Тамбовская	Мичуринск	27 16…41	65 50…77	76 72…83	1278 877..1755
Воронежская	Каменная Степь	22 16…30	58 49…67	72 61…85	1223 891…1520

В верхней строке – средняя за период; в нижней – наименьшая ... наибольшая величина.

Принято, что коэффициент A_f за периоды ФД посевов равен в среднем 80% (Тооминг, 1977). Отсюда получены значения Q_{Af} (табл. 2). Значение $П_{Af}$ посевом за период ФД принято равным 5% (Шульгин и др., 2011), что не является, как известно, максимальной величиной, достигающей в наиболее оптимальных условиях роста 6-8% (Шульгин, 2004).

Отсюда получаем величину $Q_M = Q_{Af} \cdot П_{Af}$, а из Q_M – значения конечной общей биомассы посева $M = Q_M/q$, где q – средняя энергоемкость 1г М, равная 4 ккал/г (16,8 кДж/г).

Таким образом, получено среднее значение радиационно обусловленной «климатической» МВП посевов, равное 153-155 ц/га. Аналогичная величина для земледельческой зоны России,

выраженная в радиационно-термическом (биоклиматическом) потенциале, составляет в среднем около 135 ц/га надземной сухой биомассы (Гордеев и др., 2006) или около 150-160 ц/га общей биомассы.

Таблица 2.

Компоненты энергетического баланса и максимально возможная урожайность ранней яровой пшеницы и ячменя

Компоненты баланса	Область, станция		
	Курская, Петринка	Тамбовская, Мичуринск	Воронежская, Каменная Степь
Приходящая за период «всходы – цветение» ФАР (Q_f), МДж /м^2	644	592	596
Поглощенная ФАР(Q_{Af}), МДж/м^2	515	473	477
Используемая ФАР в фотосинтезе и запасаемая в биомассе (Q_M), МДж/м^2	26	24	24
Максимально возможная продуктивность (М), ц/га	155	143	143
Максимально возможная урожайность ($M_з$), ц/га	51	48	47

Отсюда следует, что термический режим при всей своей вариабельности в период вегетации за 1996-2010 гг, не внес существенного вклада в МВП, которая практически полностью обусловлена приходом и использованием ФАР.

Для оценки МВУ необходимо знать $К_{хоз}$ – долю урожая (т.е. зерна) в М посевов. Примем, что массовая доля зерновок $М_з$ колосьев в общей массе растений ($К_{хоз}$) в условиях ЦЧО составляет в среднем 30% (Гончаров, Гончарова, 2009). Она может быть больше (до 40-42%) у сортов, высеваемых в южных регионах, где больше не только сумма прихода ФАР за период ФД, но выше в середине дня интенсивность ФАР, «укорачивающая» стебель; $К_{хоз}$ может быть меньше (25-30%) при пониженном приходе ФАР (облачность, загущенность посевов), вызывающем световую «этиоляцию» стебля со снижением размеров и массы колоса.

Итак, принято, что среднемноголетняя радиационно обусловленная МВУ составляет в ЦЧО 47-51 ц/га (табл. 2). С учетом прихода ФАР в период молочной спелости, в течение которой колос еще может вносить свою лепту (5-10%) в фотосинтез, МВУ достигала бы 50-55 ц./га. Такой уровень урожайности отвечает

желаемым значениям в моделях «идеальных» сортов (Кумаков, 1985; Гончаров, Гончарова, 2009). Эти расчетные величины МВУ совпадают с фактической урожайностью в ряде хозяйств НИИСХ, где в отдельные годы она достигала 60-70 ц./га.

По исходно принятым условиям, для получения МВП почвенная влага не лимитирует фотосинтез и транспирацию и, согласно уравнению ЭБ, при $КПД_А$, равном 5%, на $Q_Т$ расходуется 93-94% поглощенной ФАР, что составляет 420-490 МДж/м² (табл. 3).

Таблица 3.

Компоненты энергетического баланса, влагообеспеченность, транспирация и урожайность ранних яровых зерновых культур в среднем за период 1996-2010 гг.

Компоненты баланса	Область, станция			
	Курская, Петринка	Тамбовская, Мичуринск	Воронежская Каменная Степь	Средние значения
Расход поглощенной ФАР на максимально возможную транспирацию ($Q_Т$), МДж/м^2	489	450	418	452
Расход влаги на максимально возможную транспирацию (*T*), в мм	219	201	203	208
Сумма осадков за период «всходы-цветение», мм	101	118	87	102
Запасы продуктивной влаги в почве (0-100 см) в фазу «всходы», мм	214	197	213	208
Запасы продуктивной влаги в почве (0-100) см в фазу «цветение», мм	158	138	138	145
Расход влаги на действительно возможную транспирацию (Т), мм	158	160	154	165
Соотношение между действительно возможной и максимально возможной транспирацией	0,72	0,80	0,76	0,79
Фактическая влагообусловленная урожайность, ц/га	37	38	36	37
Расчетная (по элементам продуктивности) урожайность, ц/га	37	36	36	36

Отсюда, рассчитав количество влаги, идущей на Т и соотнеся ее с величиной М, получим значения транспирационного коэффициента (ТК), равного 130г воды/г М и продуктивности транспирации (ПТ), составляющей 7,7 г М/кг испаряемой воды. Значения ТК очень близки к минимально, а ПТ – к максимально возможным величинам

и согласуются с экспериментальными данными для посевов яровой пшеницы и ячменя в оптимальных условиях роста (Грингоф, Клещенко, 2011; Кошкин, 2010).

Таким образом, на основе агрометеорологической информации и анализа ЭБ можно получить представление о среднемноголетнем уровне МВП и МВУ посевов в том ли ином регионе и минимально необходимом для них уровне влагопотребления и транспирации.

В то же время, фактическая урожайность весьма варьировала, что, в частности, могло быть связано, при оптимальности всех других условий, с различным приходом Q (табл. 4).

Таблица 4.

Приход максимальных и минимальных месячных сумм суммарной интегральной радиации Q и средние значения за период 1996-2010 гг.

Область, Станция	Максимальные суммы, МДж/м^2•месяц			Минимальные суммы, МДж/м^2•месяц			Средние значения, МДж/м^2•месяц		
	май	июнь	июль	май	июнь	июль	май	июнь	июль
Курская обл., Петринка	691 / 2005	747 / 2010	697 / 2010	445 / 2004	503 / 2001	517 / 1997	586	637	610
Тамбовская обл., Мичуринск	684 / 1996	777 / 1997	765 / 1996	435 / 1999	471 / 2001	506 / 2004	587	655	647
Воронежская обл., Каменная Степь	740 / 2007	775 / 1999	805 / 1996	476 / 2004	468 / 2003	499 / 2004	628	647	661

В знаменателе указан год.

Рассмотрим поэтому диапазоны МВП и МВУ, обусловленные лишь различным приходом и использованием ФАР.

Вначале покажем еще большие возможные значения потенциальных (МВУ) урожаев:

- ✓ Приход Q, как и Q_f, может быть больше примерно в 1,25 раза (табл. 1);
- ✓ Значение A_f может реально быть не 0,80, а 0,83, т.е. в 1,04 раза больше;
- ✓ Значение Π_{Af} может быть не 5%, а около 6,0% и даже 6,5%, т.е. в 1,2 раза больше;
- ✓ В итоге величина МВП возрастет в 1,56 раза, что составит не 147, а 229 ц./га.

В условиях большего прихода ФАР может формироваться более мощный и устойчивый стебель, выдерживающий и больший колос, так что $К_{хоз}$ может быть не 30, а, что допустимо, 33-35%. Тогда МВУ составил бы не 49 ц/га, как дано в табл.2, а возрос, примерно, до 70-75 ц/га. Такие урожаи зерна ярового ячменя и наблюдались в некоторых регионах в отдельные, наиболее благоприятные годы, к тому же – при регулярной оптимизации условий роста.

Теперь обратимся к наименее оптимальным радиационным условиям:

- ✓ Приход Q, как и Q_f, может быть меньше средних значений в 1,35 раза (табл. 1);
- ✓ Значение $А_f$ при меньшем Q может быть не 0,80, а 0,75, т.е. в 1,07 раза меньше;
- ✓ Значение $Π_{Af}$ может быть не 5%, а 4-3% и менее, но при 4% оно в 1,25 раза меньше;
- ✓ В итоге максимально возможная продуктивность М могла бы снижаться в 1,8 раз, что составило бы не 147, а 81 ц./га.

В условиях сниженного прихода ФАР формируется весьма тонкий стебель, с меньшей в сечении площадью механических тканей (Шульгин, 1988), что обуславливает меньший по размерам и массе колос, так что $К_{хоз}$ может составлять 24-27%. Тогда МВУ составила бы около 20-22 ц./га.

Итак, только за счет различий в приходе и использовании ФАР в те или иные годы МВУ могла бы варьировать в пределах 20-70 ц./га при оптимальности всех других условий за тот же период активной ФД, в те же сроки вегетации.

Наибольшие значения МВП и МВУ рассчитаны для чрезвычайно благоприятного сценария (с «экстремальными» условиями) и они несколько завышены. Во-первых, период активной ФД, как и «всходы-созревание», будет короче, т.е. меньше суммы Q и Q_{Af}; во-вторых, ежесуточные продуктивные ресурсы ФАР, обеспечивающие положительный газообмен посева за сутки, всегда меньше измеряемых сумм Q и принятых в расчет Q_f (Шульгин, 2009); в-третьих, нет снижения Р′ за счет полуденной депрессии транспирации и т.д.

Занижены и наименьшие значения МВП и МВУ: не учтено, в частности, что при меньшем приходе ФАР период «всходы-

молочная спелость» должен быть более длительным и, следовательно, большим приход Q. Поэтому, в первом приближении, можно говорить о диапазоне годовых МВУ пшеницы и ячменя в ЦЧО порядка 25-60 ц/га в отсутствие каких-либо лимитирующих рост факторов, помимо изменчивости приходящей ФАР.

Существует еще ряд радиационных ситуации, пока не рассматриваемых и не учитываемых в ЭБ, но способных влиять на ежесуточные приросты М и, в итоге, на радиационно обусловленную действительно возможную продуктивность (ДВП). Покажем сказанное на нескольких примерах.

Так (пример 1), при равном значении Q_{Af}, на величину МВП и ДВП большое влияние может оказывать структурная организация посева – распределение в нем листовой поверхности, влияющей на профиль ослабления ФАР по глубине ценоза, на интенсивность P′ и R (Росс, 1975; Тооминг, 1977; Шульгин и др., 1975).

Дело в том, что на пути луча прямой радиации не должно находиться больше 2-х друг под другом листьев, так как даже в полдень приходящая ФАР к третьему листу слишком мала (менее 1-2% от Q_f) для положительного газообмена в это время дня (тем более за сутки) и этот лист «живет» за счет других листьев (Шульгин и др., 1975).

Пропускание ФАР посевом к почве в такой ситуации при LAI=2 «стремится» к нулю. Если же ориентация листьев в посеве по глубине «хаотична» (равномерна) по углу наклона каждого из них и они направлены плоскостью на полусферу неба, то в этом случае LAI равен 4-5 при двух «монослоях» листьев (Шульгин и др., 1975) и к почве поступает около 5-7% от Q_f (Росс, 1975).

Иначе говоря, в обоих случаях Q_f, как и Q_{Af} одинаковы, но в одном случае ФАР ослабляется до уровня почвы и не до нуля, а в другом ее поступление завершается в глубине посева, что негативно сказывается на продуктивности посева.

Допустим (пример 2), что с появлением всходов приход Q в течение 3-5 дней значительно выше среднемноголетних значений, к которым адаптированы сорта. В этом случае индуцируется формирование более мощного по арматурным параметрам стебля, что заранее позволяет ожидать, при прочих оптимальных условиях, высокой ДВП. Однако, следует учесть, что в данной ситуации могут

ускоряться рост и органогенез, укорачиваться период ФД при меньших Q_f, возрастать асинхронность формирования цветков и зерновок. Колос по количеству и массе полноценных зерновок окажется меньшим, чем это можно было ожидать и, в итоге, реализуется меньшая ДВП и ДВУ посева.

Допустим (пример 3), что в течение дня в разное его время имеет место переменная облачность. При одной и той же сумме Q_f газообмен и прирост массы за сутки будет различным в зависимости от режима Q_f=S´+D в течение дня. Пусть в первом случае S´+D поступает с 10 до 12 и с 16 до 18 часов, тогда как в остальное время приходит лишь рассеянная радиация D. Пусть в другом случае S´+D поступает с 12 до 16 часов, а в остальное время только D. В первом случае газообмен и прирост массы за сутки будут больше, чем во втором, так как ЭИ ФАР в дополуденные и послеполуденные часы велика, как велика она и в полуденные часы, т.к. при приходе только D не возникает депрессии Т и Р´. Во втором же случае к посеву приходит сниженная эффективная Q в виде D (с 10 до 12 и с 16 до 18 часов), тогда как в полуденные часы высокая интенсивность S´+D даже при достаточных ЗПВ в почве приводит зачастую к снижению газообмена за счет частичной депрессии Т и, в итоге, к снижению прироста М за сутки.

В дополнение можно добавить, что еще большие различия в реакции растений были бы при равном количестве часов солнечного сияния (КЧСС) в течение дня, особенно при облачности в разное время дня. Понятно, что сумма S´+D за период с 6 до 9 и с 17 до 20 часов будет значительно меньше, чем за такой же период с 9 до 15 часов, тогда как прирост массы за день может быть равным или даже большим в первом случае за счет высокой ЭИ ФАР.

Из этого примера, часто реализуемого в том или ином виде, следует, что между КЧСС и Q за сутки нет однозначной зависимости и ее может не быть в течение ряда дней в декаду, в период ФД данного года. Поэтому расчет прихода Q по КЧСС, предлагаемый в ряде работ (Сивков, 1968; Шиловцева и др., 2005) может производиться, по-видимому, в основном для средних величин многолетнего ряда актинометрических данных.

Допустим (пример 4), что на фоне глобального потепления климата будет происходить потепление в ЦЧО, сопровождаемое в

том числе удлинением теплого периода и позволяющее высевать те же ранние яровые злаки на несколько дней раньше. Между тем продуктивность при этом значимо не возрастет, поскольку каждому из сортов в оптимальных условиях присущ детерминированный рост, всегда постоянное количество междоузлий и листьев, длительность межфазных периодов.

К тому же, при более раннем севе всходы фотопериодически длиннодневных растений будут находиться на более коротком дне, в результате чего может возникать некоторая задержка развития на 1-2-м этапах органогенеза, усиливаться метамеризация, кущение и за счет появления дополнительных побегов может происходить загущение посевов, увеличиваться их оптическая плотность, ухудшаться профиль пропускания ФАР в глубину, снижаться истинный фотосинтез у нижних ярусов листьев, что в итоге, уменьшит ДВП и ДВУ. Чтобы подобной ситуации не возникало, придется, по-видимому, снижать норму высева семян, что определит лишь ту урожайность, какую может обусловить приход солнечной радиации за период ФД. При этом истинный фотосинтез посевов сохранится почти на том же уровне, тогда как дыхание возрастет и ДВУ тем более будет снижаться.

Поэтому, наряду с ранее указанными задачами оценок МВП и МВУ, при решении которых учитываются именно суммы Q_f за период ФД, без детализации ее прихода в течение ФД посева, есть необходимость принимать во внимание и значительную вариабельность прихода Q_f в те или иные периода ФД. Понятно, что при одной и той же Q_f она в отдельные фазы избыточна, тогда как в другие недостаточна и это может сказаться, причем в разной степени, на ДВП (т.е. как радиационно обусловленную ДВП).

Наряду с влиянием ФАР на сугубо ФД, она, наряду с областью 710-750 нм, играет большую роль в регуляции информационно-регуляторных физиологических процессов (Q_{ir}), сигнализируя растениям о радиационной среде в данный и последующий моменты и влияя через скорость органогенеза на продуктивность (Алехина и др., 2005; Шульгин, 2004). Это влияние проявляется, например, при регуляции фотопериодической реакции зацветания, в «критические» периоды роста растений.

Так, многолетними исследованиями выявлено, что после всходов в течение 3-5 дней, в «первый критический радиационный период» (Шульгин, 2004) первые два листа яровой пшеницы и ячменя очень чувствительны к интенсивности ФАР (Шульгин, Щербина, 1988).

Снижение прихода ФАР к всходам (всего лишь на 2-4% от прихода за период активной ФД), как и фотопериодически неоптимальная физиологическая длина дня (Шульгин, 1973) существенно, причем «отрицательно», влияет на закладку, количество элементов и свойства тканей будущего стебля, определяющих его устойчивость, на размеры и структуру листьев и, в итоге, – на размеры, количество колосков, цветков, зерновок и массу колоса (Шульгин, Щербина, 1988) и обуславливает снижение ДВП растений на 20-30%.

Такие изменения, негативные с хозяйственной точки зрения, адаптивны и позитивны для растений, позволяя им расти в условиях «ожидаемого» снижения прихода ФАР, иметь для этого меньшую массу дышащих органов и сохранять сопряженность основных процессов за сутки, работая с максимальной ЭИ ФАР.

В реальной ситуации ДВП и ДВУ существенно зависят не только от радиационных параметров ЭБ, но и от Q_T (влагообеспеченности растений и их транспирации). Дело в том, что у пшеницы и ячменя транспирация осуществляется лишь на свету, зависит от ФАР (т.е. является фототранспирацией, T_f) и будучи функционально и пропорционально связанной с процессами истинного фотосинтеза (Шульгин, Мурей, 1978; Шульгин, 2004) она может, при недостатке подаваемой влаги из почвы в листья, снижаться сама, снижать газообмен Р за счет Р′ и прирост М.

Это снижение T_f, вызываемое необходимостью не допустить «обезвоживания» листа, требует пропорционального уменьшения затрат энергии на Р′ во избежание ее избытка, направляемой в этом случае не на Т, а на нагрев структур хлоропластов и, чтобы этого не произошло, в околополуденные часы у листьев может наблюдаться депрессия фотосинтеза, вызванная депрессией Т. Одним из регуляторов этих взаимообусловленных процессов выступает устьичный аппарат (Молдау, 1977): уменьшая Т, он

одновременно снижает поступление CO_2 в лист, P′ и снижает затраты Q_{Af}.

Итак, если снижается величина суммарной транспирации, то почти в той же мере снижается Р и прирост М (Шульгин, 2004; Кошкин, 2010), но при этом может ухудшаться тепловой режим растений (Клешнин, Шульгин, 1960).

В таком случае энергобалансовый подход позволяет сопоставить радиационно обусловленные МВП и МВУ с влагообусловленной ДВП, решающим фактором величины которой теперь выступает водный режим растений.

В табл. 3 представлены данные о величине расхода влаги на транспирацию за период роста, необходимой прежде всего для реализации МВП.

Из уравнения водного баланса следует (Тарасова, Шульгин, 2010), что, исходя из ЗПВ в метровом слое почвы, фактическое влагопотребление посевами за период роста меньше (табл. 3) и фактически возможная Т составит не 200-220 мм, а в среднем 165 мм. Отсюда, на основе соотношения $T_{факт.}/T_{потенц.}$, можно уменьшить величину $M_{потенц}$ и $M_{з,\ потенц}$ и получить расчетные значения влагообусловленной урожайности порядка 37 ц/га (табл. 3), полностью совпадающей с расчетной по наблюдаемым (экспериментально измеряемым) на агрометеорологических станциях элементам фактической урожайности посевов.

Обратимся теперь, с позиции оценки компонентов приходной части ЭБ, к весьма актуальному вопросу – есть ли основания ожидать увеличения продуктивности в ЦЧО этих же яровых культур в ближайшие десятилетия. Для этого сопоставим значения основных параметров ЭБ посевов в период 1996-2010 гг. с таковыми в 1960-1980 гг., а так же рассмотрим изменчивость значений прихода Q в 1996-2010 гг., базирующихся на фактических данных, полученных на актинометрических гидрометеорологических станциях ЦЧО.

Увеличение среднемноголетнего «потолка» МВП и МВУ могло бы иметь место при увеличении в те же месяцы вегетации прихода Q. На рис. 1 приведены среднемесячные суммы прихода Q для станции «Каменная Степь» за период 1996-2007 гг. и сопоставлены с данными для этой же станции за период 1960-1980 гг., взятых из Научно-прикладного справочника по климату СССР (1990).

Видно, что значения Q за оба периода близки и различия между ними в мае-июне не превышали 3-5%. Аналогичная ситуация имела место и в отношении других станций ЦЧО («Курск», «Мичуринск»).

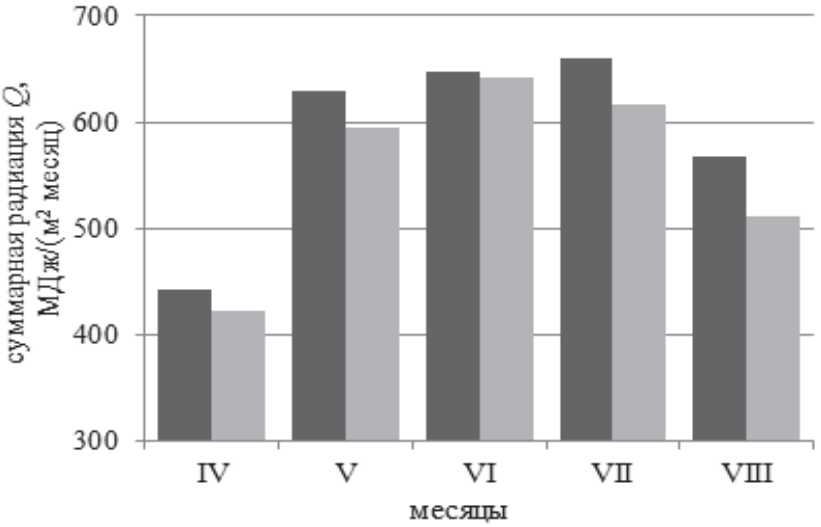

Рис. 1. *Суммарная солнечная радиация Q (месячные суммы). Каменная Степь (Воронежская область). Черным цветом обозначен период 1996-2007 гг., серым цветом – 1960-1980 гг.*

На рис. 2 представлены месячные суммы Q за период с 1996 по 2010 гг. по данным станции «Мичуринск». В мае и июле, несмотря на межгодовую изменчивость Q, линейный тренд практически отсутствует и очень слабо выражен в июне.

Незначительно выраженный положительный тренд прихода Q в данный период может быть связан с рядом причин: во-первых, с возможным изменением в ЦЧО режима облачности в течение дня и, во-вторых, что мало вероятно, но возможно, с возрастающими «погрешностями» измерений Q в силу «возрастного» снижения чувствительности термоэлементов пиранометров, особенно при высокой температуре воздуха в послеполуденные часы дня, что, в принципе, может приводить к завышению результатов.

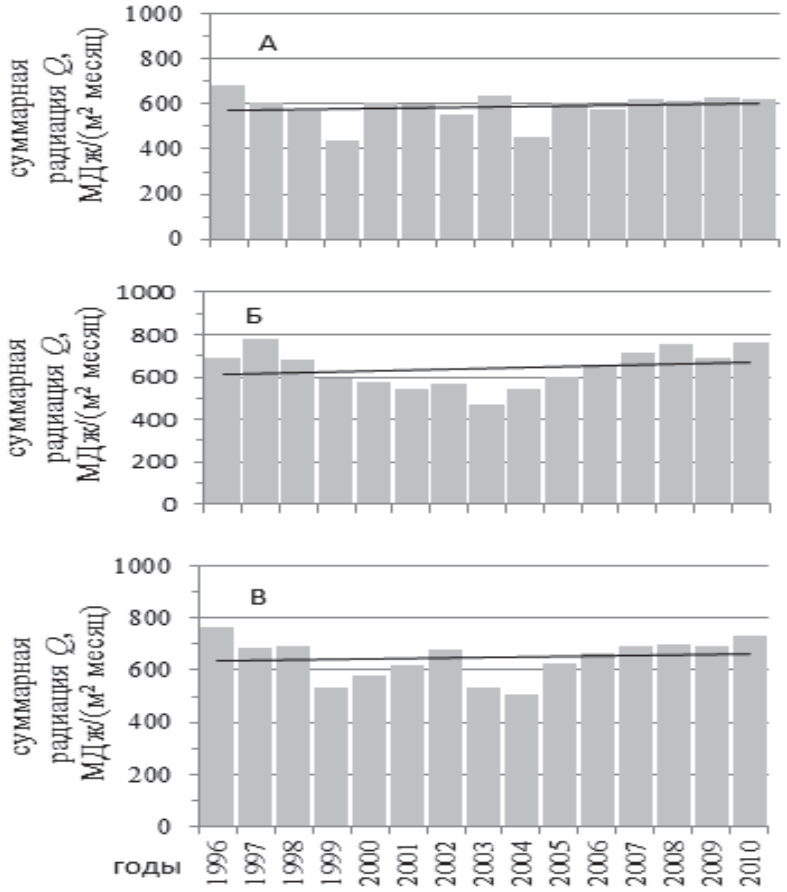

Рис. 2. *Месячные суммы суммарной солнечной радиации Q. Мичуринск (Тамбовская область)*
А – май, уравнение тренда y = 1,756 x + 573,2
достоверность аппроксимации R² = 0,014
Б – июнь, уравнение тренда y = 4,160 x + 607,4
достоверность аппроксимации R² = 0,040
В – июль, уравнение тренда y = 1,985 x + 631,5
достоверность аппроксимации R² = 0,013

Такая же картина, как и в ЦЧО, наблюдалась во второй половине 20-го века и в Нечерноземной зоне: по данным Метеообсерватории

МГУ в период с 1955 по 2007 гг. тренд суммарной радиации практически отсутствовал (Абакумова и др., 2012). В Центральном регионе Европы (23 станции) в период 1964-1989 гг. Q снижалась на 1-3%, а затем ее величина вернулась к значениям 60-х годов (Самукова, 2012) за счет изменения количества аэрозоля в атмосфере и облачности.

Итак, среднемноголетний приход Q во второй половине 20-го века в период вегетации яровой пшеницы и ячменя в ЦЧО практически не изменился и, по-видимому, может сохраняться таким же и в ближайшие десятилетия. Поскольку значения K_f и A_f при этом же Q не могут увеличиваться, то и Q_{Af} останется на прежнем уровне и сохранится, следовательно, существующий уровень МВП и МВУ. Не исключается, что в отдельные годы, при более высоком приходе Q и оптимальности водного режима почвы, уровень МВУ может возрасти, согласно расчетам ЭБ, до 60-70 ц./га, к которому может приблизиться (и порой приближалась) действительно возможная урожайность.

Как ранее показано (Тарасова, Шульгин 2010; Шульгин и др., 2011), основным фактором в ЦЧО, определяющим ДВУ порядка 35 ц./га вместо МВУ в 50-55 ц/га, является недостаток ЗПВ в течение вегетации ранних яровых культур: вместо необходимых для МВП 200-220 мм имелось в среднем 150-160 мм (табл. 3). Возникает вопрос – был ли «стабильным» в течение прошедших десятилетий режим влажности почвы.

На рис. 3 приведены значения многолетних наблюдений месячных ЗПВ в слое 0-100 см, указывающие на увеличение влаги в почвах ЦЧО в течение периода с 1958 по 2009 гг. Этому способствовало увеличение количества осадков в период вегетации (рис. 4), особенно в июне. Вероятно, могло иметь место возрастание количества зимних осадков, снегозапасов (их водного эквивалента), насыщавших почву как в метровом слое, так и на большей глубине (Оценочный доклад …, 2008; Кислов и др., 2008; Китаев, Кислов, 2008). Во всяком случае, в Восточно-Европейском регионе « …современное потепление не отразилось на количество воды в снежном покрове» (Конищев и др., 2008).

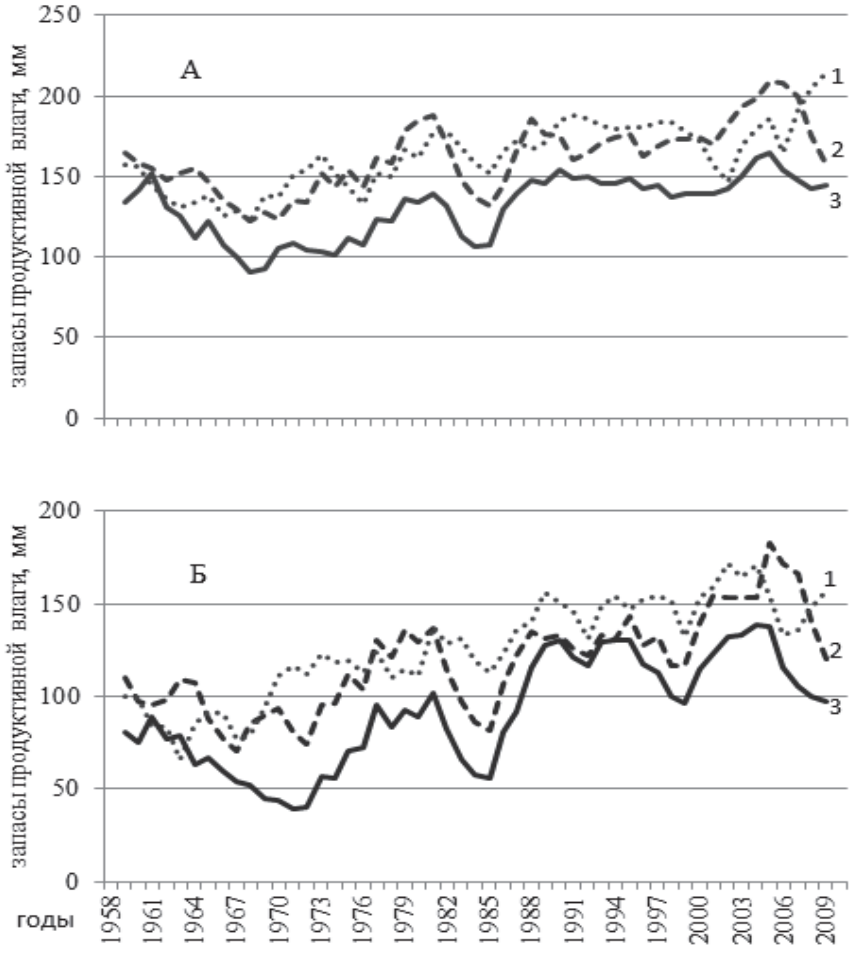

Рис. 3. *Трехлетние скользящие средние средних по области запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под ранними яровыми зерновыми культурами за период 1958-2010 гг. А – май, Б – июнь. Области: 1 – Воронежская, 2 – Тамбовская, 3 – Курская.*

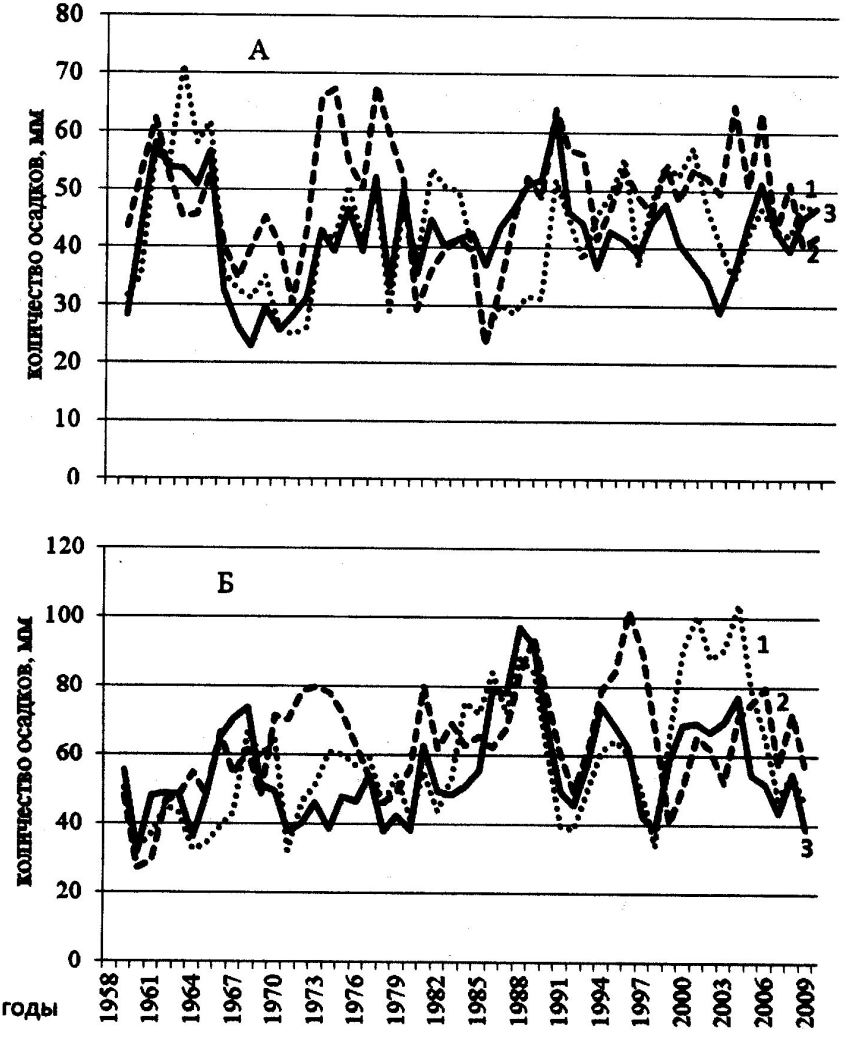

Рис. 4. *Трехлетние скользящие средние среднего по области количества осадков за период 1958-2010 гг. А – май, Б – июнь. Области: 1 – Воронежская, 2 – Тамбовская, 3 – Курская.*

Повышение ЗПВ в течение этих лет в ЦЧО могло способствовать повышению фактической урожайности яровых культур, но если таковое и происходило, то утверждать о влиянии именно ЗПВ сложно. В этом процессе могли играть роль и повышение культуры земледелия, повышение доз вносимых удобрений и т.д. На расчетную величину урожайности могло, вероятно, сказываться и сокращение площади посевных земель за счет вывода из использования малоплодородных.

Более того, судя по некоторым материалам (Сиротенко, Павлова, 2012; Павлова, Сиротенко, 2012) урожайность ярового ячменя в Центральном регионе за период с 1975 по 2010 гг. хотя и незначительно, но снижалась.

Поэтому вопрос о последующих изменениях фактической урожайности посевов остается открытым.

Сложность прогнозирования урожайности в будущие десятилетия связана не только с вариабельностью и повторяемостью тех или иных гидрометеорологических режимов в регионах, не только с некоторой неопределенностью будущих изменений климата, но и с оценкой чрезвычайно сложной и неаддитивной реакции растений на совокупность изменяющихся условий, адаптация к которым, если она и происходит, то весьма медленно и, прежде всего, на пользу самим организмам, а не человека с его желанием и надеждой на получение большей продукции.

В заключение можно отметить, что разработанный и используемый энергобалансовый подход к деятельности посевов, учитывающий приход и использование ими солнечной радиации, позволил оценить общую и хозяйственно ценную максимально возможную продуктивность (МВП и МВУ), минимально необходимое количество влаги в почве для получения такой продукции в ЦЧО, а так же выявить реальную урожайность ранних яровых культур, обусловленную, в частности, фактическими запасами почвенной влаги, при прочих оптимальных условиях роста. В то же время, в такой интегративной оценке не учитывается возможность получения несколько иных значений урожайности в силу различной и пока не дифференцируемой эффективности использования ФАР в течение вегетации посевов за счет наличия радиационных, гидротермических и других «критических периодов», влияющих, в итоге, на конечную продуктивность.

Из этого следует, что для более детального рассмотрения подобных вопросов требуются дальнейшие физиолого-метеорологические исследования с выявлением непосредственного участия солнечной

радиации в продукционном процессе в течение всего онтогенеза растений.

Благодарность.

Автор благодарен зав. кафедрой Метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, доктору геогр. наук, проф. А.В. Кислову; зав. кафедрой Физиологии растений Биологического факультета МГУ д.б.н., проф. Ермакову И.П.; ведущему научному сотруднику ВНИИСХМ д.б.н., проф. Грингофу И.Г.; зав. кафедрой Биофизики Физического факультета МГУ д.ф.-м.н., проф. Твердислову В.А. за постоянное внимание к данному направлению исследований. Автор признателен сотруднику кафедры Метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ Л.Л. Тарасовой, работавшей под руководством автора по данной тематике в ходе выполнения диссертационной работы, а так же аспиранту Экологического факультета РУДН Е.П. Простокишиной, за помощь в подготовке материалов для статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. 2012. Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. –М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 312 С.
2. Алехина Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф. и др. Физиология растений. Под ред. И.П. Ермакова. 2005. –М.: Академия, 640 С.
3. Гончаров Н.П., Гончарова П.Л. 2009. Методические основы селекции растений. Новосибирск: Гео. 427 С.
4. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. 2006. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. –М.: Тов. научн. изд. КМК. 512 С.
5. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. 2011. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т.1. Обнинск: ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 808 С.
6. Гусев Н.А. 1967. Физиология водообмена растений. В кн.: Физиология сельскохозяйственных растений Т.3, –М.: Изд-во Моск. ун-та.. С. 3-86.
7. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколихина М.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.В. 2008. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления 21-го века. –М.: МАКС Пресс. 292 С.
8. Китаев Л.М., Кислов А.В. 2008. Региональные различия снегонакопления – современные и будущие изменения. Криосфера Земли. Т.12, №2. С. 98-104
9. Клешнин А.Ф., Строгонов Б.П., Шульгин И.А. 1955. К вопросу об энергетическом балансе листьев растений. Физиология растений. Вып. 6, С. 1211-1217.

10. Клешнин А.Ф., Шульгин И.А. 1960. О связи между транспирацией и температурой листьев растений в естественных условиях. Докл. Выездной сессии ОБН в г.Казани. Казань:, КазГУ. С. 46-49.
11. Конищев В.Н., Гребенец В.И., Тумель Н.В., Кислов А.В. 2008. Изменения снежного покрова, многолетнемерзлых пород и инженерно-геокриологических параметров при глобальном потеплении. В кн.: Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления 21-го века. –М.: МАКС Пресс. С. 167-242
12. Кошкин Е.И. 2010. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. –М.: Дрофа, 638 С.
13. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. 2006. Физиология растений. –М.: Высшая школа. 742 С.
14. Кумаков В.А. 1985. Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. –М.: Колос. 270 С.
15. Молдау Х.А. 1977. Устьица – универсальные регуляторы фотосинтеза. Физиология растений. Т.24, № 5. С. 969-975.
16. Научно-прикладной справочник по климату СССР. 1990. Серия 3. Многолетние данные. –Л.: Гидрометеоиздат. Вып. 28. 365 С.
17. Нийлиск Х.И., Росс Ю.К. 1969. Особенности радиационного режима растительного покрова. В кн.: Общие теоретические проблемы биологической продуктивности. –Л.: Наука. С. 155-159.
18. Ничипорович А.А. 1956. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев. Тимирязевские чтения, XV. –М.: АН СССР. 93 С.
19. Ничипорович А.А. 1963. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах. В кн.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. –М.: АН СССР. С. 3-38.
20. Ничипорович А.А., Шульгин И.А. 1976. Фотосинтез и использование энергии солнечной радиации. В кн.: Ресурсы биосферы. Т 2. –Л.: Наука. С. 6-55.
21. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т. I. Изменения климата. –М.: Росгидромет. 227 С.
22. Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. 2012. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России. –С.-Пб.: Труды ГГО им. А.И. Воейкова. Вып. 565. С. 132-151.
23. Росс Ю.К. 1975. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. –Л.: Гидрометеоиздат. 342 С.
24. Росс Ю.К., Тооминг Х.Г. 1968. Ослабление прямой и суммарной радиации внутри посевов сельскохозяйственных культур и описывающие её полуэмпирические формулы. В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин: Валгус. С. 283-288.
25. Самукова Е.А. 2012. Тенденции временных изменений суммарной солнечной радиации в Европе. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. –С.-Пб.: С. 188-204.
26. Сивков С.И. 1968. Методы расчета характеристик солнечной радиации. –Л.: Гидрометеоиздат. 232 С.
27. Сиротенко О.Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. –Л.: Гидрометеоиздат. 167 С.

28. Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. 2012. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М.: Росгидромет. С. 165-189
29. Тарасова Л.Л., Шульгин И.А. 2010. Гидро-радиационный режим и урожайность яровых зерновых культур в Центральных черноземных областях и Среднем Поволжье. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. №4. С. 30-33.
30. Тимирязев К.А. 1948. Солнце, жизнь и хлорофилл. –М.: Сельхозгиз. Т. 1, С. 82-692.
31. Тооминг Х.Г. 1977. Солнечная радиация и формирование урожая. –Л.: Гидрометеоиздат. 200 С.
32. Шиловцева О.А., Дьяконов К.Н., Балдина Е.А. 2005. Косвенные методы суммарной фотосинтетически активной радиации по данным актинометрических и метеорологических наблюдений. Метеорология и гидрология. № 1. С. 37-47.
33. Шульгин И.А. 1973. Растение и Солнце. –Л.: Гидрометеоиздат. 252 С.
34. Шульгин И.А. 1988. Архитектура растений и продукционный процесс в оптимальных условиях. Фотосинтез и продукционный процесс. –М.: Наука. С. 115-135.
35. Шульгин И.А. 2002. Радиационные и физиологические параметры продуктивности агрофитоценозов. –М.: Изд-во Моск. ун-та. 57 С.
36. Шульгин И.А. 2004. Лучистая энергия и энергетический баланс растений. Фитометеорологические и эколого-географические аспекты. –М.: Альтекс. 141 С.
37. Шульгин И.А. 2009. Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. –М.: Альтекс. 217 С.
38. Шульгин И.А., Клешнин А.Ф., Щербина И.П. 1960. Энергетический баланс листьев растений в естественных условиях. Вестн. МГУ. Сер. 6. Биол. Почвовед. №6. С. 26-32.
39. Шульгин И.А., Климов С.В., Ничипорович А.А. 1975. Об адаптивности архитектуры растений к солнечной радиации. Физиология растений. Т. 22, Вып. 1. С. 40-48.
40. Шульгин И.А. Мурей И.А. 1978. Поглощение лучистой энергии и транспирация зеленого листа. Биол. Науки. №2. С. 101-111.
41. Шульгин И.А., Тарасова Л.Л. 2009. Агрометеорологические аспекты энергетического баланса растений и агрофитоценозов. В кн.: Агрометеорология XXI века. –М.: Изд. РГАУ-МСХА. С. 32-43.
42. Шульгин И.А., Щербина И.П. 1981. Адаптивность продуктивности пшеницы. Биол. Науки. №10. С. 5-22.
43. Шульгин И.А., Щербина И.П. 1988 К теории энергетических ресурсов продукционного процесса. Вестн. МГУ. Сер. 5. Геогр. №2. С. 28-35.
44. Шульгин И.А., Щербина И.П. 1990. Использование энергетических ресурсов в ходе продукционного процесса пшеницы. Биол. Науки. №9. С. 71-82.
45. Шульгин И.А., Тарасова Л.Л., Сенников В.А. 2011. Агрометеорологические аспекты оценки урожаев в условиях климатических изменений. В кн. Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям. –М.: Изд. РГАУ-МСХА. С. 90-100.

ТЕНДЕНЦИИ УВЛАЖНЕНИЯ ЗЕРНОВОГО ПОЯСА РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

А.Н. Золотокрылин, Е.А. Черенкова***

Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., д.29, Институт географии РАН.
*azolotokrylin1938@yandex.ru, **lcherenkova@marketresearch.ru

Реферат. По данным гидрометеорологических наблюдений Росгидромета исследовано изменение годового и летнего увлажнения зернового пояса в период 1936-2011 гг. Установлено, что во второй половине 1930-х годов увлажнение территории было наименьшим за весь период инструментальных наблюдений. Медленное повышение увлажнения (гумидизация климата) наблюдалось вплоть до 1990-х годов в западной части зернового пояса и примерно на 5 − 10 лет дольше в его восточной (европейской) части.

Предложена гипотеза, что в начале XXI века возможна смена тенденции увлажнения, по крайней мере, в европейской части зернового пояса России. Признаки этой смены уже устойчивы в его западной части и все чаще отмечаются в восточной части.

Ключевые слова. Региональное изменение, климат, коэффициент увлажнения Торнтвейта, гидротермический коэффициент Селянинова.

MOISTENING TENDENCIES IN GRAIN-GROWTH ZONE OF RUSSIA IN BEGINNING OF 21ST CENTURY

A.N. Zolotokrylin, E.A. Cherenkova***

Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia.
*azolotokrylin1938@yandex.ru, **lcherenkova@marketresearch.ru

Abstract. Changes of the annual and summer moistening in the grain-growth zone in 1936-2011 were studied using observational data from the weather stations of Russia. For the instrumental observations' period, it was found that moistening was the lowest in the second half of the 1930s. Slow increase in moisture (climate humidization) was observed up to 1990 in the western grain-growth zone. In the eastern (European) part it sustained 5 – 10 years more. Possibility of a change in the moistening tendency in the beginning of 21st century, at least in the

European part of the grain-growth zone of Russia, is hypothesized. Symptoms of this shift are stable in the western part, and are found more and more often in the eastern part.

Key words. Regional climate, change, moisture Thornthwaite index, Selyaninov hydrothermal coefficient.

Введение

Увлажнение в климатологическом смысле – соотношение между количеством выпадающих осадков и испаряемостью за год. Под летним увлажнением понимается отношение суммы осадков к испаряемости в сезон активной вегетации. Линейные тренды годового и летнего увлажнения преобладающей части зернового пояса были положительными за период с середины 1970-х годов – начало XXI в. (Сиротенко и др., 2007; Оценочный доклад…Т.2, 2008). Увеличение увлажнения подтвердили также его изменения в период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг. (Титкина и др., 2011). Повышение увлажнения не распространилось только на северо-западную часть зернового пояса (нечерноземные и часть центрально-черноземных районов Европейской территории России, ЕТР), где в последние десятилетия доминировал отрицательный тренд увлажнения.

Новые территориальные особенности изменения увлажнения были выявлены в работах (Черенкова, Золотокрылин, 2010; Золотокрылин, Черенкова, 2006, 2011). Авторы, дополнив период исследования данными с 1936г., пришли к выводу, что увлажнение, как в годовом, так и сезонном масштабе в среднем в полной мере медленно повышалось во всем зерновом поясе с 1936г. до начала 1990 годов, т.е. на протяжении более 50 лет. Затем в северо-западной части зернового пояса возникла тенденция уменьшения годового увлажнения. В то же время в остальной части пояса по направлению к востоку (часть Центрального Черноземья, Поволжье, Заволжье, Предуралье, Западная Сибирь) смены положительной тенденции увлажнения на отрицательную не было обнаружено и в начале XXI в. Важно отметить, что изменение летнего увлажнения не противоречило в общем положительной тенденции годового, но оно было более неоднородным на территории.

Повышение увлажнения происходило на фоне увеличения общего количества осадков в Европе и роста интенсивности экстремальных осадков за последние 60 лет с изменением их структуры: они перегруппировались из преимущественно одно-двухсуточных в многосуточные (Золина, 2011). Также было отмечено общее повышение водности рек почти во все сезоны за последние 30 лет (Оценочный доклад…Т.2, 2008). Увеличение увлажнения нашло отражение в росте климатообусловленной урожайности (Павлова, Сиротенко, 2012) и восстановлении естественной степной растительности (Сажин и др., 2006; Новикова и др., 2011).

Возникает вопрос: можно ли рассматривать зафиксированное повышение увлажнения как временное или оно является признаком потепления регионального климата? Если данное увеличение увлажнения имеет флуктуационный характер, то возрастает вероятность возможной смены тенденции увлажнения зернового пояса в скором времени. Сигналом этой смены стали природные последствия засух 2010 и 2012 гг.

Методически ответ на данный вопрос целесообразно готовить, используя районирование территории по однородным колебаниям увлажнения (Черенкова, Золотокрылин, 2010). Дополнение временных рядов показателей увлажнения новыми данными и оценки его изменений в заданных районах поможет составить заключение по поставленному вопросу. Таким образом, данная статья направлена на изучение вопроса о возможной смене тенденции увлажнения зернового пояса.

Методы и материалы

Материалы включают средние месячные данные метеорологических наблюдений за температурой воздуха и осадками из климатического архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД). Исследование проведено для периода, начиная с 1936г., когда наземная наблюдательная сеть метеостанций России существенно расширилась и получаемые результаты стали более точными.

Как известно, вычисляемые по данным метеостанций коэффициенты увлажнения (отношение годовой суммы осадков в мм к годовой испаряемости в мм) отличаются друг от друга способами расчета испаряемости. В данной работе испаряемость вычислена по методу К.Торнтвейта (Thornthwaite, 1948):

$$E_{0Торнтвейт} = 1{,}6\ (10T / I)^a\ ,$$

где $E_{0Торнтвейт}$ – испаряемость, см. мес.$^{-1}$;

T – средняя месячная температура воздуха, °С;

$a = f\ (I)$, где I – тепловой индекс, учитывающий поправку на широту. Для расчета годовой испаряемости учитываются только месяцы с положительной средней месячной температурой воздуха.

Значения коэффициента увлажнения Торнтвейта (КУТ) получены по формуле:

$$КУТ = P_{I\text{-}XII} / E_O,$$

где $P_{I\text{-}XII}$ – годовая сумма осадков (мм), E_O – суммарная годовая испаряемость по методу Торнтвейта (мм).

Для характеристики летнего увлажнения был рассмотрен гидротермический коэффициент Г.Т.Селянинова (ГТК) (Селянинов, 1928). Значения ГТК вычисляются за период с активными температурами воздуха по формуле:

$$ГТК = \Sigma P_{>10°C} / 0{,}1 \Sigma T_{>10°C},$$

где $T_{>10°C}$ – сумма средних суточных температур воздуха за период с температурами воздуха выше 10°С, Р – суточная сумма осадков за тот же период.

В данной работе мы стремились выделить районы, где колебания увлажнения на территории равнин России были бы сходными. Для выявления относительно однородных групп наблюдений – временных рядов, отражающих тенденцию ежегодного изменения КУТ в период 1936-2011 гг., применен кластерный анализ методом k-средних (Fraley, Raftery, 2002). В качестве меры сходства/различия использовано евклидово расстояние. Качество выполненного районирования определялось по методике расчета относительного показателя качества районирования, характеризующего уменьшение погрешности определения среднего при делении территории на районы (Мирвис, 1996). Полученное в работе значение показателя, равное 0,64,

свидетельствует о достаточно хорошем качестве выполненного районирования.

На исследуемой территории было выделено четыре района-кластера относительно однородных колебаний годового увлажнения. Необходимо отметить, что выявленные границы районов не являются строго фиксированными. Применение других методов математической статистики может привести к получению других, но достаточно близких результатов. Описанное здесь разбиение характеризуется наибольшими коэффициентами корреляции каждого элемента кластера с его центром (рис.1), причем все коэффициенты статистически значимы на уровне 0,95.

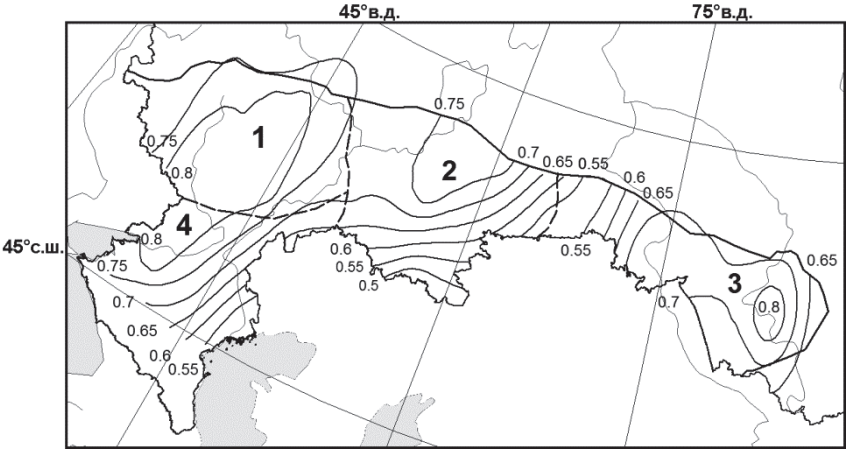

Рис. 1. *Границы районов 1, 2, 3, 4 с однородными изменениями коэффициента увлажнения Торнтвейта (КУТ) в период 1936-2011 гг. (пунктирная линия). Сплошными линиями показаны коэффициенты корреляции КУТ с центрами районов.*

Для определения периодов различной скорости изменения годового и летнего коэффициентов увлажнения были построены нелинейные тренды коэффициента увлажнения в каждом районе за период 1936-2011 гг. Дополнительно были определены средние скорости изменений увлажнения, соответствующие линейному тренду в каждом районе за периоды 1936-1990 и 1991-2011 гг., чтобы получить довод в пользу гипотезы смены тенденции увлажнения в последней декаде XXI в. на ЕТР.

Результаты и обсуждение

Включение в рассмотрение новых наблюдений за температурой и осадками вызвало подвижки границ районов с однородными изменениями увлажнения. Однако эти изменения были не столь существенными, поэтому было решено ими пренебречь. В итоге уточненное районирование коэффициента увлажнения осталось таким же, как прежде: три района на ЕТР (1, 2, 4) и один (3), находящийся на юге Западной Сибири и включающий Алтайский край (рис.1).

На рис. 2 приведены осредненные по районам межгодовые изменения годового коэффициента увлажнения, аппроксимированные полиномиальными трендами 3-го порядка. Для уменьшения разброса на графике приведены пятилетние средние значения коэффициента увлажнения, а прерывистыми линиями показаны интервалы их среднеквадратического отклонения от среднего. Как видно из рис. 2а, зафиксированная ранее в 1-м районе тенденция уменьшения увлажнения после 1990-х годов продолжала сохраняться (пятилетние средние значения вышли за пределы диапазона среднеквадратического отклонения). Во 2-м и 4-м районах тенденция уменьшения увлажнения обозначилась на рубеже веков, при этом пятилетние средние значения остались в коридоре среднеквадратического отклонения (рис. 2б и 2г). Особенностью поведения увлажнения в 3-м районе стало его падение в последние годы. Таким образом, возникшая вначале тенденция уменьшения увлажнения в северо-западной части зернового пояса выразилась восточнее и южнее (районы 2 и 4) с запаздыванием примерно в 5-10 лет. И к концу первой декады XXI в. тенденция уменьшения увлажнения проявилась в азиатской части зернового пояса (3 район). Отмеченный эффект запаздывания смены тенденции увлажнения в восточном направлении остается пока необъясненным. Можно лишь предположить, что увеличение такого запаздывания от более западных районов к более восточным не случайно и, прежде всего, связано с ослаблением влияния Атлантики к востоку. По-видимому, тенденция постепенной аридизации, сформировавшаяся в 1, 2 и 4-ом районе в 90-годах прошлого века, в конце концов, распространится и на 3-й район.

Дополнительно мы оценили изменения КУТ по данным отдельных длиннорядных метеостанций, ведущих наблюдения на территории исследования с начала XX-го века. Полученные результаты подтвердили предположение о том, что во второй половине 30-х годов XX-го века увлажнение зернового пояса России было наименьшим за весь период инструментальных наблюдений.

Межгодовые изменения увлажнения территории и соответственно смена тенденции в большей степени определяются вариациями осадков, чем испаряемости (Черенкова, Золотокрылин, 2010). Исследования многолетних колебаний годовых осадков на ЕТР показали преобладание масштаба с периодами 10-30 лет, причем на севере и востоке равнины доминируют долгопериодные колебания, а на юге вклад короткопериодных и долгопериодных примерно равен (Попова, 1997). Характерные масштабы (первые десятки лет), обусловленные изменением форм циркуляции атмосферы, были выявлены в многолетнем режиме температуры воздуха, величины осадков и стока бассейна Волги (Переведенцев и др., 2000). Эти масштабы примерно соответствуют продолжительности фаз Атлантической мультидекадной осциляции (АМО) и Северо-Атлантического колебания (САК). Но они все же короче выявленных в межгодовом ходе увлажнения положительной тенденции продолжительностью 50-60 лет в 1, 2 и 3 районах (рис 2а, б, в).

Доводом в пользу гипотезы смены фазы гумидизации зернового пояса ЕТР на фазу аридизации служат коэффициенты линейного тренда, вычисленные в заданные периоды. Как видно из таблицы, в 1936-1990 гг. тренды КУТ были положительны во всех рассмотренных районах. Если принять в качестве меры существенности тренда долю дисперсии климатической переменной, объясняемой трендом, 15% и более, то гумидизация климата достоверно проявилась на ЕТР в 1936-1990 гг. В период 1991-2011гг. знак тренда изменился в 1-м, 2-м и 4-м районе, но остался положителен в 3-м районе. Несущественность трендов КУТ во второй период вынуждает искать дополнительные доводы в пользу гипотезы.

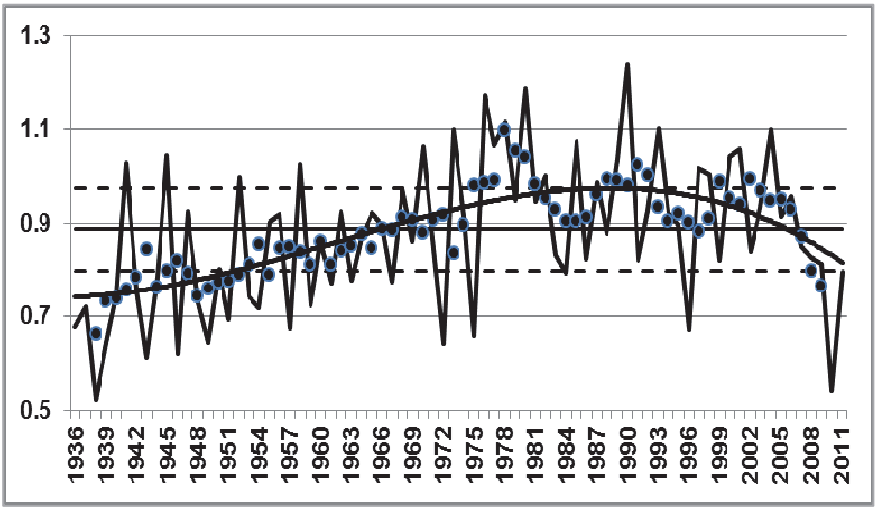

Рис. 2а.

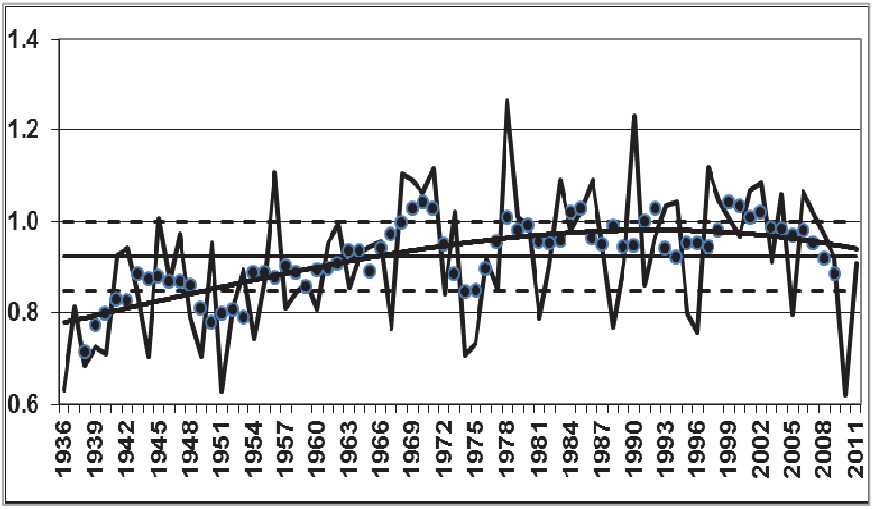

Рис. 2б.

Рис. 2 а,б. *Изменения КУТ, осредненные по районам однородных колебаний: а) 1-му, б) 2-му в период 1936-2011 гг. и нелинейные тренды в районах. Точками показаны средние за 5 лет значения КУТ, сплошной прямой линией и пунктирными линиями отмечены среднее значение и диапазон среднеквадратического отклонения, вычисленные по средним КУТ за пятилетие.*

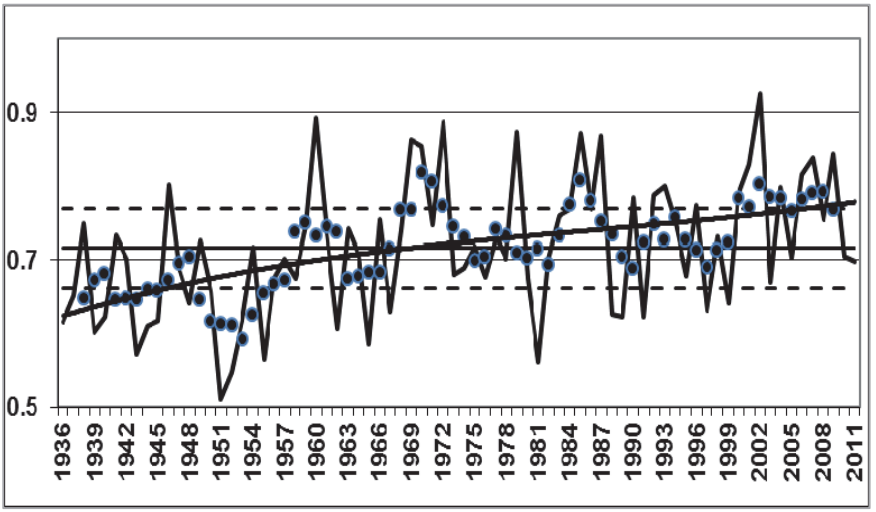

Рис. 2в.

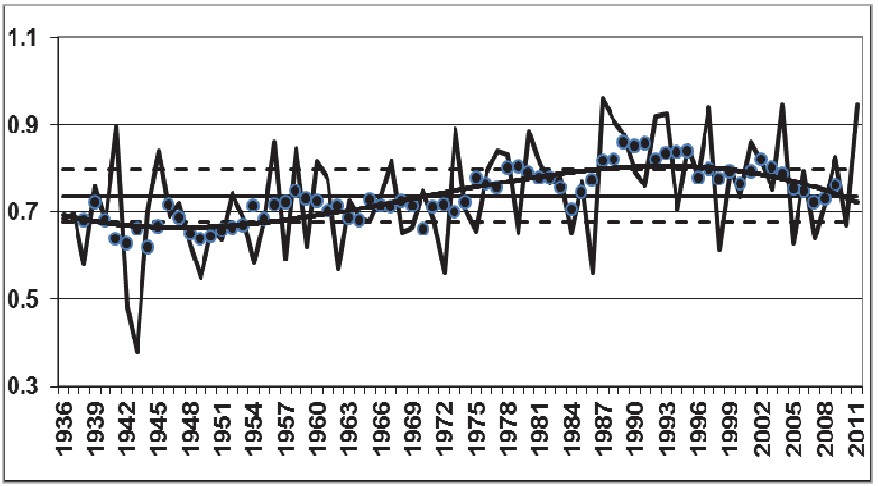

Рис. 2г.

Рис. 2 в, г. *Изменения КУТ, осредненные по районам однородных колебаний: в) 3-му и г) 4-му в период 1936-2011 гг. и нелинейные тренды в районах. Точками показаны средние за 5 лет значения КУТ, сплошной прямой линией и пунктирными линиями отмечены среднее значение и диапазон среднеквадратического отклонения, вычисленные по средним КУТ за пятилетие.*

Таблица

Коэффициенты линейного тренда в районах однородных изменений КУТ и ГТК в периоды 1936-1990 и 1991-2011 гг. В скобках указана его доля в общей дисперсии (%)

Периоды	Районы КУТ				Районы ГТК			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1936-1990 гг.	0,006 (32)	0,004 (23,3)	0,002 (14,4)	0,003 (15,4)	0,007 (15,5)	0,002 (2)	-0,002 (3,1)	0,003 (8,7)
1991-2011 гг.	-0,007 (10,9)	-0,003 (2,7)	0,003 (5,2)	-0,003 (3,6)	-0,008 (5,5)	-0,001 (0,1)	0,009 (14,2)	-0,003 (1,2)

В 1-м и 4-м районе направленность изменений годового увлажнения и увлажнения в сезон вегетации (рис. 3) совпадает на протяжении всего рассмотренного периода, характеризующие их временные ряды коррелируют с коэффициентами 0,8 и 0,81 соответственно. Во 2-м районе на протяжении шестидесяти лет колебания КУТ и ГТК были сходными. Начиная со второй половины 90-х годов XX-го века, здесь стала наблюдаться тенденция увеличения летнего увлажнения на фоне снижения годового увлажнения (коэффициент корреляции рядов КУТ и ГТК составил 0,71). В 3-м районе рассогласование направленности изменений годового и летнего увлажнения наблюдалось в период 1946-1980 гг.: увлажнение в сезон вегетации понижалось, а годовое увлажнение продолжало медленно нарастать (коэффициент корреляции рядов КУТ и ГТК – 0,66).

Независимым доводом в пользу выдвинутой авторами гипотезы о смене тенденции увлажнения может служить комбинированный анализ изменения сельскохозяйственных угодий и трендов нормированного разностного вегетационного индекса (NDVI), вычисленных по данным радиометра MODIS на территории всего зернового пояса СНГ за период 2001-2008 гг. (Wright et al., 2012). Авторы установили доминирование статистически значимых отрицательных трендов NDVI как для сельскохозяйственных, так и для естественных угодий в европейской и азиатской частях зернового пояса, причиной которых авторы считают возникший в течение нескольких лет дефицит почвенной влаги. Засуха 2010 и 2012 гг., несомненно, усугубила эту ситуацию.

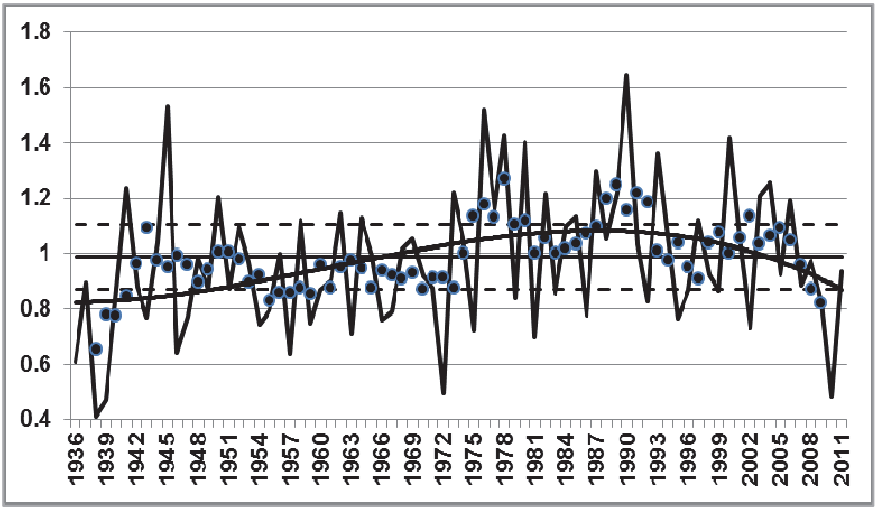

Рис. 3а.

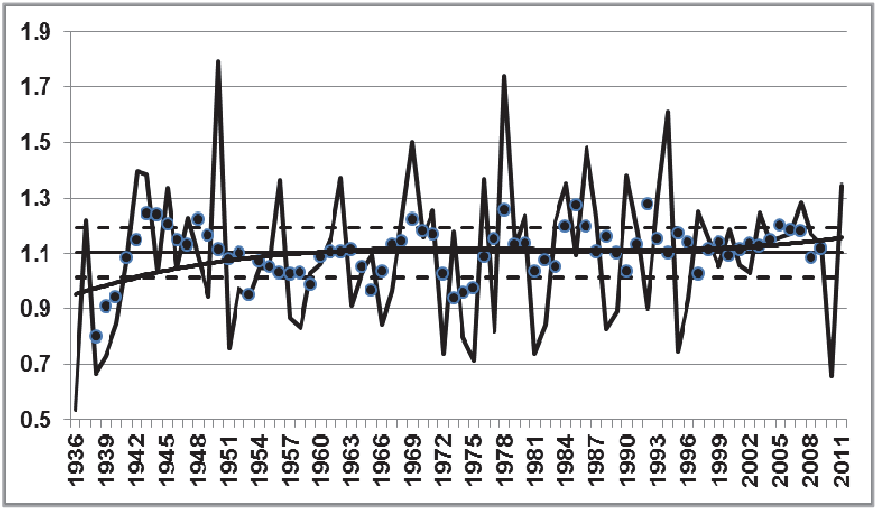

Рис. 3б.

Рис. 3 а, б. *Изменения ГТК, осредненные в период 1936-2011 гг. по районам однородных колебаний: а) 1-му, б) 2-му и нелинейные тренды в районах. Точками показаны средние за 5 лет значения ГТК, сплошной прямой линией и пунктирными линиями отмечены среднее значение и диапазон среднеквадратического отклонения, вычисленные по средним ГТК за пятилетие.*

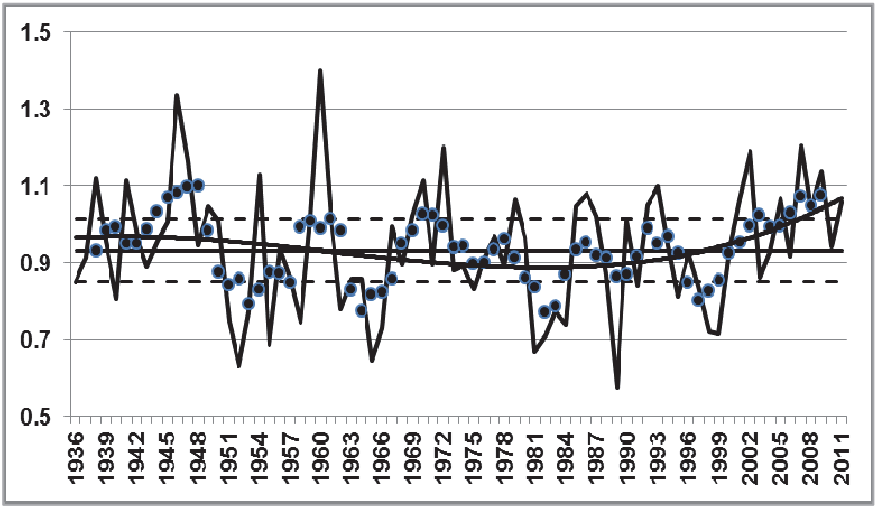

Рис. 3в.

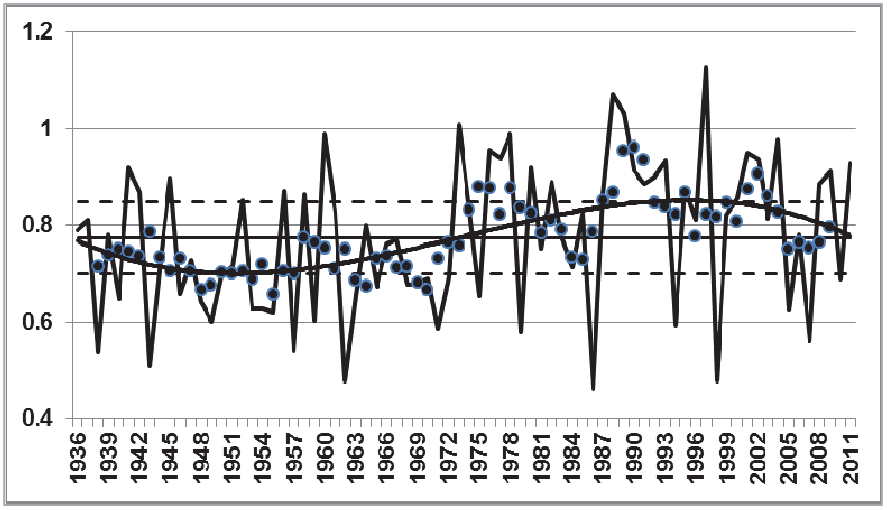

Рис. 3г.

Рис. 3 г, в. *Изменения ГТК, осредненные в период 1936-2011 гг. по районам однородных колебаний: в) 3-му и г) 4-му и нелинейные тренды в районах. Точками показаны средние за 5 лет значения ГТК, сплошной прямой линией и пунктирными линиями отмечены среднее значение и диапазон среднеквадратического отклонения, вычисленные по средним ГТК за пятилетие.*

Заключение

Во второй половине 30-х годов XX-го века увлажнение зернового пояса России было наименьшим за весь период инструментальных наблюдений. С этого времени началось его медленное повышение (гумидизация климата), которое остановилось в 1990-х годах вначале в западной части зернового пояса и затем через примерно 5-10 лет в восточной (европейской) части пояса. Тенденция повышения увлажнения пока еще сохраняется в азиатской части зернового пояса. Предложена гипотеза, что в начале XXI в. возможна смена тенденции увлажнения, по крайней мере, в европейской части зернового пояса. Признаки этой смены уже устойчивы в европейской западной части пояса и все чаще отмечаются в европейской восточной части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золина О.Г. 2011. Изменение длительности синоптических дождевых периодов в Европе с 1950 по 2008 годы и их связь с экстремальными осадками. Доклады РАН. Т.436, № 5. С. 690-695.
2. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. 2011. Динамика границ зон увлажнения суббореальных ландшафтов России в XX-XXI веках. Известия РАН. Серия географическая. №4. С. 33-41.
3. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. 2006. Изменение индикаторов соотношения тепла и влаги, биопродуктивности в зональных равнинных ландшафтах России во второй половине XXв. Известия РАН. Серия географическая. №3. С. 19-28.
4. Мирвис В.М. 1996. Районирование в целях изучения климатических аномалий (на примере основной зернопроизводящей зоны СНГ). Известия РАН. Серия географическая. №1. С.45-60.
5. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.Б., Вышивкин А.А. Ответные реакции экосистем на изменение водного режима территорий в степной зоне. Аридные экосистемы. 2011. Т. 17, № 3. С. 38-48.
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т.II. Последствия изменений климата. –М.: Росгидромет. 288 С.
7. Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. 2012. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России. Труды главной геофизической обсерватории. –С.-Пб. Вып. 565. С. 132–151.
8. Переведенцев Ю.П., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. 2000. Многолетние изменения гидрометеорологических условий на территории Волжского бассейна. Тр. XI съезда РГО. Т. 5, С. 102-104.
9. Попова В.В. 1997. Структура многолетних колебаний осадков на Русской равнине. Автореферат дисс. на соиск учен. степ. геогр. наук. –М.: ИГ РАН. 24 С.

10. Сажин А.Н., Петров.С.А., Погосян Н.В., Васильев Ю.И., Волошенкова Т.В., Козина О.В., Моников С.Н. 2006. Связь внутривековых изменений увлажнения со сменой циркуляционных эпох и ее отражение в природных процессах Атлантико-Европейского сектора Евразии. Известия РАН. Серия географическая. №1. С. 26-34.
11. Селянинов Г.Т. 1928. О сельскохозяйственной оценке климата. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. Вып. 20. С. 165-177.
12. Сиротенко О.Д., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Абашина Е.В., Павлова В.Н. 2007. Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности агросферы России. Метеорология и гидрология. №8. С. 90-103.
13. Титкина С.Н., Гершинкова Д.А., Семенов С.М. 2011. Климатические изменения увлажнения на территории России и соседних стран в конце XX века – начале XXI века. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Том 24. С. 393-400.
14. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. 2010. Реакция границ зон увлажнения равнин России на изменения климата. Метеорология и гидрология. №12. С. 17-25.
15. Fraley C., Raftery A.E. 2002. Model-based clustering, discriminant analysis, and density estimation. Journal of the American Statistical Association. V. 97. №458. Pp.611-631.
16. Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rev. V. 38, №1. P. 55-94.
17. Wright C.K., de Beurs K.M., Henebry G.M. 2012. Combined analysis of land cover change and NDVI trends in the Northern Eurasian grain belt. Front. Earth Sci. V.6, №2. P. 177-187.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА РАННИХ ЭТАПАХ ОНТОГЕНЕЗА И ФОРМИРОВАНИЯ ВСХОДОВ

А.Н. Полевой, В.В. Синицына***

Украина, 65016, Одесса, ул. Львовская, д.15, Одесский государственный экологический университет, *apolevoy@te.net.ua, **victoria.sinitsyna@gmail.com.

Реферат. Рассматривается процесс прорастания семян и формирования всходов зерновых культур, обусловленный факторами окружающей среды. Описано влияние температуры и влажности почвы на скорость протекающих в семени процессов, а также на появление всходов при разной плотности почвы. Ряд численных экспериментов показал, что увлажнение почвы имеет наибольшее влияние во время формирования всходов на этапе поглощения и накопления влаги семенем (от посева до запуска ростовых процессов). Выявлена высокая чувствительность скорости удлинения колеоптиля к температуре и плотности почвы.

Ключевые слова. Семя, эндосперм, зародыш, проросток, колеоптиль, гидролиз, дыхание, белок, углеводы, плотность почвы, всходы.

MODELING OF GRAIN DEVELOPMENT AT EARLY STAGES OF ONTOGENESIS AND SEEDLING EMERGENCE

A.N. Polevoy, V.V. Sinitsyna***

Odessa State Environmental University, 15, Lvovskaj str., 65016 Odessa, Ukraine, *apolevoy@te.net.ua, **victoria.sinitsyna@gmail.com.

Abstract. The process of seed germination and seedling formation of crops caused by environmental factors is considered. The effect of soil temperature and humidity on the rate of intra-seed processes and emergence of seedlings under different soil density is described. A number of numerical experiments showed that soil moistening has the greatest influence during the time of seedlings formation at the stage of absorption and accumulation of moisture by a seed (from seed sowing to the beginning of the growth process). High sensitivity of coleoptile elongation rate to temperature and soil density was found.

Key words. Seed, endosperm, germ, sprout, coleoptile, hydrolysis, respiration, protein, carbohydrates, soil density, sowing.

Введение

Первым критическим периодом для растений является развитие от посева до всходов. От того, при каких условиях проходит этот период, зависит всё дальнейшее вегетативное и репродуктивное развитие и, в конечном итоге, формирование урожая. Математическое описание и моделирование процесса прорастания семян дает возможность получения данных о сроках появления всходов, оценки качества и полноты всходов и их прогнозирования. В существующих моделях типа «погода – урожай» период от посева до всходов представлен как блок (или субмодель). Поэтому от адекватности результатов работы этого блока зависит точность прогнозирования всего последующего вегетационного периода.

Целью исследования является рассмотрение существующих подходов к моделированию периода от посева до всходов зерновых культур, моделирование процессов, происходящих в семени при прорастании под воздействием факторов среды, формирования всходов, описание структуры разработанной модели периода посев – всходы, а также результатов проведенных численных экспериментов.

Материалы и методы

Проблема моделирования и прогнозирования урожайности в той или иной степени рассматривается многими учеными всех стран с развитым сельским хозяйством. На сегодняшний день известно большое количество моделей развития и формирования продуктивности различных сельскохозяйственных культур. В большинстве этих моделей ранние этапы развития растений практически не рассматриваются или же существуют как составные блоки моделей «погода – урожай», но выделяются и некоторые самостоятельные модели.

Модели учитывают широкий спектр факторов окружающей среды, влияющих на прорастание, хотя существуют и более простые модели, учитывающие влияние лишь нескольких факторов. Такие модели являются удобными в применении, но порой уступают в точности многофакторным моделям. Однако, нельзя однозначно сказать, какие из них лучше применять на практике, каждая из них имеет свои, присущие ей преимущества и недостатки.

В качестве входной информации модели обычно используют параметры почвы (ее влажность, температуру, водной потенциал, плотность и т.п.) и характеристики посевного материала (масса и размеры семени, содержание влаги в семени, его водный потенциал, проницаемость оболочек семян и т.д.). Результатом расчетов моделей являются сроки и полнота появления всходов.

А.Н. Полевому, М.А. Строгановой и А.И. Коровину (Строганова и др., 1983; Польовий, 2008) в созданной модели удалось подробно описать физиолого-биохимические процессы в семени в период от посева до появления всходов. Модель состоит из блоков, описывающих каждый из этих процессов. Поскольку гидролиз, дыхание и последующий рост регулируются влажностью семян, поэтому в начальном блоке модели учтена также скорость накопления влаги $\left(\frac{dm}{dt}\right)$, которая рассматривается как состоящая из фаз простой диффузии и осмоса; она представлена уравнением

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} c(m_s - m) & при \quad m_0 \le m < m_{crit}^1 \\ k_w A(\psi^{out} - \psi^{in}) & при \quad m_{crit}^1 \le m < m_{crit}^2 \end{cases}, \quad (1)$$

где m – количество поглощенной воды в момент t; c – коэффициент скорости набухания; m_s – максимальное количество воды, которое может быть поглощено путем диффузии; k_w – коэффициент проницаемости; A – коэффициент, характеризующий размеры семени; ψ^{out}, ψ^{in} – водные потенциалы почвы и семян; m_0 – содержание влаги в семени при посеве; m_{crit}^1, m_{crit}^2 – критические значения влажности, определяющие начало гидролиза и время прорастания семян.

Упрощенные модели ранних этапов развития зерновых рассматривают динамику процессов, происходящих в семенах, как перераспределение масс между запасными и растущими органами. В таком случае учитывается только физика процесса прорастания.

Модель В.Н. Павловой (Павлова, 1983) описывает набухание зерновки следующим образом

$$\theta^{j+1} = \theta^{j} + \delta_W \xi(T)\eta(j)(\theta_S - \theta^{j}), \quad (2)$$

где θ – влажность зерна в j-е и (j+1)-е сутки; δ_W – единичная функция, равная единице в диапазоне доступной влаги и нулю – вне этого диапазона; $\xi(T)$, $\eta(j)$ – функции, учитывающие влияние окружающей среды; θ_S – влажность зерна, при которой семя наклевывается. Расчет ведется пока $\theta^{j+1} \le \theta_S$.

Динамику массы зерновки, корня и побега согласно Павловой можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} m_S^{j+1} = m_S^{j} - (m_S^{j} R_0 \varphi_T + \Delta m_S^{j}), \\ m_h^{j+1} = m_h^{j} + \alpha_h(T,W)\Delta m_S^{j}, \\ m_r^{j+1} = m_S^{j} - m_h^{j+1}, \end{cases} \quad (3)$$

где m_P ($P \in S, h, r$) – масса органа в j-е и (j+1)-е сутки; R_0 – коэффициент дыхания поддержания; φ_T – температурный коэффициент дыхания; $\alpha_h(T,W)$ – доля питательных веществ, направленных на рост; Δm_S^{j} – изменение массы зерна за j-е сутки.

Модель прорастания и формирования всходов также предложил В.С. Антоненко (Антоненко, 2002). В ней учтены водные потенциалы семян и почвы, гидролиз запасных веществ и дыхание зерновки и проростка. Скорость гидролиза $\left(\frac{dm_{сем}^{гидр}}{dt}\right)$ в модели описана с учетом влияния температуры почвы на глубине заделки семян, которое учитывается с помощью функции $k_{сем}(T_n)$

$$\frac{dm_{сем}^{гидр}}{dt} = K_{сем}^{гидр} m_{сем} k_{сем}(T_n), \quad (4)$$

где $K_{сем}^{гидр}$ – коэффициент скорости гидролиза; $m_{сем}$ – масса семени.

Расходы на дыхание семян $\left(\frac{dR_{сем}}{dt}\right)$ здесь представлены в виде уравнения

$$\frac{dR_{сем}}{dt} = c_m m_{сем} Q_R(T_n), \quad (5)$$

где c_m – коэффициент затрат дыхания поддержания; $Q_R(T_n)$ – функция влияния температуры почвы на интенсивность дыхания семян. Часть питательных веществ, оставшихся после затрат на дыхание, является резервом для роста корня и колеоптиля.

О.А. Немченко и Л.И. Мусатенко рассматривают рост и метаболизм растений на ранних этапах органогенеза (Немченко, Мусатенко, 1982), разделяя их на три основные составляющие: гидролиз запасных веществ и образование фондов, транспорт фондовых веществ в проростки, синтез из них новой структурной фитомассы. Из структурных веществ в модель были включены сложные углеводы и белки. В каждом компартменте выделено два фонда лабильных веществ – фонд углеводов, состоящий из моно-и олигосахаридов, и фонд азота, который состоит из аминокислот.

Поддержание жизнеспособности семян и проростков, включающие белковый обмен, и поддержка ионного градиента на мембранах требует затрат энергии, которые учитываются в модели посредством дыхания поддержки. Затраты энергии, необходимые для создания новой структурной массы, характеризуются здесь дыханием роста.

Согласно (Полуэктов и др.., 2006), динамику роста основных биометрических показателей модели можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dB_l}{dt} = SHARE \cdot \dfrac{dB_{st}}{dt}, \\ \dfrac{dB_r}{dt} = (1 - SHARE) \cdot \dfrac{dB_{st}}{dt}, \\ L_l = BL_l \cdot B_l, \\ L_r = BL_r \cdot B_r, \end{cases} \quad (6)$$

где B_l, B_r, B_{st} – сухая биомасса побега, корня и всего проростка, L_l, L_r – длина листа и корня, BL_l, BL_r – коэффициент конверсии сухой структурной биомассы в длину для побега и корня.

Алгоритм ростовой регуляции, выраженный с помощью переменной *SHARE*, приобретает значение от 0 до 1. Вся модель разделена на последовательные подмодели: поглощение воды семенами, углеводно-азотного метаболизма, углеводно-азотного взаимодействия в эндосперме, углеводно-азотного взаимодействия в проростке.

В работах (Jame, Cutforth, 2004) был проведен ряд экспериментов по проращиванию семян в закрытом грунте, на основе которых была определена общая бета-функция, описывающая зависимость скорости прорастания *GR* от температуры *T:*

$$GR = \exp(\mu)(T)\alpha(42 - T)\beta. \quad (7)$$

На основе регрессионного анализа было определено значение параметров бета-функции: μ =−8,0166, α = 1,80 и β = 0,72. Для определения оптимальной температуры T_0 и оптимального значения *DDR* (уровень ежедневного развития) T_0 (DDR_0) бета-функции были использованы следующие уравнения:

$$T_0 = \frac{\alpha T_c + \beta T_b}{\alpha + \beta}, \quad (8)$$

$$DDR_0 = \mathbf{exp}(\mu)\alpha^{\alpha}\beta^{\beta}\left(\frac{T_c - T_b}{\alpha + \beta}\right)^{\alpha+\beta}. \quad (9)$$

Установлено, что при оптимальной температуре скорость прорастания при T_0 составляет около 0,9 относительных единиц в день.

В исследованиях (David M. Alm et al, 1993) предлагается определять скорость прорастания семян при помощи уравнения

$$CGV = \frac{\sum N_j}{\sum N_j d_j}, \tag{10}$$

где N_j – количество проросших семян за d_j дней после первоначального полива (посадки) и j – номер наблюдения.

CGV изменяется в пределах от 0 до 1. Кроме того, определяется индекс температуры прорастания GTI.

Уровень прорастания при нормальных условиях GR_i^{REF} прямо пропорционален количеству дней после посадки DAP_i

$$GR_i^{REF} = 1/DAP_i \tag{11}$$

Время появления всходов (ER_i) рассчитывается по формуле

$$ER_i = ER^{REF} \cdot ETI \cdot EWI, \tag{12}$$

где ER^{REF} – время появления всходов при нормальных условиях; ETI и EWI – функции влияния температуры и осмотического потенциала на продление осевых органов соответственно.

В работе (Forcella et al, 2000) принято отдельно рассматривать состояние покоя семян. Модель основана на предположении, что для начала развития необходимо накопление «термического времени». Для этого рассчитывается сумма эффективных температур согласно уравнению

$$TT_{ar} = (T_s - T_1)\, t_{ar}, \tag{13}$$

где TT_{ar} – термическое время развития; T_s – накопление температур; T_1 – критический уровень температуры, при котором развитие не происходит; t_{ar} – время, которое требуется для созревания.

Помимо этого, модель рассчитывает потери после начала развития семени из-за изменения водного потенциала среды, это позволяет получить 50% проросших семян $\psi_{b(50)}$ что, в свою

очередь, является линейной функцией TT_{ar}. Уменьшение $\Psi_{b(50)}$ за весь период описывается уравнением

$$\Psi_{b(50)decrement} = \frac{\Psi_{b(50)initial} - \Psi_{b(50)final}}{TT_{ar}}. \qquad (14)$$

Кроме основных факторов почвы, определяющих прорастание семян, в модели учитывается качество почвенного воздуха.

На взятом за основу принципе накопления температур основаны также и прогнозы наступления фазы всходов зерновых культур.

Прогноз сроков появления всходов для кукурузы был разработан Ю.И. Чирковым. Этот метод прогноза также основан на зависимости скорости развития кукурузы от температуры и влажности почвы с учетом глубины заделки семян. Согласно прогнозу погоды и климатическим данным определяется ожидаемый температурный режим ближайших декад (Чирков, 1969). Далее рассчитывается дата накопления суммы температур

$$D = D_1 + \frac{83 + 7(h - 4)}{K_W(t - 8)}, \qquad (15)$$

где D – прогнозная дата появления всходов; D_1 – исходная дата по прогнозу; t – средняя температура почвы, h – глубина заделки семян, K_W – коэффициент учитывающий влажность почвы.

Предложенный Ю.И. Чирковым метод прогноза имеет наиболее высокую оправдываемость при учете условий конкретных хозяйств.

В.П.Дмитренко была получена зависимость между продолжительностью периода «посев-всходы» и средней температурой на основе экспериментальных данных, в которых было исключено случайное влияние влажности почвы, размер семян и глубина его заделки, а также неточность фенологических наблюдений (Дмитренко, 1961). Отношение наименьшей продолжительности периода развития к продолжительности при данной температуре отображены с помощью скорости развития растений в относительных единицах и описывает, так называемый, коэффициент полезного действия температуры для развития. Относительная скорость суточного развития при данной температуре η_c равна

$$\eta_c = e^{-\frac{1}{at^2+bt+c}} \quad (16)$$

Далее в предложенной методике последовательно складываются значения относительной скорости суточного развития, получают суммарный эффект скорости развития растений в зависимости от температурных условий. Принято считать, что термический режим способствовал наступлению той или иной фазы развития, при прочих равных условиях, если величина суммарного эффекта за некоторый период равна или немногим больше единицы. Этот подход позволяет достаточно точно прогнозировать дату появления всходов с возможным отклонением в 1-3 дня. Незначительная ошибка значений при сравнении с полевыми данными обусловлена, по мнению автора, неточностью проведения фенологических наблюдений, ведь в большинстве полевых книг приводится глазомерная оценка.

За последние несколько десятилетий был создан ряд математических моделей роста сельскохозяйственных культур, таких как CERES, WOFOST, SUCROS, APSIM, InfoCrop т.п., в которых также частично учитываются ранние этапы развития растений (Aggarwal et al., 2006; Palosuo et al., 2011).

Механистические модели роста используются для исследования процесса усвоения углерода и прироста биомассы. Большинство моделей применимы только к одному виду растений, например, SOYGRO для бобовых, CERES-Maize для кукурузы, CERES-Wheat для пшеницы, WARM для риса. Известны также универсальные модели SUCROS (Simple and Universal Crop growth Simulator), STICS (Simulateur mulTIdiciplinaire pour les Cultures Standard), WOFOST. Преимущества механистических моделей – физическая обоснованность и несколько меньшие требования к объемам калибровочных данных по сравнению со статистическими моделями. К недостаткам рассмотренных моделей следует отнести сложность вычислений.

Достаточно распространенной имитационной моделью формирования урожая является разработанная в США CERES-модель (оценка урожая через синтез ресурсов и окружающей среды) для пшеницы и специализированная для кукурузы CERES-Maize (Ben Nouna et al., 2000). Помимо того, что CERES-Maize дает полный

прогноз урожайности, она также описывает основные этапы развития кукурузы, в частности формирование всходов.

Уровень появления листьев X_n в модели CERES определяется согласно следующего уравнения

$$X_n = A \cdot (CUMDTT)^B, \qquad (17)$$

где X_n – число листьев в побеге; *CUMDTT* – совокупный дневной уровень, рассчитанный как сумма разности между средней суточной температурой и эффективной температурой (8°C); *A* и *B* – эмпирические коэффициенты, которые равны 0,0105 и 1,1116 соответственно.

Это уравнение используется и для определения появления первого листа, т.е. для появления всходов.

Несмотря на то, что эта модель была успешно протестирована на основе данных, полученных в различных почвенно-климатических условиях (Канада, США, Бразилия и др.), следует отметить наличие значительных расхождений рассчитанных по модели и фактических дат появления всходов. В большинстве экспериментов в 50% случаев согласно прогнозу модели всходы должны были появиться через 3 дня после сева, но фактически они наблюдались через 8 дней, как описано в исторических наборах данных (Carberry et al., 1989).

Задержку появления всходов было достаточно сложно смоделировать с помощью модели CERES-Maize. Поэтому в большинстве случаев в качестве даты наступления фазы всходов была установлена фактическая дата появления всходов. Приведенная выше оценка применения модели для расчета даты появления всходов еще раз подчеркивает необходимость разработки модели развития зерновых на ранних этапах, а именно от посева до появления всходов.

Разработка математического метода расчета и оценки условий формирования всходов, их полноты и времени образования расширяет возможности агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства, позволяет прогнозировать состояние развития культуры и своевременно принимать решения по ведению хозяйства. Представленная ниже модель нацелена на устранение недостатков и усовершенствование предыдущих моделей периода от посева до появления всходов. Разработка настоящей модели выполнена с

учетом достигнутого уровня моделирования формирования всходов с внесением определенных модификаций.

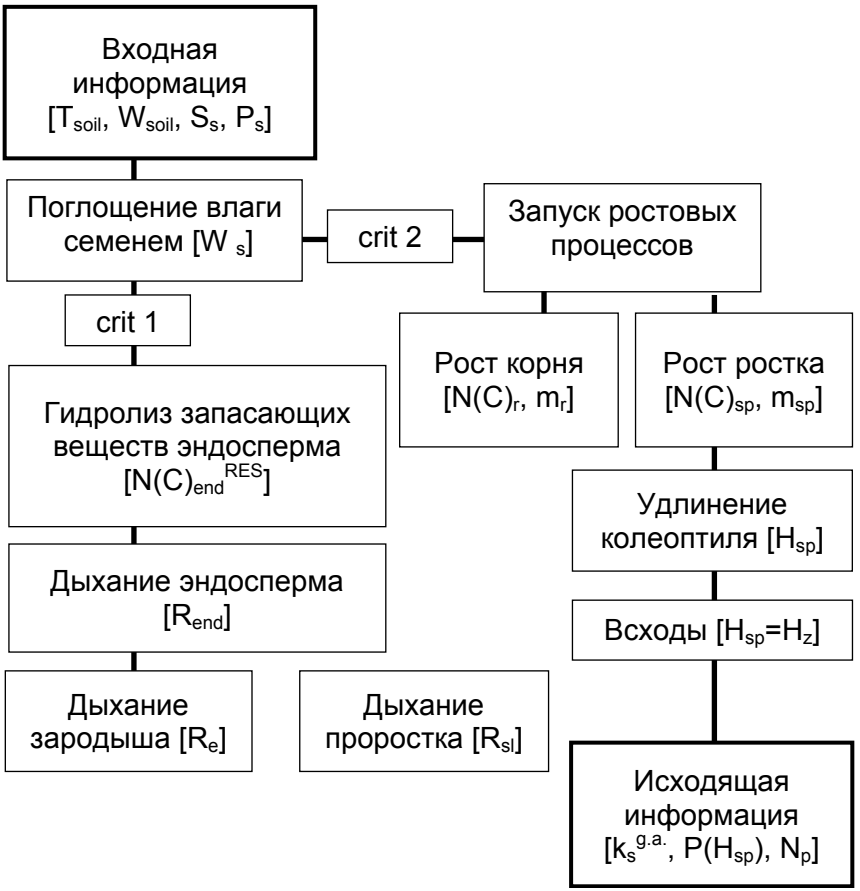

Рис. 1. *Блок-схема модели формирования всходов зерновых культур.*

На первом этапе модели описывается только поглощение влаги семенами. Начиная с момента, когда уровень влаги зерновки достиг определенного критического значения (*crit* 1), начинается также расчет скорости гидролиза запасного белка, крахмала и интенсивность дыхания зародыша и эндосперма. Когда влажность семян достигает следующего критического значения (*crit* 2), начинается рост проростка (органа прорастающего семени, который

в свою очередь состоит из зачатков корешка и ростка) и помимо дыхания зародыша уже учитывается также и дыхание ростка. На этом этапе прекращается расчет влажности семян.

Далее определяется скорость распределения азота и углерода и накопления сухой массы осевыми органами. Для того, чтобы отметить момент появления всходов, параллельно вычисляется длина ростка. Расчет прекращается, когда длина ростка равна заданной глубине заделки семян. Блок-схема модели представлена на рис. 1.

Попав в почву, семена начинают интенсивно поглощать влагу. Этот процесс происходит благодаря разнице водных потенциалов почвы и семян. Уравнение, описывающее процесс накопления влаги семенами, следующее

$$\frac{dW_s}{dt} = S_s P_s \left(\psi_{soil} - \psi_s\right), \tag{18}$$

где $\frac{dW_s}{dt}$ – поток влаги в семени; S_s – поглощающая поверхность семени; P_s – проницаемость оболочки семени; ψ_{soil} – водный потенциал почвы; ψ_s – водный потенциал семени.

Водные потенциалы почвы и семени описываются уравнениями:

$$\psi_{soil} = 1{,}5\mathbf{exp}\left(-7{,}76\frac{W_{soil} - ВЗ}{ПВ - ВЗ}\right), \tag{19}$$

$$\psi_s = \frac{R_{const} T_{soil}}{\overline{V}_m} \ln m\,, \tag{20}$$

где W_{soil} – влажность почвы; $ВЗ$ и $ПВ$ – влажность завядания и полная влагоемкость почвы соответственно; R_{const} – газовая постоянная; T_{soil} – температура почвы на глубине заделки семени; $\overline{V}_m$ – парциальный молярный объем; m – количество поглощенной воды.

Эмпирическая формула (19) была предложена (Сиротенко, 1981).

Основными частями семян является эндосперм и зародыш. Известно, что белки поглощают воду значительно интенсивнее, чем

углеводы. В составе зародыша преобладает запасной белок, поэтому зародыш набухает быстрее, увеличивает свои размеры и образует определенное заострение, выступающее под оболочкой зерна. Это состояние принято называть «наклёвыванием зерна» (Носатовский, 1950).

Когда влажность семян достигает определенного первого критического значения, начинается гидролиз запасного белка и крахмала

$$\frac{d(N,C)_{end}^{RES}}{dt} = K_s^{гид} m_s k_s(T_{soil}), \qquad (21)$$

где $\frac{d(N,C)_{end}^{RES}}{dt}$ – общая скорость гидролиза запасающих веществ эндосперма; $K_s^{гид}$ – коэффициент скорости гидролиза запасных веществ семени; m_s – масса семени; $k_s(T_{soil})$ – функция влияния температуры почвы на глубине заделки семян на скорость гидролиза, которая определяется следующей системой уравнений:

$$k_s(T_{soil}) = \begin{cases} 0{,}058 + 0{,}773x_1 + 1{,}913x_1^2 + 5{,}400x_1^3 - 3{,}322x_1^4 & при \quad T < T_{opt1} \\ 1 & при \quad T_{opt1} \le T \le T_{opt2}, \\ -11{,}47 + 29{,}87x_2^2 + 5{,}43x_2^3 & при \quad T > T_{opt2} \end{cases} \qquad (22)$$

$$x_1 = \frac{T - T_{\min}}{T_{opt1} - T_{\min}}; \quad x_2 = \frac{T - T_{opt2}}{T_{\max} - T_{opt2}},$$

где T – температура почвы; $T_{\min(\max)}$ – минимальные и максимальные значения температуры, при которой начинается и прекращается процесс жизнедеятельности; $T_{opt1,\, opt2}$ – верхняя и нижняя температурные границы оптимума процесса.

В процессе гидролиза запасной крахмал образует фонды лабильных углеводов, запасной белок – фонды лабильных аминокислот эндосперма. Поэтому скорость образования фондов равна скорости гидролиза запасных веществ эндосперма.

Определить содержание азота и углерода отдельно можно исходя из предположения, что их соотношение в эндосперме остается постоянным и может быть выражено с помощью определенного коэффициента α

$$\frac{dC_{end}^{RES}}{dt} = \alpha \frac{d(N,C)_{end}^{RES}}{dt}; \tag{23}$$

$$\frac{dN_{end}^{RES}}{dt} = (1-\alpha)\frac{d(N,C)_{end}^{RES}}{dt}, \tag{24}$$

где $\frac{dC_{end}^{RES}}{dt}$ – скорость гидролиза углерода; $\frac{dN_{end}^{RES}}{dt}$ – скорость гидролиза белка.

Вещества, образующиеся в результате гидролиза, до определенного момента расходуются только на дыхание зародыша и эндосперма. Когда влажность семян достигла следующего критического значения, происходит запуск ростовых процессов в семенах. Начинает развиваться проросток, который состоит из корня и ростка (колеоптиля). С этого момента, помимо дыхания зародыша, начинает учитываться интенсивность дыхания осевых органов. Определить интенсивность дыхания эндосперма $\frac{dR_{end}}{dt}$ можно по формуле, предложенной В.С. Антоненко (2002)

$$\frac{dR_{end}}{dt} = R_m m_s Q_R(T_{soil}); \tag{25}$$

Скорость дыхания зародыша $\frac{dR_e}{dt}$ в пересчете на интенсивность дыхания эндосперма определим следуя А.И. Носатовскому (1950)

$$\frac{dR_e}{dt} = 10\frac{dR_{end}}{dt}. \tag{26}$$

Интенсивность дыхания ростка и корня опишем следующими формулами:

$$\frac{dR_{sp}}{dt} = \beta \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} Q_R(T_{soil}); \quad (27)$$

$$\frac{dR_r}{dt} = (1-\beta) \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} Q_R(T_{soil}), \quad (28)$$

где $\frac{dR_{sp}}{dt}$ – скорость дыхания ростка; $\frac{dR_r}{dt}$ – скорость дыхания корня; β – коэффициент распределения запасов белка на дыхание между колеоптилем и корнем; $Q_R(T_{soil})$ – функция влияния температуры почвы на интенсивность дыхания семян, которую можно описать следующим уравнением

$$Q_R(T_{soil}) = 2^{0,1(T-T_{opt})}. \quad (29)$$

Оставшиеся после затрат на дыхание питательные вещества используются для роста корня и колеоптиля

$$\frac{dm_{sp(r)}}{dt} = \left(\gamma \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} + \eta \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} \right) - \frac{dR_{sp(r)}}{dt}, \quad (30)$$

где $\frac{dm_{sp(r)}}{dt}$ – скорость накопления сухой массы ростком (корнем); γ и η – коэффициенты для пересчета углерода и азота в органическое вещество. На основании проведенных лабораторных экспериментов установлено, что доля колеоптиля в проростке в течении периода от начала роста осевых органов до появления всходов в среднем составляет 40%.

Колеоптиль представляет собой цилиндр постоянного радиуса на протяжении всего периода. Скорость удлинения колеоптиля, описанная как функция накопления его массы с учетом

механического сопротивления почвы, определяется плотностью почвы ρ_{soil} и её влажностью

$$\frac{dH_{sp}}{dt} = \mathbf{exp}\left(\frac{dm_{sp}}{dt}\frac{1}{\rho_{sp}}\right)\frac{1}{\pi r_{sp}^2}k_{sp}(\rho_{soil})k_{sp}(W_{soil}), \quad (31)$$

где $\frac{dH_{sp}}{dt}$ – скорость удлинения ростка; ρ_{sp} – удельная плотность растительной массы ростка; r_{sp} – радиус основания ростка; $k_{sp}(\rho_{soil})$ – функция влияния плотности почвы на рост ростка; $k_{sp}(W_{soil})$ – функция влияния влажности верхних слоев почвы на удлинение ростка.

Принимается, что когда длина ростка H_{sp} становится равной глубине заделки семян, росток достигает поверхности почвы – наблюдаются всходы. Росток прекращает свой рост, а через верхушку колеоптиля появляется первый лист.

Помимо момента появления всходов, необходимо определить полевую всхожесть семян. Уравнение, позволяющее определить эту характеристику, имеет вид (Ковтун и др., 1990)

$$k_s^{g.a.} = \frac{W_{0-20}}{a + bW_{0-20}}, \quad (32)$$

где $k_s^{g.a.}$ – коэффициент полевой всхожести семян; $W_{0\text{-}20}$ – влажность почвы в пахотном слое; a и b – коэффициенты, определяемые глубиной заделки семян:

$$a = 2{,}1 + 0{,}29(H_z)^2; \quad (33)$$

$$b = 1{,}03 - 0{,}0127(H_z)^2, \quad (34)$$

где H_z – глубина заделки семян.

Глубина заделки семян может меняться в зависимости от микрорельефа почвы. Согласно модели В.Н. Павловой (Павлова,

1983), на основе косвенных данных была выбрана функция распределения количества растений с различной глубиной заделки семян

$$P(H_{sp}) = \frac{1}{1{,}5\sqrt{2\pi}} e^{-(H_{sp} - H_z^p)^2 / 2{,}25}, \qquad (35)$$

где H_z^p – наиболее вероятная глубина заделки семян.

После определения H_{sp} на каждом шаге определяется вероятностный интеграл функции плотности нормального распределения. Если значение интеграла функции превышает 0,6, то принимается, что наступили массовые всходы.

Результаты

Модель была реализована на ПК с помощью программы Microsoft Office Excel. Для идентификации параметров модели была выбрана одна из основных зерновых сельскохозяйственных культур – кукуруза. Большинство начальных параметров были получены в результате проведения эксперимента по проращивания семян кукурузы в лабораторных условиях. Однако, некоторые параметры модели были получены путем проведения анализа имеющихся в литературе данных, а также за счет оптимизации и ручной подборки численных значений параметров.

Проведен ряд численных экспериментов по исследованию чувствительности модели к изменению параметров окружающей среды во время прорастания семенами. Установлено, что модель чувствительна к изменению температуры на 1°C, влажности на 1 мм и изменению плотности почвы на 0,1 г/см^3. В модели можно варьировать исходные параметры, задавая размер семян и содержание влаги в семени при посеве, изменять тип почвы и ее водно-физические характеристики. В качестве шага во времени выбраны одни сутки. Рассматривался слой черноземной суглинистой почвы толщиной 5 см, ее наименьшая влагоемкость – 10 мм. Оптимальная влажность почвы составляет 8 мм.

Основными агрометеорологическими факторами, влияющими на время появления и полноту всходов, является температура, влажность и плотность почвы. Известно, что процесс появления всходов состоит из двух последовательных фаз: 1) поглощение семенами влаги и их наклёвывание, 2) рост побега и достижение им поверхности почвы. Соответственно этим фазам численный эксперимент также был разделен на два этапа: исследование скорости накопления влаги семенами и исследование скорости удлинения колеоптиля под воздействием факторов внешней среды.

На первом этапе эксперимента рассматривалось поглощение влаги семенами при различных температурных условиях и увлажнении. При условии, что влажность составляет 7 мм в слое почвы 0 – 5 см, а температура на протяжении всего периода сохраняется на уровне 22°С, семена наклевываются уже за 2 суток (рис. 2). При недостаточной увлажненности этот период составит 3 суток (рис. 3).

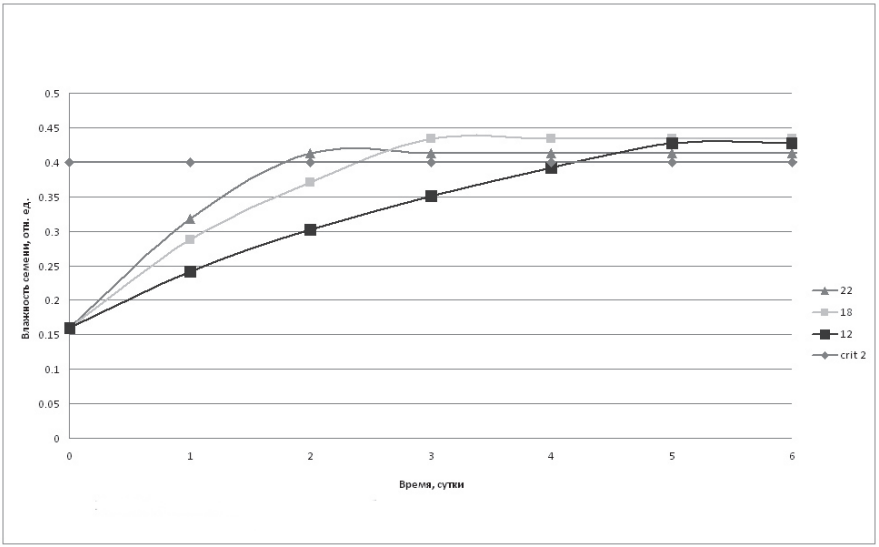

Рис. 2. *Влияние температуры почвы на накопление влаги семенем при условии влажности почвы, близкой к оптимальной 7 мм.*

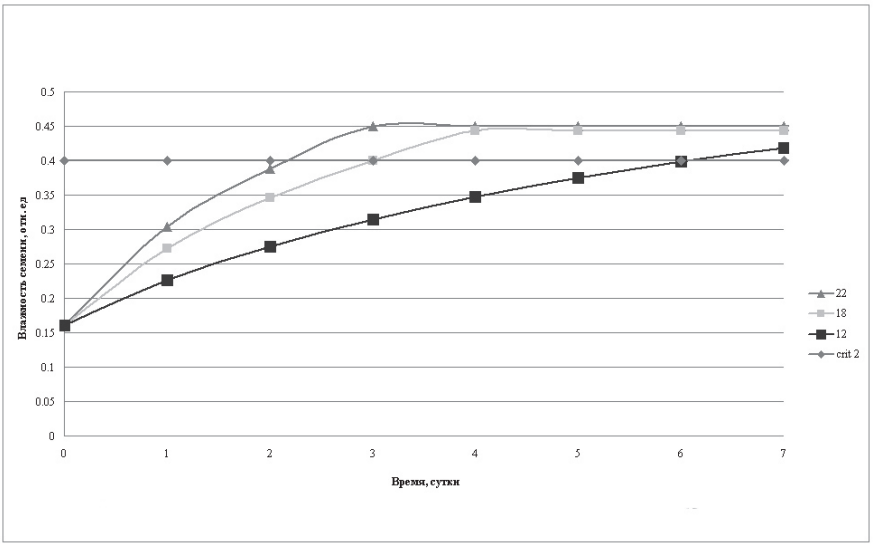

Рис. 3. *Влияние температуры почвы на накопление влаги семенем при условии пониженной влажности почвы 5 мм.*

С понижением температуры процесс накопления влаги замедляется и может длиться 3 – 5 суток в пределах оптимального увлажнения почвы и достигать 7 суток – при недостаточном увлажнении. После достижения критического значения влажность семян практически не изменяется.

Вторая часть эксперимента рассматривает влияние температуры, влажности и плотности почвы на скорость удлинения колеоптиля и появление всходов как следствие процессов прорастания семян.При условии оптимального увлажнения и оптимальной температуры, лимитирующим фактором при образовании всходов является плотность почвы, а именно: с увеличением плотности почвы увеличивается и время появления всходов. Так, если при минимальном значении плотности 0,8 г/см^3 колеоптиль может достигнуть поверхности почвы уже на 5-е сутки после посева, то при плотности в 1,4 г/см^3 всходы появятся только через 7 суток (рис. 4).

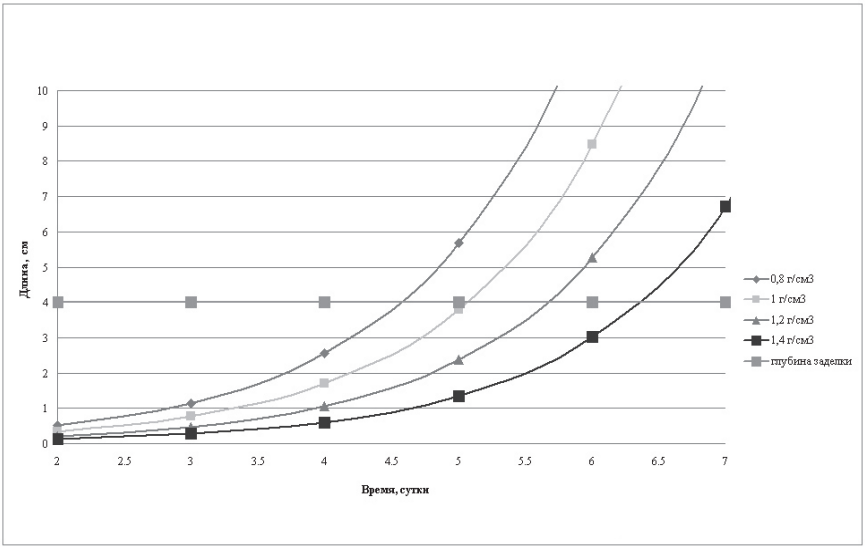

Рис. 4. *Влияние плотности почвы на время появления всходов при условии оптимальной температуры 22 ℃ и влажности почвы 7 мм.*

Следует отметить, что даже при сохранении оптимального увлажнения, с понижением температуры почвы интенсивность прорастания семян также уменьшается. Поэтому при температуре 18°С всходы появятся через 7 – 10 суток, а при 12°С – минимум за 16 суток после посева.

Несмотря на то, что влажность почвы является одним из основных факторов влияния на скорость прорастания семян, с увеличением влажности до 9 мм время появления всходов практически не изменяется при оптимальной температуре 22°С и также составляет 5 – 7 суток после посева и 7 – 10 суток при температуре 18 °С. При понижении температуры до 12°С появление всходов можно ожидать лишь на 15-е сутки. Однако, с уменьшением влажности до 5 мм колеоптиль достигнет высоты слоя глубины заделки семян не ранее 6 суток в условиях оптимальной температуры и наименьшей плотности почвы. При температуре 18°С это произойдет через 9 – 11 суток, а при температуре 12°С – через 19 суток.

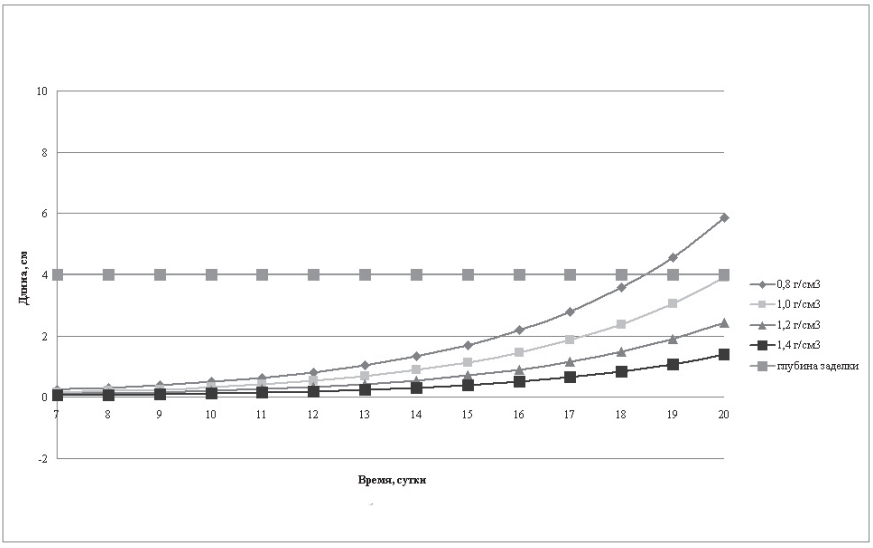

Рис. 5. *Влияние плотности почвы на время появления всходов при условии температуры 12 ℃ и пониженной влажности почвы 5 мм.*

Кроме того, в условиях недостаточного увлажнения и температуры почвы, близкой к биологическому минимуму культуры, с увеличением плотности почвы возникает угроза гибели растения так и не достигшего поверхности почвы (рис. 5). В этом случае запасы эндосперма будут полностью исчерпаны на рост, росток не успеет выйти на дневную поверхность почвы и в связи с этим не произойдет переключения процесса питания ростка из гетеротрофного на автотрофное для поддержания дальнейшего роста.

Заключение

Разработана динамическая модель формирования всходов зерновых культур, которая позволяет определить дату появления всходов, полевую всхожесть, распределение количества растений с различной глубиной заделки семян и количество растений на единицу площади. Модель описывает динамику поглощения влаги семенами и физиолого-биохимических процессов: гидролиза запасов эндосперма, дыхания, распределения продуктов гидролиза между осевыми органами и их рост.

В численных экспериментах установлено, что в формировании всходов влияние увлажнения почвы наиболее сильно проявляется на этапе поглощения и накопления влаги семенем от посева до запуска ростовых процессов. Установлена высокая чувствительность скорости удлинения колеоптиля к температуре почвы, а также к плотности почвы.

При оптимальных условиях окружающей почвенной среды семена наклевываются уже за 2 суток, при недостаточной увлажненности этот период удлиняется до 3 суток. С понижением температуры процесс накопления влаги семенем также замедляется и может длиться 3 – 5 суток, однако на фоне недостаточного увлажнения может достичь 7 суток.

При оптимальных условиях увлажнения и термического режима на глубине заделки семян лимитирующим фактором для появления всходов является плотность почвы. Так, если при минимальном значении плотности 0,8 г/см^3 колеоптиль может достичь поверхности почвы уже на 5-е сутки после посева, то при плотности в 1,4 г/см^3 всходы появятся только через 7 суток. Понижение температуры почвы на глубине заделки семян снижает интенсивность их прорастания. Поэтому при температуре 18°С всходы появятся через 7 – 10 суток, а при 12°С – минимум через 16 суток после посева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антоненко В.С. 2002. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы. Киев: «АртЭк». 64 С.
2. Дмитренко В.П. 1961. Влияние температуры воздуха на продолжительность периода посев – всходы зерновых культур. Труды УкрНИИГМИ. Вып. 22. С. 19-31.
3. Ковтун И.И., Гойса Н.И., Митрофанов Б.А. 1990. Оптимизация условий возделывания озимой пшеницы по интенсивной технологии. –Л.: Гидрометиздат, 288 С.
4. Немченко О.А., Мусатенко Л.И. 1982. Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах органогенеза. Физиология и биохимия культурных растений. Т.14, № 5. С. 439–445.
5. Носатовский А.И. 1950. Пшеница. –М.: Государственное изд-во с.-х. литературы. 408 С.
6. Павлова В.Н. 1983. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай». Труды ВНИИСХМ. Вып. 8. С. 28–36.
7. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. 2006. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. –С-Пб.: Изд-во С.-Пб. университета. 396 С.

8. Польовий А.М. 2008. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур. Український гідрометеорологічний журнал. № 3. С. 75–84.
9. Сиротенко О.Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистемы. –Л.: Гидрометиздат. 167 С.
10. Строганова М.А., Коровин А.И., Полевой А.Н. 1983. Динамическая модель расходования запасов эндосперма семян зерновых культур в процессе прорастания и в период до появления всходов. Сельскохозяйственная биология. № 1. С. 126-135.
11. Чирков Ю.И. 1969. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. –Л.: Гидрометиздат. 251 С.
12. Aggarwal P.K., Banerjee B., Daryaei M.G., Bhatia A., Bala A., Rani S., 2006. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. Agricultural Systems. № 89. P. 1–25.
13. Ben Nouna B., Katerji N., Mostrorilli M. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modelling of leaf area and water stress functions. Europ. J. Agronomy. V. 13. P. 309–322.
14. Carberry P.S., Muchow R.C., McCown R.L. 1989. Testing the CERES-Maize Simulation Model in a Semi-Arid Tropical Environment. Field Crops Research. № 20. P. 297–315.
15. Alm D.M., Stoller E.W., Wax L.M. 1993. An index model for predicting seed germination and emergence rates. Weed Technology. V. 7, №. 3. P. 560–569.
16. Forcella F., Arnold R.L.B., Sanchez R. 2000. Modeling seedling emergence. Field Crops Research. № 67. P. 123–139.
17. Claudio M., GhersaJame Y.W., Cutforth H.W. 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. Agricultural and Forest Meteorology. №; 124. P. 207–218.
18. Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C., Hlavinka P., Moriondo M., Olesen J. E., Patil R.H., Ruget F., Rumbaur C., Takáč J., Trnka M., Bindi M., Çaldağ B., Ewert F., Ferrise R., Mirschel W., Şaylan L., Šiška B., Rötter R. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. Europ. J. Agronomy. V. 35, №3. P. 103-114.

ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ГОРИМОСТИ ЛЕСОВ В РОССИИ ПО МЕСЯЧНЫМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Б.Г. Шерстюков

Россия, 249035 Калужская обл., г.Обнинск, ул. Королева, 6, Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, boris@meteo.ru

Реферат. Для территории России выполнено исследование зависимости потенциальной горимости леса от средних месячных значений температуры воздуха и относительной влажности воздуха в приповерхностном слое атмосферы, а также от суммы атмосферных осадков. Показано, что на территории России в мае главным фактором пожарной опасности является повышение температуры. В середине лета значения температуры достигают критических значений, после которых лесные пожары мало зависят от температуры и лимитируются только атмосферными осадками и высокой относительной влажностью.

Ключевые слова. Лесные пожары, температура, влажность, осадки, месячные данные.

ASSESSING THE POTENTIAL FLAMMABILITY OF FORESTS IN RUSSIA USING MONTHLY METEOROLOGICAL DATA

B.G. Sherstyukov

RIHMI-WDC, 6, Korolev's st., 249035 Obninsk, Kaluga Reg., Russia, boris@meteo.ru

Abstract. For the Russian territory, relationships between potential forest flammability and monthly values of temperature and moisture in the surface atmosphere layer and precipitation total are investigated. It is shown that in Russia in May the major factor of fire danger is a temperature rise. In the middle of summer, temperatures reach critical levels beyond which forest fires weakly depend on temperature, while atmospheric precipitation and high air humidity become the limiting factors.

Key words. Forest fires, temperature, humidity, precipitation, monthly data.

Введение

В последние десятилетия лесные пожары часто становятся экологическим бедствием на обширных территориях. Например, осенью 2002 в результате горения торфяников на Европейской территории России в зоне интенсивного и продолжительного задымления оказалось не менее 30 млн. граждан России или 20% всего населения страны. Аналогичная ситуация повторилась летом 2003 года в Сибири и летом 2010 года в центральном регионе России. Менее катастрофические лесные пожары возникают ежегодно в одном или нескольких районах России. Главным необходимым условием возникновения лесного пожара являются метеорологические условия – длительная жаркая и сухая погода.

Основными факторами, определяющими увлажнение лесных горючих материалов, являются осадки и испарения влаги. Для оценки потенциальной горимости леса, обусловленной метеорологическими условиями, в России используют индекс Нестерова (Методические указания…, 1975). В этом индексе для вычисления используются данные о количестве атмосферных осадков за сутки и величина $\Delta t\ (t - \tau)$ по замерам в дневные часы (t – температура воздуха, τ – температура точки росы). Т.е. для вычисления индекса Нестерова необходимы срочные метеорологические наблюдения. Величина $\Delta t\ (t - \tau)$ характеризует испарение. Обоснованием использования $\Delta t\ (t - \tau)$ как фактора, обеспечивающего испарение влаги, содержащейся в лесных горючих материалах, является связь $\Delta t\ (t - \tau)$ с суммой радиационного баланса кал/см^2 за сутки, который определяет величину испарения (Вонский С.М., 1981).

В пожароопасный сезон года индекс Нестерова вычисляют ежедневно. При длительном отсутствии дождя индекс Нестерова с каждым днем постепенно возрастает до больших значений. Дождь с осадками $\geq$ 2,5 мм может в течение суток понизить опасность возгорания леса до нуля. Столь большие различия в скорости повышения и понижения индекса делают распределение индекса далеким от закона нормального распределения, поэтому среднее значение индекса за месяц не может являться обобщенной характеристикой опасности возгорания леса за месяц.

В климатических исследованиях необходимы обобщенные по времени характеристики потенциальной горимости леса (за месяц и

за год). Так как среднемесячные значения индекса не являются показательными, то горимость за месячный и более длительные интервалы времени лучше характеризовать числом дней с индексом горимости Нестерова выше некоторого критического значения.

При значениях индекса 1000 и более велика опасность возгорания леса (класс опасности – средний) (Методические указания, 1975, ГОСТ Р22.1.09-99) и обычно при таких метеорологических условиях в лесах возникают пожары при наличии источника огня (по вине человека или молнии). Вероятность возникновения пожара в лесу тем больше, чем суше лесная подстилка, выше температура воздуха и меньше его относительная влажность. Число дней за месяц с индексом Нестерова выше 1000 далее будем рассматривать как месячную характеристику горимости леса.

При отсутствии срочных значений температуры и влажности воздуха возникает необходимость создания методики косвенного вычисления числа дней за месяц с потенциальной пожароопасной горимостью леса по месячным значениям температуры, влажности воздуха и количеству атмосферных осадков за месяц. Необходимость в таких оценках возникает в прогностических климатических задачах для получения оценок возможных изменений горимости леса в будущем в связи с изменениями климата.

Оценки изменений на длительную перспективу температуры воздуха, количества атмосферных осадков и других метеорологических характеристик получены во многих ведущих климатических центрах мира на основе физико-математических моделей атмосферы и океана. Модельные расчеты климатических характеристик для разных сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему, полученные в рамках международного проекта сравнения моделей (CMIP5), опубликованы во временных дискретизациях от 6-часовых до среднемесячных (http://cmip-pcmdi.llnl.gov/). Эти оценки не являются полноценным прогнозом, они характеризуют лишь предполагаемые тренды метеорологических величин и разброс значений вокруг них. Предлагаемые модельные суточные значения для атмосферных осадков характеризуют скорее вероятность дождя внутри месяца, чем наличие дождя в конкретный день месяца. По этой причине не представляется возможным прямое вычисление индекса Нестерова по дням месяца и получения прогностического числа пожароопасных дней за месяц. Для этого

случая необходима методика получения оценок ожидаемого числа пожароопасных дней в каждом месяце по месячным прогностическим значениям метеорологических величин.

Потенциальная опасность возгорания леса определяется влажностью подстилки, которая в свою очередь зависит от количества атмосферных осадков и испарения. А испарение зависит от температуры и влажности воздуха. В настоящей работе исследовались возможности получения оценок горимости леса на основе данных о среднемесячной температуре воздуха, о среднемесячной относительной влажности воздуха и количестве осадков за месяц.

Методы и материалы

По ежедневным срочным данным о температуре воздуха, температуре точки росы и количеству атмосферных осадков за 1966-2009 годы по станциям России (1572 станции) вычислены значения индекса Нестерова G в соответствии с ГОСТом (ГОСТ Р22.1.09-99) на каждый день пожароопасного сезона и подсчитано число дней в каждом месяце с индексом G>1000. Эти сведения далее использовались в качестве эталонных при исследовании методов косвенного получения числа пожароопасных дней в месяце по месячным метеорологическим данным. Выполнено исследование возможности вычисления по уравнению линейной регрессии значений числа дней с индексом G>1000 в каждом отдельном месяце с мая по сентябрь для каждого года. Уравнение регрессии строились на основе месячных значений температуры воздуха, количества атмосферных осадков и относительной влажности воздуха. Оценивался процентный вклад каждого отдельного метеорологического элемента в уравнение регрессии и вклад совместного использования данных по всем трем элементам вместе. Оценки вклада (в %) среднемесячных значений каждого элемента в общую дисперсию эталонного ряда о числе пожароопасных дней в месяце наносились на карты. Построены также карты вклада при совместном использовании в уравнении регрессии трех элементов.

Результаты

Анализ карт показал, что в мае от значений среднемесячной температуры воздуха на 25-40% зависит общая дисперсия числа

пожароопасных дней (с индексом Нестерова >1000) в интервале географических широт 50-65°с.ш. на территории России (рис. 1).

Относительная влажность наиболее существенный вклад в общую дисперсию числа пожароопасных дней в мае дает почти повсеместно южнее 50° с.ш. от западных до восточных границ России (вклад 20-40% и более).

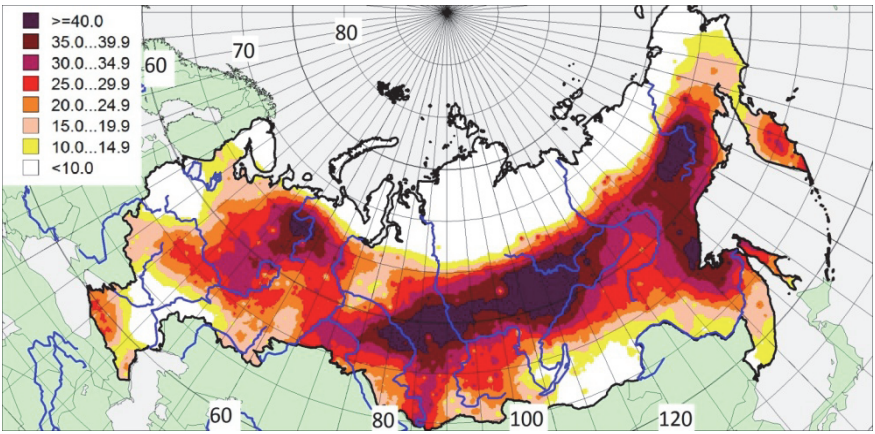

Рис. 1. *Вклад изменений среднемесячной температуры воздуха в общую дисперсию числа пожароопасных дней в мае.*

Количество атмосферных осадков в мае дает вклад в общую дисперсию 30-40% и более на Европейской части России южнее 60° с.ш., а в Сибири и на Дальнем Востоке – южнее 50° с.ш.

Уравнение регрессии от трех переменных (температура и относительная влажность воздуха, количество атмосферных осадков) описывает общую дисперсию числа пожароопасных дней в мае более чем на 60% южнее 55° с.ш. на Европейской части России и на тех же широтах в Восточной Сибири и, частично, в Приамурье (рис. 2).

Совместный вклад трех элементов со значениями 50-60% охватывает широты 55-65° с.ш. от восточных до западных границ России. Еще севернее опасность возгорания леса и вклад метеорологических элементов в дисперсию числа пожароопасных дней становится несущественным по причине низких значений или отсутствие леса.

В июне изменяется соотношение вклада отдельных метеорологических элементов в потенциальную горимость леса.

Главное отличие заключается в том, что в разгар лета температура воздуха не является главным фактором возникновения лесных пожаров. От температуры воздуха на 30-40% зависит число пожароопасных дней только в Восточной Сибири, на остальной части России в июне температура всегда достаточно высока и ее изменение мало влияет на число пожароопасных дней. Более существенную роль в этом месяце играют лимитирующие факторы − относительная влажность и количество атмосферных осадков.

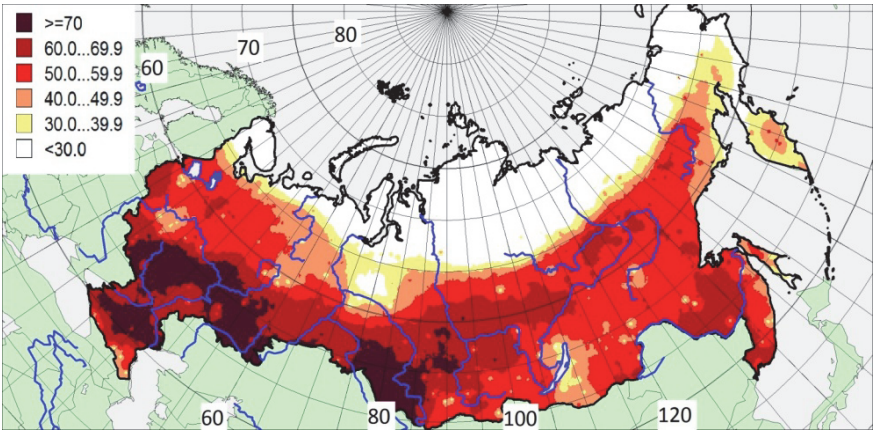

Рис. 2. *Совместный вклад изменений среднемесячной температуры, относительной влажности воздуха и количества осадков в общую дисперсию числа пожароопасных дней в мае.*

В июне относительная влажность более чем на 40% определяет опасность возгорания леса на всей Европейской части России и на юге Сибири (южнее 55° с.ш.). На широтах 55-65° с.ш. от относительной влажности на 30-40% зависит опасность возгорания леса. В это же время в июне вклад изменения количества осадков в общую дисперсию числа пожароопасных дней составляет 40% и более на юге Европейской территории России и на южном Урале, а также в протяженных районах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Практически на всей остальной лесной Азиатской части России вклад количества осадков в изменения числа пожароопасных дней составляет 30-40%.

В июле (рис. 3) температура воздуха на всей территории России достигает таких высоких значений, что ее обычные колебания

практически не влияют на горимость леса. В некоторых небольших районах России вклад температуры в горимость леса достигает 20-30%, а на всей остальной части этот вклад менее 20% (рис. 3).

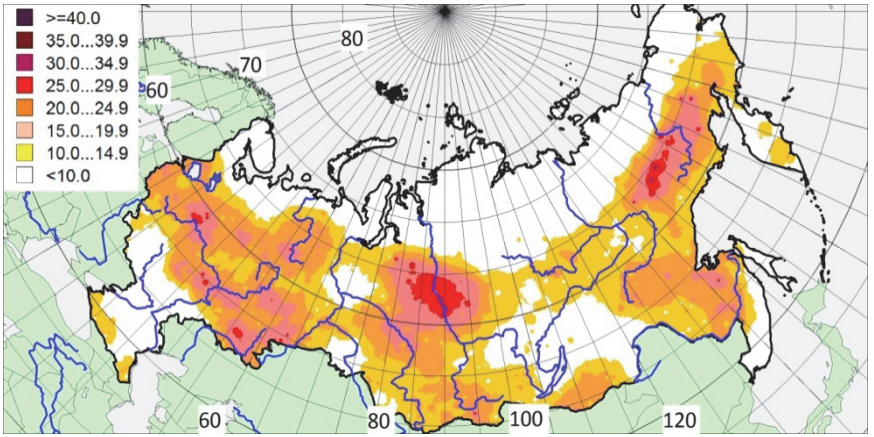

Рис. 3. *Вклад изменений среднемесячной температуры воздуха в общую дисперсию числа пожароопасных дней в июле.*

В июле главным фактором, лимитирующим лесные пожары становится относительная влажность воздуха (рис. 4).

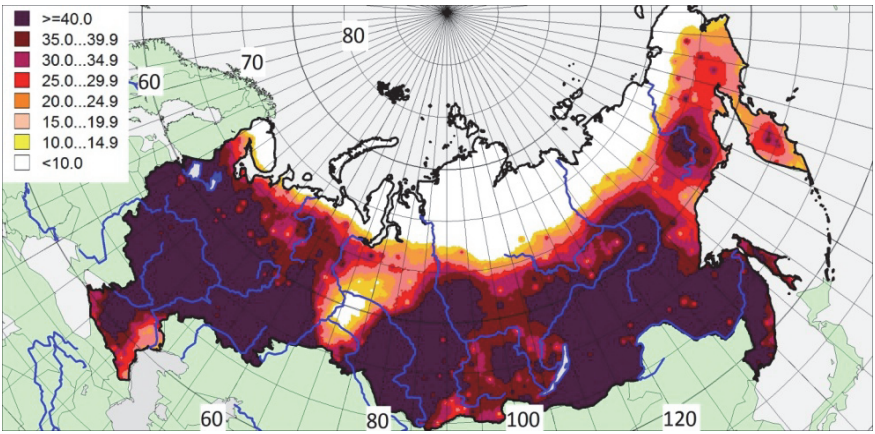

Рис. 4. *Вклад изменений среднемесячной относительной влажности воздуха в общую дисперсию числа пожароопасных дней в июле.*

На карте России области, в которых вклад относительной влажности воздуха в горимость леса составляет 40% более, охватывают Россию от ее южных границ до широты примерно 60° с.ш. А еще севернее и до самой северной границы лесов России почти повсеместно этот вклад составляет 30% и более.

Осадки в июле на большей части территории России дают вклад 30-40%, а на юге Европейской части России и в Сибири в широтной зоне 55-65° с.ш. вклад осадков достигает 40% и более (рис. 5).

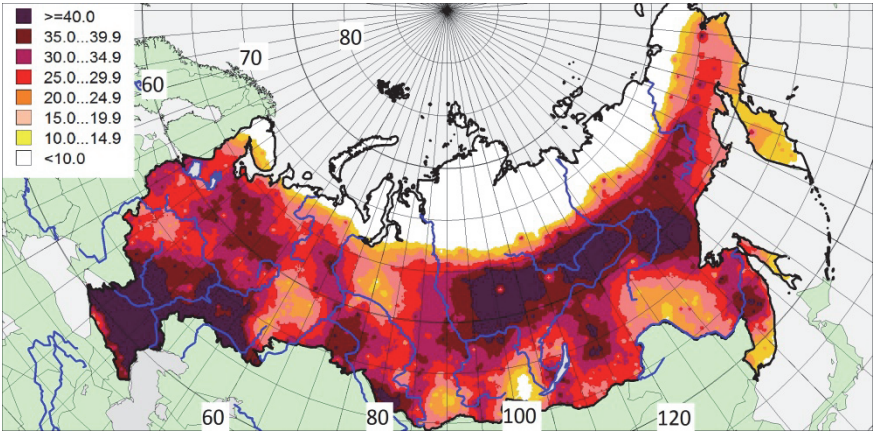

Рис. 5. *Вклад изменений месячного количества осадков в общую дисперсию числа пожароопасных дней в июле.*

При использовании в уравнении регрессии всех трех предикторов их совокупный вклад составляет на всей лесной территории России не менее 50%, а южнее 60° с.ш. в Европейской части и Западной Сибири, а также на широтах 55-65° с.ш. в Восточной Сибири совокупный вклад трех месячных характеристик составляет 70% и более (рис. 6).

В августе сохраняются закономерности, отмеченные для июля. Основной вклад в общую дисперсию числа пожароопасных дней в лесу в августе вносит изменение среднемесячной относительной влажности воздуха 30-40% и более на всей лесной территории России.

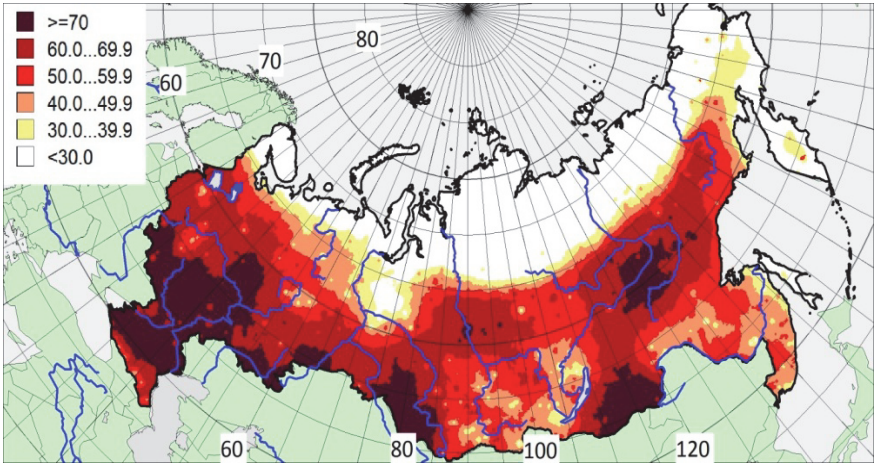

Рис. 6. *Совместный вклад изменений среднемесячной температуры, относительной влажности воздуха и количества осадков в общую дисперсию числа пожароопасных дней в июле.*

Атмосферные осадки в августе на 30-40% определяют изменение горимости леса в южной половине Европейской территории России и в широтной зоне 55-65° с.ш в Азиатской части России.

Совместный вклад температуры, относительной влажности и количества осадков в августе дает вклад в общую дисперсию числа пожароопасных дней свыше 55% на всей лесной части России и свыше 70% в южной половине Европейской части России и в некоторых южных районах Азиатской части (рис. 7).

В сентябре, с установлением дождливой погоды, число лесных пожаров уменьшается и в конце сентября или в начале октября пожары прекращаются. В этом месяце главная роль в управлении лесными пожарами принадлежит атмосферным осадкам.

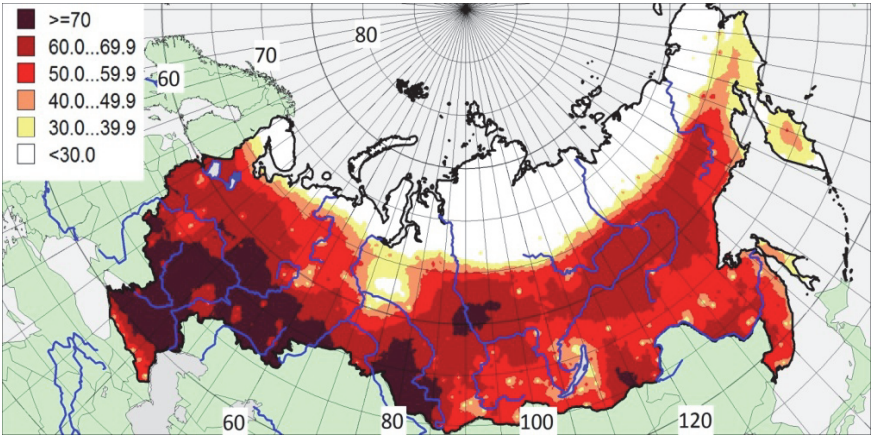

Рис. 7. *Совместный вклад изменений среднемесячной температуры, относительной влажности воздуха и количества осадков в общую дисперсию числа пожароопасных дней в августе.*

Оценки совместного вклада всех трех метеорологических характеристик в общую дисперсию числа пожароопасных дней за весь сезон май-август показаны на рис. 8.

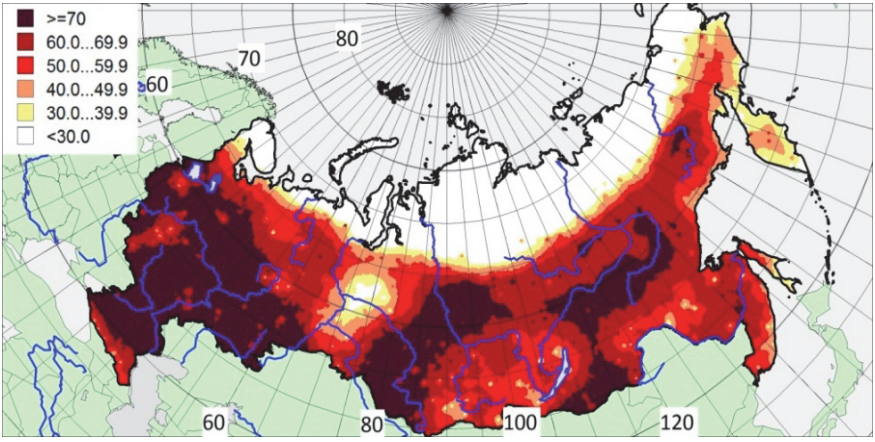

Рис. 8. *Совместный вклад изменений среднемесячной температуры, относительной влажности воздуха и количества осадков в общую дисперсию числа пожароопасных дней за весь пожароопасный сезон (май-август).*

На большей части территории России вклад метеорологических характеристик в уравнение регрессии составляет 50-69%, а в некоторых южных районах России совместный вклад всех трех метеорологических характеристик в общую дисперсию превышает 70%.

В тех случаях, когда аналогичное уравнение регрессии строится по месячным данным только температуры воздуха и количества атмосферных осадков (без данных об относительной влажности), вклад указанных метеорологических элементов в уравнение составляет 40-55% почти во всей лесной зоне России.

В ходе работы был создан массив коэффициентов уравнений регрессии числа пожароопасных дней от месячных значений температуры, влажности воздуха и количества атмосферных осадков для каждого отдельного месяца по каждой станции России. Эти коэффициенты предназначены для получения прогностических оценок изменения горимости леса по прогностическим данным об изменениях климата.

Заключение

Приведенные результаты показывают, что, не имея ежедневных данных о температуре, влажности воздуха и о количестве атмосферных осадков, можно на основе месячных значений тех же метеорологических характеристик получать оценки количества дней в месяце с метеорологическими условиями, создающими предпосылки для возникновения лесных пожаров.

Задача получения оценок горимости леса по месячным данным о температуре и об осадках рассматривалась в работах (Малевский-Малевич и др., 2005; Малевский-Малевич С.П. и др., 2007; Школьник И.М. и др., 2008; Мохов И.И., Чернокульский А.В., 2010), где была показана правомерность получения оценок горимости леса по месячным метеорологическим данным, но в указанных работах не проводилось анализа вклада каждой характеристики. В этих работах метеорологические условия оценивались по индексу засушливости, при этом не учитывалось изменение по месяцам роли каждого отдельного метеорологического элемента. В настоящей статье применимость месячных данных подтверждена и показаны особенности влияния разных метеорологических условий в разные месяцы пожароопасного периода года.

Применение уравнений линейной регрессии между метеорологическими элементами и пожарной опасностью в лесу предполагает наличие линейной зависимости во всем пожароопасном периоде года, но оказалось, что такие зависимости не сохраняются на интервале всего теплого периода года – роль необходимых и лимитирующих условий сильно изменяется от весны к лету и к осени. Поэтому, как показано в настоящей работе, число пожароопасных дней за год целесообразно вычислять как сумму пожароопасных дней, полученных по уравнениям регрессии отдельно за каждый месяц пожароопасного сезона. При этом для каждой станции и каждого месяца необходимо вычислить свои зависимости и коэффициенты уравнений регрессии. При таком подходе по уравнениям регрессии и месячным метеорологическим данным можно учесть до 70% вклада метеорологических условий в горимость леса при изменениях климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонский С.М. 1981. Определение природной пожарной опасности в лесу. Методические рекомендации. –Л.: ЛенНИИЛХ. 52 С.
2. ГОСТ Р22.1.09-99. Государственный стандарт Российской Федерации. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. ОКС 13.020, ОКСТУ 002. Дата введения 01.01.2000. 13 С.
3. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Семиошина А.А., Салль И.А., Хлебникова Е.И., Шкляревич О.Б. 2005. К оценке изменений пожароопасной обстановки в лесах России при ожидаемом потеплении климата в XXI веке. Метеорология и гидрология. №3. С. 36-44.
4. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Шкляревич О.Б. 2007. Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках на основе моделирования климатических условий. Метеорология и гидрология. №3. С. 14-24.
5. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. 1975. –Л.: Гидрометеоиздат. 15 С.
6. Мохов И.И., Чернокульский А.В. 2010. Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменениях климата. География и природные ресурсы. №2. С. 120-126.
7. Школьник И.М., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Хлебникова Е.И., Салль И.А. 2008. Экстремальность термического режима в Сибири и динамика пожароопасной обстановки в XXI веке: оценки с помощью региональной климатической модели ГГО. Метеорология и гидрология. №3. С. 5-15.

ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Б.Г. Шерстюков, А.Б. Шерстюков***

Россия, 249035 г.Обнинск Калужской обл. ул. Королева, 6, Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, *boris@meteo.ru, **artem@meteo.ru.

Реферат. Получены количественные соотношения между изменениями климата и характеристиками лесных пожаров на территории России. Приведены возможные варианты изменения в XXI веке характеристик лесных пожаров при будущих климатах, соответствующих двум сценариям антропогенного воздействия на климатическую систему Земли − RCP4.5 и RCP8.5.

Ключевые слова. Сценарии, изменения климата, лесные пожары, взаимосвязь.

FOREST FIRES IN RUSSIA UNDER CLIMATE WARMING IN XXI CENTURY

B.G. Sherstyukov, A.B. Sherstiukov***

RIHMI-WDC, 6, Korolev's st., 249035 Obninsk, Kaluga Reg., Russia, *boris@meteo.ru, **artem@meteo.ru

Abstract. Quantitative relationships of climate change and characteristics of forest fires in Russia are obtained. Possible patterns of changes in the forest fire characteristics under future climates corresponding to two scenarios of anthropogenic impact on the Earth's climate system (RCP4.5 and RCP8.5) are presented.

Key words. Scenarios, climate change, forest fires, relationship.

Введение

Прогнозы изменений климата на основе физико-математического моделирования показывают доминирующую роль антропогенных парниковых газов в современном потеплении глобального климата. На основе прогностических оценок по этим моделям ожидается, что потепление климата будет продолжаться в

обозримом будущем. Наряду с повышением температуры будут наблюдаться изменения всех других параметров климатической системы, которые могут отразиться на метеорологических условиях горимости леса. И, хотя, вопрос о причинах современного потепления климата остается дискуссионным, а модели еще находятся в стадии развития, их прогностические результаты используются, так как других способов прогноза изменений климата до конца XXI века пока не создано. Противоречия разных научных подходов возникают, в основном, в части количественных оценок вклада различных антропогенных и природных факторов в современные и будущие изменения климата. Последствия изменений климата затрагивают многие стороны жизни человека, но и в части количественных оценок этих последствий остается много не ясного в количественных соотношениях. В настоящей работе главное внимание уделено получению соотношений между изменениями климата и лесными пожарами, а также рассматриваются возможные варианты изменения характеристик лесных пожаров при различных возможных сценариях изменений климата.

Физико-математические модели климата постоянно совершенствуются, в настоящее время проходят испытания моделей пятого поколения и составляется прогноз изменения климата для нескольких возможных сценариев изменения количества антропогенного углекислого газа и других парниковых газов.

В Главной Геофизической Обсерватории проведены исследования качества моделей пятого поколения, разработанных в различных климатических центрах мира, отобраны лучшие (по мнению авторов из ГГО) из них и получен обобщенный мультимодельный прогноз изменений климата для двух сценариев накопления антропогенных парниковых газов в атмосфере. В предположении того, что модельные прогнозы отражают общую тенденцию будущих изменений метеорологических характеристик климатической системы, в настоящей работе выполнены оценки изменения среднего числа дней с пожароопасными для леса метеорологическими условиями в различных регионах России по трем временным интервалам: 2011-2030, 2041-2060 и 2080-2099 годы. Получены также предварительные результаты по

количественным оценкам увеличения площадей выгоревшего леса к концу текущего столетия, если потепление климата будет следовать одному из рассмотренных сценариев.

Методы и материалы

Для возникновения лесного пожара необходимым условием является длительная жаркая и сухая погода. Эти условия характеризуются комплексом метеорологических характеристик: температура воздуха, продолжительность периода без выпадения дождя, влажность воздуха, а также характеристиками горимости лесной подстилки, которые тоже в значительной мере зависят от метеорологических условий. Метеорологическая опасность возгорания леса ежедневно определяется по индексу В.Г. Нестерова и подразделяется по классам горимости леса. Значение индекса Нестерова более 1000 (средняя горимость) является критерием, при котором обычно возникают лесные пожары, при наличии других необходимых условий для возгорания (наличие горючего лесного материала и источника огня). Лесную пожароопасность всего теплого сезона года удобно оценивать числом дней в году с индексом Нестерова более 1000.

При отсутствии ежедневных метеорологических данных и невозможности вычисления индекса Нестерова на каждый день года, в работе (Шерстюков, 2013) предложено использовать регрессионные соотношения между среднемесячными значениями температуры воздуха, месячными суммами атмосферных осадков и числом пожароопасных для леса дней в месяце. Пожароопасными считались дни с индексом Нестерова более 1000.

В работе (Шерстюков, 2013) проводились исследования вклада трех метеорологических характеристик в изменения числа пожароопасных дней за сезон. Показано, что изменения месячных значений температуры воздуха количества атмосферных осадков и относительной влажности дают совместный вклад 55-69% в общую дисперсию числа пожароопасных дней за весь сезон (май-август) на большей части территории России. При этом в некоторых южных районах России и на Приленском плато совместный вклад всех трех метеорологических характеристик в общую дисперсию превышает 70%.

Но мультимодельные прогнозы, подготовленные в ГГО, содержат только данные о среднемесячной температуре и средней суточной сумме атмосферных осадков. Данных о влажности воздуха нет. В работе (Шерстюков 2013) показано, что по таким сведениям тоже можно оценивать прогностическое значение числа пожароопасных дней за сезон. В тех случаях, когда для оценок горимости леса используется уравнение регрессии по данным только температуры воздуха и количества атмосферных осадков (без данных об относительной влажности), суммарный вклад указанных метеорологических элементов в общую дисперсию числа пожароопасных дней составляет 40-55% почти во всей лесной зоне России.

В настоящей работе в качестве исходных данных использовались мультимодельные сведения о будущем климате России, которые подготовлены в ГГО (приземная температура воздуха и атмосферные осадки), для трех двадцатилетних интервалов 21-го века: 2011 – 2030 гг., 2041 – 2060 гг. и 2080 – 2099 гг. Эти сведения о будущем климате получены в ГГО осреднением результатов расчетов по 31 модели общей циркуляции атмосферы, которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли семейства RCP: «мягкий» сценарий RCP4.5 и «жесткий» RCP8.5».

Прогностические среднемодельные данные получены из ГГО в узлах сетки 1° × 1° – среднемесячные значения температуры и среднесуточное количество атмосферных осадков за месяц. Эти абсолютные значения температуры и осадков получены добавлением изменений соответствующих характеристик в ансамбле моделей к реальным средним значениям указанных характеристик за базовый период 1981-2000 гг. Среднесуточные значения количества осадков переводились далее в количество осадков за месяц, путем умножения среднесуточных значений осадков на число дней в месяце.

Сведения о реальных лесных пожарах взяты из справочника (Думнов и др., 2005).

По ежедневным данным о температуре воздуха, температуре точки росы и количеству атмосферных осадков за 1966-2009 гг. по станциям России (1572 станции) вычислены значения индекса Нестерова G в соответствии с ГОСТом (Методические указания,

1975; ГОСТ Р22.1.09-99) на каждый день пожароопасного сезона и подсчитано число дней в каждом месяце с индексом G>1000. Эти сведения далее использовались в качестве эталонных при исследовании методов косвенного получения числа пожароопасных дней в месяце по месячным метеорологическим данным. Выполнено исследование возможности вычисления по уравнению линейной регрессии значений числа дней N_f с индексом G>1000 в зависимости от среднемесячной температуры (t) и месячной суммы осадков (R):

$$N_f = b_t\, t + b_R\, R + a \qquad (1)$$

Уравнения регрессии для каждой метеорологической станции строились по метеорологическим данным за 1966-2011 гг. Коэффициенты уравнения регрессии для мая вычислялись по многолетним рядам майских значений температуры и осадков, аналогично коэффициенты для июня вычислялись по рядам июньских метеорологических данных и т.д. (отдельно по каждому месяцу пожароопасного сезона с мая по сентябрь, включительно). Накопленные коэффициенты далее использовались для прогностических целей лесопожарных характеристик на основе модельных прогностических значений изменения температуры воздуха и атмосферных осадков до конца XXI века по данным ГГО.

На каждой станции прогностические значения числа пожароопасных дней вычислялись по уравнению (1) для каждого месяца отдельно. Число пожароопасных дней за год складывалось из месячных прогностических значений пожаропасных дней за весь пожароопасный сезон. В уравнения подставлялись прогностические мультимодельные значения температуры (t) и количества осадков (R) ближайшего к станции узла географической сетки с шагом 1° × 1°.

Для пространственных сравнений результатов на карты выводились значения отклонений прогностического числа пожароопасных дней (D) на станции от среднего числа пожароопасных дней на этой станции за базовый период 1981-2000гг. (N):

$$D = N_f - N,$$

где N_f – прогностическое значение числа пожароопасных дней на заданный временной интервал.

Построены карты изменения прогностического числа пожароопасных дней для трех двадцатилетних интервалов 21-го века: 2011 – 2030 гг., 2041 – 2060 гг. и 2080 – 2099 гг. отдельно по двум сценариям возможного антропогенного воздействия на климатическую систему.

Вычислены значения относительных изменений числа пожароопасных дней на заданный временной интервал относительно базового периода 1981-2000 гг.:

$$D = 100(N_f - N)/N \ (\%),$$

Результаты

По жесткому сценарию RCP8.5 в 2011-2030 гг. заметные изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000, по сравнению с нормой за 1981-2000 г., произойдут почти на всей Европейской территории России, в Западной Сибири и на юге Восточной Сибири (увеличение на величину до 9 дней). В некоторых районах на юге и западе Европейской территории России, а также на юге Сибири, число пожароопасных дней ожидается на 10-19 дней больше за пожароопасный сезон (рис. 1).

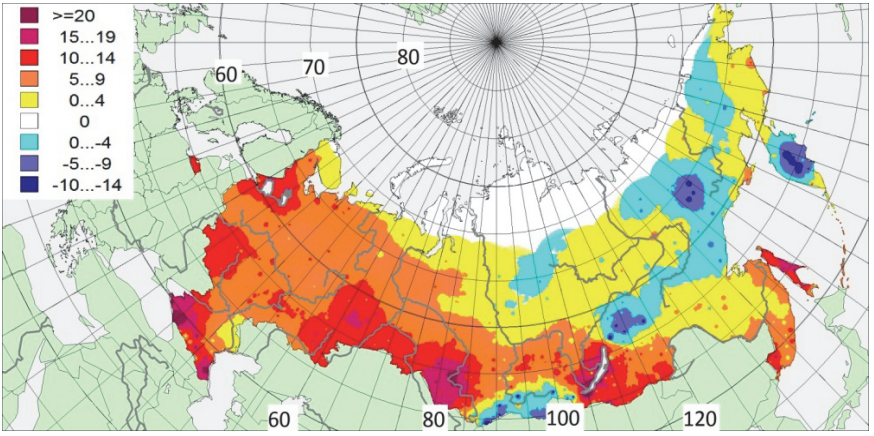

Рис. 1. *Прогноз на 2011-2030 гг. изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000, по сравнению с нормой за 1981-2000 гг. Мультимодельный прогноз климата, сценарий RCP8.5. Сезон май – сентябрь.*

По мягкому сценарию прогностическая карта оказалась практически идентичной. Это означает, что в первом временном интервале различия в прогнозах изменения климата не проявляются.

По сценарию RCP8.5 к 2028-2047 гг. и к 2041-2060 гг. по сценарию RCP4.5 ожидается потепление глобальной температуры на 2°С. Потепление на 2°С считается пороговым для изменения климата, после достижения которого возврат к прежнему состоянию планетарной системы окажется невозможным. При повышении температуры более, чем на 2°С, общество потеряет контроль над ситуацией по изменению климата.

В 2028-2047 гг. (рис. 2) по сценарию RCP8.5 и по мягкому сценарию RCP4.5 увеличится число пожароопасных дней на 10-14 дней и более в тех же регионах, в которых в предыдущие годы увеличение прогнозировалось на 5-9 дней.

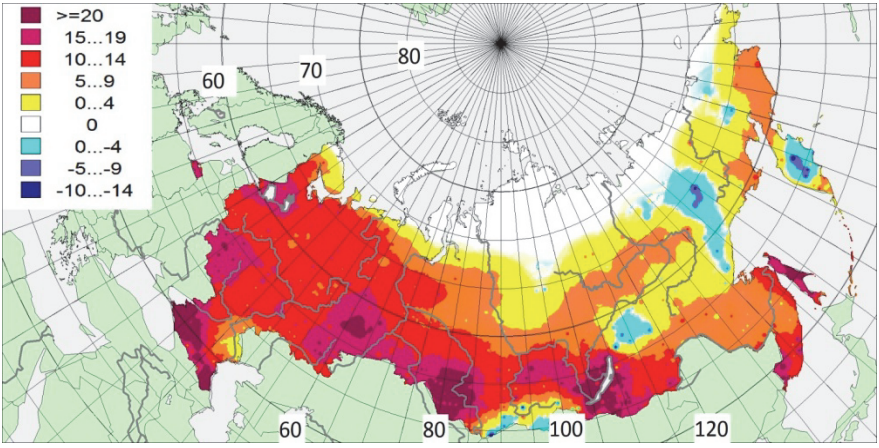

Рис. 2. *Прогноз изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000 на период потепления среднеглобальной температуры воздуха на 2°С по сценарию RCP8.5 (2028-2047 гг.). Отклонения от нормы за 1981-2000 гг. Сезон май – сентябрь.*

В 2041-2060 гг. почти на всей Европейской территории России и на юге Сибири ожидается увеличение числа пожароопасных дней на 10-14 и 15-19 дней (рис.3). В прогнозах по мягкому сценарию области с градацией увеличения числа пожароопасных дней на 15-19 дней занимают меньшие площади на карте.

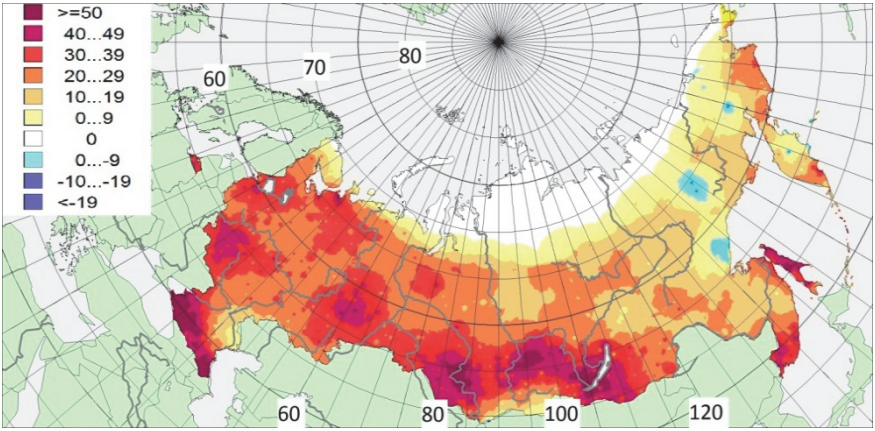

Рис. 3. *Прогноз на 2041-2060 гг. изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000, по сравнению с нормой за 1981-2000 г. Мультимодельный прогноз климата, сценарий RCP8.5. Сезон май − сентябрь.*

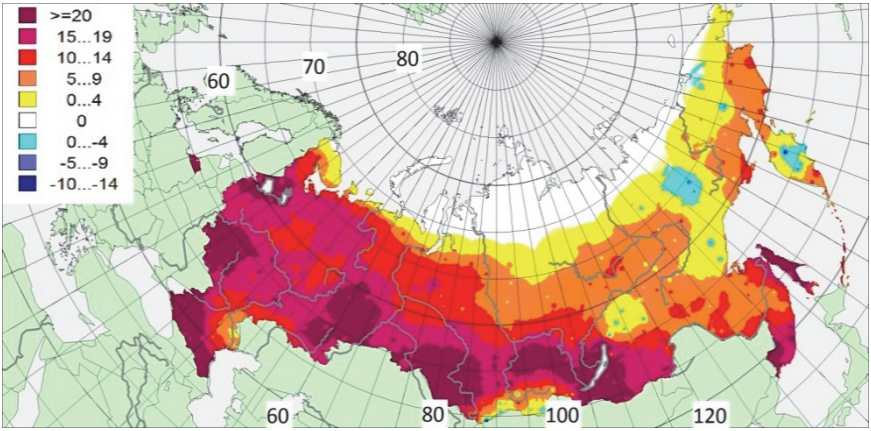

Рис. 4. *Прогноз на 2080-2099 гг. изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000, по сравнению с нормой за 1981-2000 гг. Мультимодельный прогноз климата, сценарий RCP8.5. Сезон май − сентябрь.*

В конце века по прогнозам ожидается увеличение числа пожароопасных дней на 20-29 дней и более на всей Европейской

территории России, Западной Сибири, а также в средних широтах Восточной Сибири (рис. 4). На 30-50 дней число пожароопасных дней увеличится к концу века на юге и на западе ЕТР, а также на широтах 52-57° с.ш. в Западной и Восточной Сибири (рис. 4).

По мягкому сценарию к концу века число пожароопасных дней увеличится не так сильно (рис. 5), как при возможном жестком сценарии антропогенного воздействия на климат.

Увеличение составит 10-19 дней, в некоторых местах – более 20 дней.

На всех временных интервалах и при любом сценарии просматривается общая тенденция усиления в XXI веке роли метеорологических факторов, способствующих возникновению лесных пожаров почти во всех районах лесной зоны России.

По двум сценариям изменения климата показано, что различия между прогнозами пожарной опасности на первую половину XXI века не велики. В конце XXI века при мягком и жестком сценариях различия прогнозов изменения климата создают заметные различия в прогнозах опасности лесных пожаров.

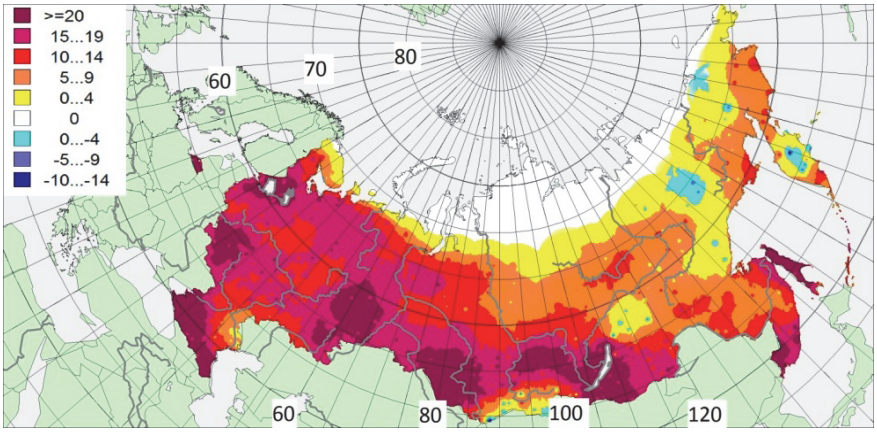

Рис. 5. *Прогноз на 2080-2099 гг. изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000, по сравнению с нормой за 1981-2000 гг. Мультимодельный прогноз климата, сценарий RCP4.5. Сезон май – сентябрь.*

В южных широтах России всегда норма числа пожароопасных дней больше, чем в других регионах, поэтому дополнительно была

построена прогностическая карта относительных изменений числа пожароопасных дней за сезон в % от аналогичных значений в базовом периоде 1981-2000 гг. На рис. 6 показана прогностическая карта относительного изменения числа пожароопасных дней по сценарию RCP8.5 на период 2080-2099 гг.

На преобладающей части России относительное число пожароопасных дней по прогнозу увеличится на 20-40%. В северной половине Европейской территории России, в Западной Сибири, на юге Восточной Сибири и на Дальнем Востоке относительное число пожароопасных дней по прогнозу увеличится еще больше − на 40-50%.

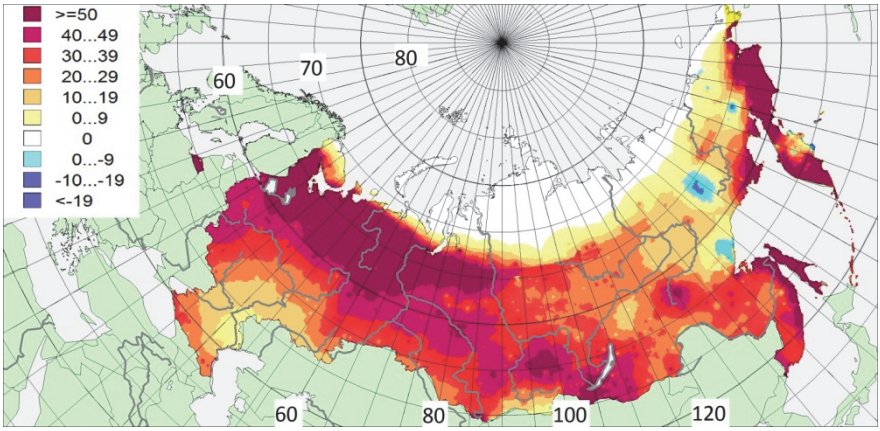

Рис. 6. *Прогноз на 2080-2099 гг относительного (в %) изменения числа дней с индексом Нестерова G>1000, по сравнению с нормой за 1981-2000 гг. Мультимодельный прогноз климата, сценарий RCP8.5. Сезон май − сентябрь.*

Ранее уже рассматривались соотношения между числом пожароопасных дней разного класса горимости и реальными лесными пожарами (Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б., 2007), но тесной линейной зависимости обнаружено не было. Дополнительные исследования нелинейных связей привели к выводу о том, что зависимость общей площади выгоревшего леса от числа пожароопасных дней за теплый сезон лучше описывается уравнением четвертой степени. Это позволило предложить индекс площади лесных пожаров SQ в зависимости от лесной площади, пройденной пожарами:

$$SQ = \sqrt[4]{S}$$

Такой индекс имеет хорошую линейную корреляцию с числом пожароопасных дней N за теплый сезон.

При подсчете числа пожароопасных дней за сезон использовался критерий G>1000 по модифицированному индексу Нестерова (Шерстюков, 2012). Число пожароопасных дней за весь пожароопасный сезон, например, в Москве может являться характеристикой потенциальной опасности лесных пожаров во всем Центральном Федеральном Округе (ЦФО). По данным (Думнов и др, 2005) о площади выгоревших лесов за 1986-2004 годы вычислены погодичные значения индекса площади лесных пожаров в ЦФО. На рис. 7 показано изменение число пожароопасных дней N при G>1000 за теплый сезон в Москве и индекс площади лесных пожаров SQ. Коэффициент линейной корреляции между ними r=0,81 свидетельствует о большой тесноте связей.

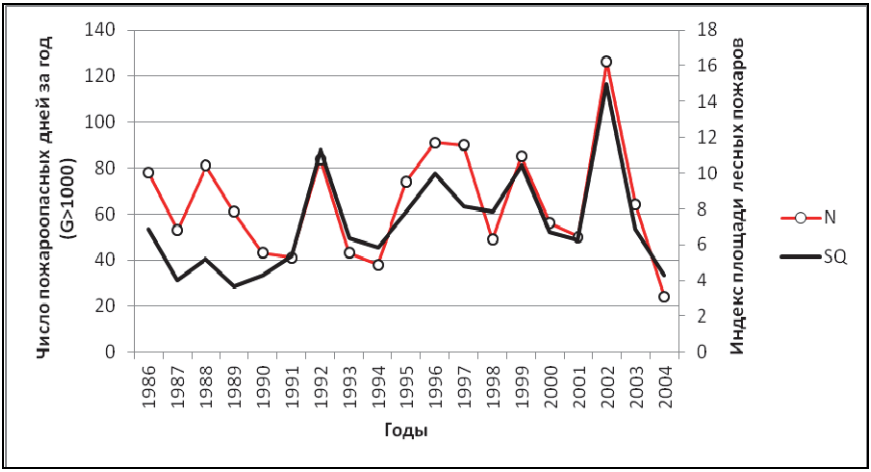

Рис. 7. *Число пожароопасных дней N за теплый сезон в Москве и корень четвертой степени из лесной площади (SQ), пройденной пожарами в ЦФО.*

Поле рассеяния такой зависимости можно оценить по рис. 8. Линейная зависимость описывает около 65% общей изменчивости.

Получено уравнение регрессии индекса площади SQ от числа опасных дней N:

$$SQ = 0{,}6349\ N + 15{,}3636 \qquad (2)$$

Тогда оценкой площади выгоревшего леса будет:

$$S = (SQ)^4 \quad [\text{Га}] \qquad (3)$$

Формулы (2) и (3) позволяют количественно оценивать площади возможного выгорания леса по данным метеорологических наблюдений.

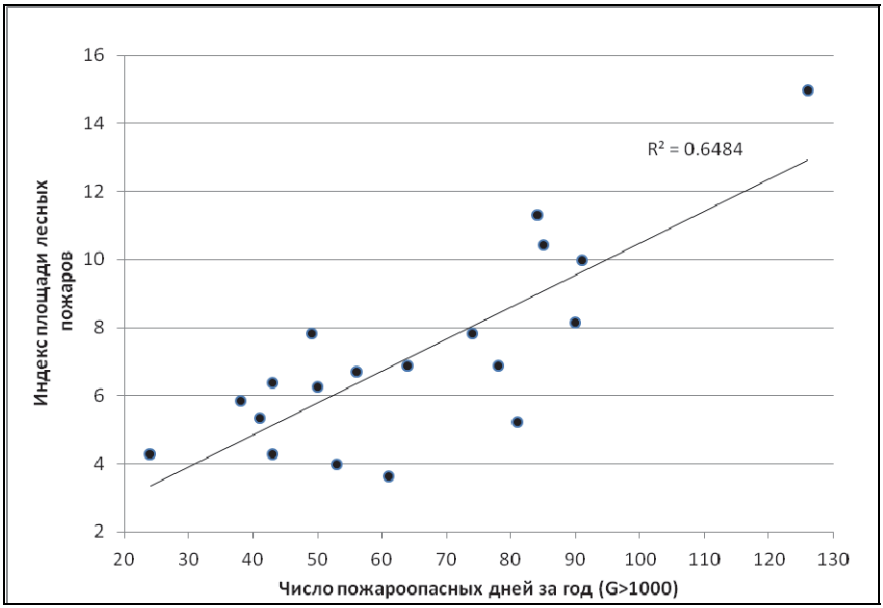

Рис. 8. *Зависимость индекса лесной площади, пройденной пожарами, от числа пожароопасных дней по индексу В.Г. Нестерова*

Четвертая степень в формуле (3) имеет логическое объяснение. При постоянной скорости горения леса и равномерного продвижения фронта лесного пожара во все стороны, выгоревшая площадь была бы в квадратичной зависимости от пути, пройденного огнем от центра до фронта. Но при лесном пожаре возникает интенсивное тепловыделение, количество тепла которого возрастает с увеличением площади поверхности охваченной огнем. Выделяющееся при лесном пожаре тепло приводит к новым возгораниям леса на значительных расстояниях, за счет излучения

тепла. Чем мощнее пожар и выше температура горения, тем больше передается тепла этим способом. Процесс горения разгоняется положительной обратной связью, которая увеличивает до четвертой степени зависимость площади выгорания от продолжительности периода с пожароопасными погодными условиями (3).

Аналогичный механизм формирования скорости горения леса и увеличения площади лесных пожаров должен работать и в других районах России, при наличии там необходимых условий для горения. Это дает возможность прогнозировать площади лесных пожаров на последующие годы в связи с ожидаемыми изменениями климата и числом прогнозируемых пожароопасных дней в году.

Как было показано выше, по модельным прогнозам в связи с ожидаемыми изменениями температуры и количества осадков к концу XXI века число пожароопасных дней во многих регионах России возрастет на 20-40% и более. Если число пожароопасных дней увеличатся на 40%, то в Центральном регионе период пожароопасных дней увеличится до 77 дней, при норме 55 дней за 1981-2000гг.

В уравнение регрессии (2) подставляем значение N = 77 и вычисляем прогностическое значение индекса SQ площади лесных пожаров к концу XXI века. В ЦФО ожидается значение индекса площади SQ = 9,69472. По уравнению (3) вычисляем лесную площадь пожаров в Центральном регионе к концу текущего века. По расчетам площадь пожаров составит около 8834 Га при современной норме 3970,1 га, т.е. к концу XXI века площадь пожаров по прогнозу возрастет примерно в 2 раза.

Заключение

Можно предположить, что подобные соотношения отражают основные физические особенности метеорологической обусловленности возникновения и распространения огня в лесу при прочих равных условиях. Если предположение не сильно отличается от реальности, то и в других регионах России на основе индекса Нестерова и эмпирических соотношений можно прогнозировать площади лесных пожаров в зависимости от метеорологических условий. Абсолютные значения площадей не столь важны, главный вывод заключается в том, что если считать достоверными модельные прогнозы температуры воздуха и количества атмосферных осадков до конца текущего столетия, то нас ожидает непропорциональный

рост количества лесных пожаров, размеров площадей выгоревшего леса, а также негативные экономические и экологические последствия.

Если появятся новые прогностические оценки изменения климата на текущее столетие, то прогнозы ожидаемых площадей лесных пожаров необходимо будет пересчитать.

Благодарность

Авторы благодарны директору Главной Геофизической Обсерватории д.ф.-м.н. В.М.Катцову и его коллегам за предоставленные цифровые материалы по мультимодельным прогнозным оценкам изменений температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XXI веке, на основе которых стали возможны исследования ожидаемых последствий этих изменений в части лесных пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный стандарт Российской Федерации. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. ГОСТ Р22.1.09-99. ОКС 13.020, ОКСТУ 002. Дата введения 01.01.2000. 13 С.
2. Думнов А.Д., Максимов Ю.И., Рощупкина Ю.В., Аксенова О.А. 2005. Лесные пожары в Российской Федерации (статистический справочник). Под редакцией А.Д. Думнова и Н.Г. Рыбальского. –М.: НИА-Природа. 229 С.
3. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. 1975. –М.: Гидрометеоиздат. 15 С.
4. Шерстюков Б.Г. 2012. Лесные пожары, как метеообусловленное явление. Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып.176. С. 326-357.
5. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. 2007. Климатические условия потенциальной горимости леса в России в XX и XXI веках. Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып. 173. С. 137-151.
6. Шерстюков Б.Г. 2013. Оценки потенциальной горимости леса по месячным метеорологическим данным. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. –М.: ИГКЭ. (В печати).

КЛИМАТОЗАВИСИМЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ И ЧЛЕНИСТОНОГИЕ ПЕРЕНОСЧИКИ: ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ НАБЛЮДАЕМОГО НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В.В. Ясюкевич[1)]*, *С.Н. Титкина*[1)], *И.О. Попов*[1)], *Е.А. Давидович*[2)], *Н.В. Ясюкевич*[3)]

[1)] ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН». 107258 Москва, Глебовская ул., 20Б. *v1959@yandex.ru

[2)] ЦНСХБ Россельхозакадемии. Россия, 107139 Москва, Орликов пер., 3Б.

[3)] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия, 127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49.

Реферат. В статье проанализирована ситуация по ряду климатозависимых заболеваний различной этиологии, наиболее характерных для территории России, а также оценено возможное влияние изменения климата на переносчиков возбудителей путем математического моделирования с использованием климатических предикторов.

Среди нетрансмиссивных вирусных природно-очаговых зоонозов наиболее распространена геморрагическая лихорадка с почечным синдромом. В качестве климатозависимых болезней бактериальной этиологии рассмотрены лептоспироз и туляремия. Среди трансмиссивных природно-очаговых заболеваний различной этиологии, переносчиками которых являются иксодовые клещи, рассмотрены клещевой энцефалит, иксодовые клещевые боррелиозы (болезнь Лайма), клещевой сыпной тиф (клещевой риккетсиоз) Северной Азии, крымская геморрагическая лихорадка. Первые три заболевания являются преобладающими на территории России. Из природно-очаговых заболеваний, переносчиками которых являются комары, наибольшее значение имеет лихорадка Западного Нила. В качестве примера паразитарного антропоноза рассмотрена малярия.

В последние полтора десятилетия уровень заболеваемости по рассмотренным климатозависимым заболеваниям, кроме болезни Лайма и лихорадки Западного Нила, имеет тенденцию к снижению.

Модельный анализ изменения распространения иксодовых клещей − переносчиков клещевого энцефалита и малярийных комаров показал, что их ареалы под влиянием наблюдаемых

изменений климата существенно расширяются в северном и восточном направлении, а сокращение незначительно.

Предпосылки к увеличению заболеваемости этими инфекциями и более широкому их распространению сохраняются. В первую очередь, они связаны с изменениями климата, как наблюдаемыми ныне, так и предполагаемыми.

К факторам климатического риска относятся расширение ареалов членистоногих переносчиков и повышение их численности, а также аналогичное повышение численности и расширение ареалов позвоночных, преимущественно мышевидных грызунов, являющихся резервуарами природно-очаговых инфекций и прокормителями переносчиков в природе. Новым фактором риска является завоз экзотических переносчиков на территорию России и их укоренение, значение которых усиливается при предполагаемом потеплении.

Мерами противодействию (мерами адаптации) климатозависимым инфекциям являются специфическая профилактика (вакцинация), усиление мониторинга за видовым составом и численностью переносчиков и резервуаров инфекций, увеличение масштабов и результативности борьбы с ними, применение средств индивидуальной защиты от нападения переносчиков.

Ключевые слова. Изменение климата, климатозависимые болезни, возбудитель заболевания, членистоногий переносчик, трансмиссивные заболевания, резервуар заболевания, факторы климатического риска, меры адаптации.

CLIMATE-DEPENDANT DISEASES AND ARTHROPOD VECTORS: POSSIBLE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE OBSERVED IN RUSSIA

V.V. Yasjukevich[1)], S.N. Titkina[1)], I.O. Popov[1)], E.A. Davidovich[2)], N.V. Yasjukevich[3)]*

[1)] Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, *v1959@yandex.ru

[2)] CNSHB of Russian Academy of Agrarian Sciences, 3B, Orlikov per., 107139 Moscow, Russia.

[3)] The Russian state agrarian university − MSHA K. A. Timirjazeva's name, 49, Timirjazevskaja str., 127550 Moscow, Russia.

Abstract. A situation with the most typical of Russia climate dependant diseases of different aetiology is analyzed in the paper. Possible influence of climate change on their vectors is also explored using mathematical models and climatic predictors.

Hemorrhagic fever with renal syndrome appears the most widespread non-transmissible virus zoonoses of natural focus. Leptospirosis and tularemia are considered as examples of climate dependant diseases of bacterial aetiology. The following diseased are considered as transmissible diseases of natural focus having different aetiology and transmitted by ticks: tick-borne vernal encephalitis, tick-borne borreliosis (the Lyme disease), tick-borne rickettsiosis of North Asia, crimean-congo hemorrhagic fever. The former three diseases are rather typical of Russia.

The major disease of natural focus transmitted by mosquitoes is the West Nile encephalitis. Malaria is considered as an example of the parasitic antroponosis.

In the last one and a half decade, the level of morbidity has decreased for all the abovementioned climate dependant diseases, except the Lyme disease and the West Nile encephalitis.

A model analysis of changes in geographical distribution of ixodidea ticks (vectors of vernal encephalitis) and malaria mosquitoes showed that their spatial ranges have substantially extended northward and eastward because of the observed climate change, while reduction was insignificant.

Conditions for the increase in morbidity for these diseases and for their expansion still remain under actual and projected climate change. Risks are connected primarily with climate-driven extension of spatial ranges and increase in density for the arthropod vectors as well as for vertebrates, mainly murine rodents, which are natural reservoir of natural focus infections and feeders of vectors in nature.

A new risk factor is the import of exotic vectors into Russia and their rooting. A weight of this factor increases along with hypothesized warming.

Counteraction measures (adaptation measures) against climate dependant infections are as follows: special prophylaxis (vaccination), strengthening of monitoring of species composition and density of vectors and infection reservoirs, increase in scale and efficiency of suppression measures, use of the means of individual defense against vector attacks.

Key words. Climate change, climate dependant diseases, disease agent, arthropod vector, transmissible disease, disease reservoir, climate risk factor, adaptation measure.

Введение

Инфекционные болезни человека, в том числе и трансмиссивные, распространены практически повсеместно. Большинство их является климатозависимыми. Потепление климата приводит к изменению условий их распространения. В данной публикации мы не можем рассмотреть все такие заболевания, поэтому остановимся лишь на некоторых, характерных для нашей страны.

Для трансмиссивных заболеваний меняются условия существования популяций переносчиков и условия развития возбудителей в переносчике, условия существования различных позвоночных животных, которые в случае природно-очаговых заболеваний являются резервуарами инфекции. Для нетрансмиссивных заболеваний изменения климата имеют значение для существования животных, являющихся резервуарами инфекции.

При этом необходимо дифференцировать изменения, вызванные климатическими факторами, от изменений, обусловленных другими факторами. Они происходят на фоне действия различных факторов неклиматической природы – экологических, демографических и социально-экономических. Характер их действия на территории России в последние десятилетия существенно изменился. Например, заболеваемость клещевым энцефалитом зависит от объемов вакцинации, подавления очагов методами неспецифической профилактики, от происходящего увеличения частоты контактов населения, в первую очередь, городского с возбудителями и переносчиками на садово-огородных участках. На уровне заболеваемости также сказываются циклические колебания численности переносчиков и позвоночных хозяев (Семенов и др., 2006). Однако, данных в России для широких обобщений недостаточно, поскольку в настоящее время систематический мониторинг природноочаговых инфекций на постоянных стационарах не проводится (Коренберг, 2004).

Однако, для России эти исследования особенно актуальны, так как изменение климата на ее территории происходит более интенсивно, чем глобальное (Оценочный доклад…, т. I).

Сопоставление изменений заболеваемости населения России инфекциями различной этиологии с произошедшими изменениями климата показало неоднозначные результаты. Для ряда болезней – полиомиелит, краснуха, ветряная оспа, шигеллез – имеющиеся данные не позволяют сделать вывод о наличии зависимости, а для других – сальмонеллез, геморрагическая лихорадка с почечным синдромом, клещевой энцефалит, иксодовый клещевой боррелиоз – влияние изменений климата установлено (Лялина, 2004). Повысилась также вероятность сохранения некоторых вирусов, например, японского энцефалита и лихорадки Западного Нила, в комарах, являющихся переносчиками этих заболеваний, во время зимовки, улучшились условия протекания спорогонии возбудителя малярии в переносчике (Алексеев, 2004, 2006; Семенов и др., 2006).

Обзор ситуации по климатозависимым трансмиссивным и нетрансмиссивным заболеваниям и их переносчикам даны во 2-м томе Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008), посвященном последствиям изменений климата и статье (Ясюкевич, Ревич, 2009). Показано, что изменение климата будет способствовать расширению нозоареалов клещевого весенне-летнего энцефалита, иксодового клещевого боррелиоза, крымской геморрагической лихорадки, лихорадки западного Нила, геморрагической лихорадки с почечным синдромом и повышению заболеваемости этими инфекциями. В то же время ухудшения эпидемиологической ситуации по малярии в целом по стране в связи с изменением климата не ожидается.

Со времени выхода из печати этих работ прошло достаточное количество времени для того, чтобы снова обратиться к этой теме и обобщить появившиеся новые материалы.

Среди нетрансмиссивных природно-очаговых зоонозов наиболее распространена **геморрагическая лихорадка с почечным синдромом (ГЛПС).** Это заболевание вирусной этиологии − *Hantavirus* (сем. Bunyavirida). Известно 5 серотипов вируса − Пуумала, Хантаан, Сеул, Амур и Добрава. На территории России наиболее распространен первый. Резервуаром и источником заражения являются мышевидные грызуны, в первую очередь рыжая, красная и восточная полевки, лесная и полевая мышь, выделения которых содержат вирус. Заражение человека происходит респираторным и алиментарным путем (Руководство по зоонозам,

1983; Нафеев, Салина, 2012). Динамика заболеваемости ГЛПС представлена на рис. 1.

Рис. 1. *Динамика заболеваемости геморрагической лихорадкой с почечным синдромом в Российской Федерации (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).*

После пикового значения заболеваемости, который пришелся на 1997г., заболеваемость существенно снизилась. Для примера укажем, что в 2011 и 2012 гг. в России было зарегистрировано 6096 и 6794 больных, что соответствует показателю заболеваемости 4,3 и 4,8 (рис. 1).

Заболеваемость ГЛПС распределяется по территории страны неравномерно. Наиболее неблагополучная обстановка сохраняется в субъектах Приволжского федерального округа. Заболеваемость там превышает среднюю во много раз.

Так, в 2008 и 2009 гг. показатели заболеваемости в Удмуртской Республике составляли 85,2 и 55,8 (превышение в 12,9 и 8,9 раза

соответственно), в Республике Башкортостан − 60,9 и 80,4 (превышение в 9,2 и 12,8 раза), Республике Марий Эл − 34,0 и 20,7 (превышение в 5,2 и 3,3 раза), в Республике Татарстан − 28,7 и 31,4 (превышение в 4,4 и 5,0 раз).

Климатическими факторами риска повышения заболеваемости являются повышение температуры и количества осадков в умеренных широтах Европы, особенно увеличение толщины снежного покрова, более раннее наступление весны. Это приводит к лучшей выживаемости мышевидных грызунов, период размножения у них начинается также раньше. В конечном счете, это способствует повышению их численности в природных очагах ГЛПС и увеличению частоты контактов с людьми.

Влияют в этом направлении также и социальные факторы, в частности, изменения рекреационных предпочтений людей. Например, в Удмуртии до середины 1980 гг. около 50% заболевших горожан заражались при посещении лесных массивов и только 25% на садово-огородных участках. К началу XXI века это соотношение стало почти обратным: 30% и 47% соответственно (Бернштейн и др., 2004). Негативно сказывается и вывод из оборота большого количества пахотных земель, что создает благоприятные условия для жизнедеятельности и размножения грызунов. Объем дератизационных мероприятий в природных условиях и населенных пунктах сокращается. Финансирование, выделяемое на организацию и проведение противоэпидемических мероприятий, недостаточно. В сочетании с отсутствием препаратов по специфической профилактике ГЛПС все это определяет неблагоприятный прогноз по этой инфекции (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 2011).

В качестве климатозависимых болезней бактериальной этиологии рассмотрим лептоспироз и туляремию.

Лептоспироз широко распространен на территории России (рис. 2). В в 2008-2011 гг. зарегистрировано 616, 495, 366 и 269 больных. Значительный подъем заболеваемости отмечался в 1997 и 2004 годах.

Рис. 2. *Динамика заболеваемости туляремией и лептоспирозом в Российской Федерации (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998−2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).*

Возбудитель − ряд сходных между собой спирохет рода *Leptospira*. Пути заражения − аспирационный, контактный, алиментарный. Известно 2 типа очагов заболевания − природные и антропургические.

Природные очаги имеют ландшафтную приуроченность. Они расположены в лесной зоне, но по долинам рек проникают в лесотундровую, лесостепную и степную зоны. Резервуаром инфекции и источником заражения являются мелкие грызуны и насекомоядные (землеройки, ежи). Антропургические очаги не имеют ландшафтной приуроченности и возникают повсеместно как в городах, так и в сельской местности. Резервуарами инфекции и источниками заражения в таких очагах являются домашние животные (свиньи, крупный рогатый скот, собаки), синантропные грызуны, промысловые животные клеточного содержания (песцы, лисицы). Наряду со спорадическими случаями заболевания случаются локальные вспышки «купального характера» − купание в загрязненных выделениями больных животных водоемах и

связанные с профессиональной деятельностью (работники звероферм, собаководы и др.) (Руководство по зоонозам, 1983).

Наиболее эффективным способ профилактики является вакцинация, но ее объем на порядок меньше, чем при туляремии (см. ниже) (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998 − 2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012). Необходимо также уделять внимание санитарно-эпидемиологическому состоянию населенных пунктов и животноводческих предприятий (дератизация и вакцинация домашних и пушных животных).

Климатические факторы риска при этом заболевании те же, что и при ГЛПС − повышение численности грызунов при потеплении, за исключением состояния популяций переносчиков, так как трансмиссивный путь передачи лептоспироза отсутствует.

Туляремия − природно-очаговый зооноз, возбудителем которого является бактерия *Francisella tularensis*. Широко распространен на территории России но заболеваемость этой инфекцией существенно ниже, чем лептоспирозом. Резервуаром в природных очагах, а их известно 7 типов (пойменно-болотный, лугополевой, лесной, степной (балочный), предгорно-ручьевой, тугайный и тундровый), а также источником заражения людей являются мелкие грызуны, а также зайцы, ондатры, бурундуки. Заражение происходит различными путями: контактным, алиментарным, аспирационным и факультативно-трансмиссивным. В последнем случае возбудитель не проходит в переносчике каких-либо стадий развития и не размножается, а лишь сохраняется некоторое время. Переносчиками являются различные клещи, комары, слепни и другие кровососущие двукрылые. Из них наиболее эффективными являются слепни, как в силу строения ротового аппарата, так и потому, что многие их виды наиболее активны в жаркую и сухую погоду (Руководство по зоонозам, 1983, Тарасов, 2002). Заболеваемость спорадическая, (ее динамика представлена на рис. 2), но бывают локальные вспышки. В 2011-2012 гг. в России зарегистрировано 53 и 128 больных. Наиболее надежным способом профилактики является вакцинация. В 2007-2008 гг. было вакцинировано по 600 тыс. человек, в дальнейшем темпы вакцинации снизились и составили 318-350 тыс. человек в год. Ревакцинации же в России в последнее время подвергается по 1,3-1,5 млн. человек (О санитарно-

эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).

Климатические факторы риска при этом заболевании те же, что и при ГЛПС и лептоспирозе − повышение численности грызунов при потеплении, а также, что обусловлено наличием факультативно-трансмиссивного пути заражения, расширение ареалов кровососущих членистоногих и увеличение их численности.

Клещевой энцефалит − одно из распространенных природно-очаговых заболеваний на территории России. Оно известно с 1937-1939 гг., тогда же была выяснена его вирусная этиология и роль иксодовых клещей как переносчиков и резервуаров вируса в природных очагах (Зильбер, 1939). Возбудитель относится к семейству Flaviviridae, род *Flavivirus* (антигенная группа вирусов клещевого энцефалита) (Львов и др., 1989). Основными переносчиками являются *Ixodes persulcatus* и *I. ricinus*, как второстепенные переносчики зарегистрированы *Dermacentor reticulatus, D. marginatus, D. silvarum, D. nuttalli, Haemaphysalis concinna* и некоторые другие. Главнейший путь заражения − трансмиссивный, иногда встречается алиментарный − употребление зараженного козьего молока. Прокормителями клещей на разных стадиях развития являются различные животные (мелкие грызуны, насекомоядные, зайцы, птицы − обитатели нижнего яруса леса, копытные). Они также являются и резервуарами возбудителя. Вирус успешно переживает в клещах зимний период, передается трансфазово и трансовариально (Тарасов, 2002; Злобин, 2010).

Характерной особенностью динамики заболеваемости клещевым энцефалитом является её цикличность (Злобин, 2010). Так, во второй половине 1940 гг. показатель заболеваемости был существенно ниже единицы и достиг значения 1,0 в 1952г. Затем последовал резкий подъем с пиковыми значениями в 1956 и 1964 годах (5163 и 5205 больных), а затем столь же резкий спад. С 1974г. выявилась тенденция к росту заболеваемости, ставшая особенно выраженной с 1989г. Пиковые значения были достигнуты в 1996 и 1999 годах (10 298 и 9955 больных). В дальнейшем заболеваемость существенно снизилась (рис. 3) и в 2010-2011 гг. было зарегистрировано только 3094 и 3533. Тем не менее, по тяжести течения болезни, смертности и последствиям для переболевших, клещевой энцефалит является важнейшим трансмиссивным зоонозом на территории России (Злобин, 2010).

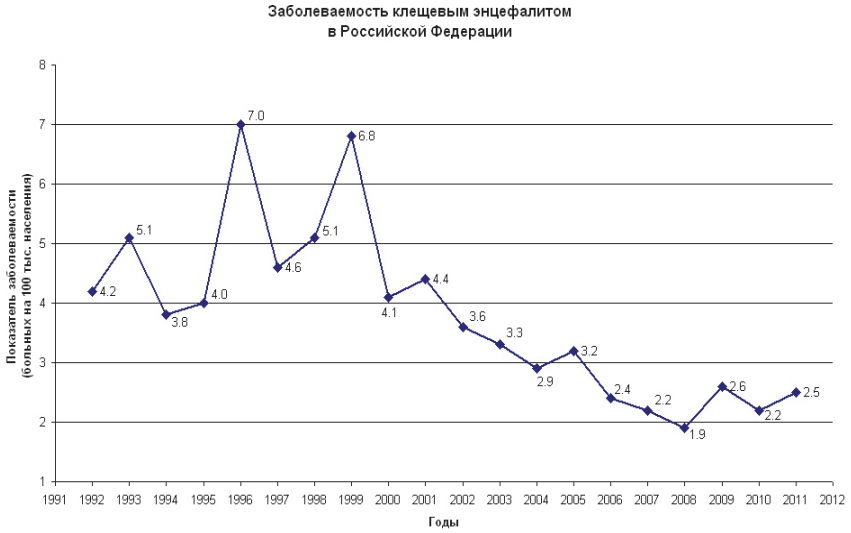

Рис. 3. *Динамика заболеваемости клещевым энцефалитом в Российской Федерации (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998−2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).*

Традиционно неблагополучными по этому заболеванию являются регионы Урала и Сибири. Так, в 1999 году показатель заболеваемости по России составил 6,8, тогда как в Пермской области – 32,4, Удмуртии – 52,9, Тюменской области – 35,2, Курганской области – 35,4, Томской области – 64,2, Красноярском крае – 52,8. В 2010 году наиболее высокая заболеваемость регистрировалась в Республике Алтай (21,43), Томской области (20,94), Красноярском крае (16,36) и Курганской области (15,37) при среднем по стране показателе 2,2. Таким образом, в отдельных субъектах Российской Федерации показатель заболеваемости выше среднего в 5-10 раз (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).

В Кировской, Свердловской, Омской, Псковской, Архангельской областях, Красноярском крае, Республике Бурятия Республике Тыва и Забайкальском крае наблюдалось расширение

нозоареала клещевого энцефалита (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012; Злобин, 2010; Tokarevich et al., 2011).

В качестве причин, приведших к расширению нозоареала клещевого энцефалита, выделяют антропогенное трансформирование естественных ландшафтов, в том числе освоение лесных массивов под дачные и садово-огородные участки, более частый выезд горожан «на природу» для отдыха, сбора грибов, ягод и т.д., образование антропургических очагов, в которых в циркуляции вируса участвуют и домашние животные. Это способствует повышению контакта населения, городского, прежде всего, с клещами, что привело к тому, что в настоящее время доля городских жителей среди заболевших достигает 70-80%. Часть горожан (10% от общего числа заболевших) заражается в пределах городов, в садах и парках (Злобин и др., 2004; Злобин, 2010).

Также одной из причин увеличения заболеваемости населения клещевым энцефалитом на Урале и в Сибири является смягчение и увлажнение климата. Так, в период 1993-2003 гг. в Иркутской области температура февраля повысилась на 6°С и достигла – 11°С, а длительность безморозного периода увеличилась с 90 – 100 до 120 – 130 дней. По многолетним наблюдениям (1956 – 2003 гг.) на территории Иркутска и Иркутского района Иркутской области обилие иксодовых клещей возросло в 57,5 раза, а заболеваемость в 40,2 раза (Злобин и др., 2004). Однако Э.И. Коренберг (Коренберг и др., 2004; Коренберг, 2008) не считает влияние изменения климата на природные очаги клещевого энцефалита и его переносчиков безусловно установленным.

Тем не менее, потепление климата способствовало смещению границы распространения основных переносчиков клещевого энцефалита *I. ricinus* и *I. persulcatus* на северо-восток Европейской территории России и Сибири соответственно, расширило период их активности. В то же время вследствие повышения аридности в южных регионах России южная граница распространения этих видов может сдвинуться к северу (Алексеев, 2004, 2006). *I. persulcatus* на территории Республики Коми в 1960 гг. встречался только в южных районах, теперь же он обнаружен и в центральных (Глушкова и др., 2011).

Модельные оценки изменения ареалов *I. persulcatus* и *I. ricinus* в соответствии с наблюдаемым изменением климата представлены на рис. 4 и 5. Ранее мы уже проводили такой анализ (Ясюкевич и др., 2009), но здесь представлены новые оценки, выполненные на основе обновленной климатической базы, включающей ряды метеоданных по 2010 год включительно.

Сокращение ареала *I. persulcatus* возможно на территории стран Балтии и части горной системы Алтая, расположенной на территории Республики Казахстан. Расширение ареала происходит в ограниченных масштабах на Европейской территории России в северном направлении на территории Республики Карелия, Архангельской области и Республики Коми и весьма существенно на территории Сибири и Дальнего Востока в северном и северо-восточном направлении (рис. 4).

Сокращение ареала *I. ricinus* не происходит. Отмечено его существенное расширение в средних широтах Европейской территории России на восток и в северном направлении на территории Республики Карелия, а также в северном и восточном направлении в Архангельской области (рис. 5).

Эффективным способом профилактики клещевого энцефалита является вакцинация. В 2009-2011 годах было вакцинировано и ревакцинировано по 3 млн. человек. Важной мерой сдерживания заболевания являются также мероприятия по уничтожению прокормителей и переносчиков − дератизация и акарицидные обработки как в природных, так и в антропоургических очагах. Большое значение имеет санитарно-профилактическая работа среди населения − разъяснение правил индивидуальной защиты от присасывания клеща и применения репеллентов (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 2010, 2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012). Для усиления надзора за клещевым энцефалитом и его профилактики в 2008г. были введены санитарно-эпидемиологические правила «Профилактика клещевого энцефалита» СП 3.1.3.2352-08. Они предписывают 95% вакцинацию населения эндемичных по этому заболеванию районов.

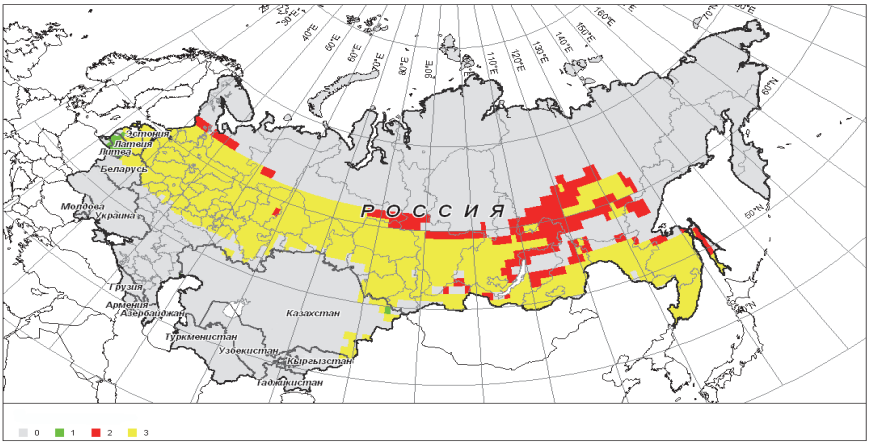

Рис. 4. *Возможное климатообусловленное изменение ареала I.persulcatus на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг. Обозначения: 0 – переносчик отсутствует; 1 – сокращение ареала; 2 – расширение ареала; 3 – переносчик присутствовал как в 1951-1980 гг., так и в 1981-2010 гг.*

Рис. 5. *Возможное климатообусловленное изменение ареала I.ricinus на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг. Обозначения: как на рис. 4, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Климатическими факторами риска являются рост численности и расширение ареалов прокормителей и переносчиков.

Иксодовые клещевые боррелиозы (болезнь Лайма) в России официально регистрируются с начала 1992г. и с того времени заболеваемость возросла почти в 4 раза, от 2477 до 9 942 больных в 2011г. (табл. 1). Наиболее высокая заболеваемость отмечена в Волго-Вятском, Уральском, Западносибирском, Дальневосточном регионах. Наиболее высокие уровни заболеваемости клещевым боррелиозом в 2010г. зарегистрированы в Кировской (33,23) и Вологодской (31,91) областях, Республике Тыва (20,92), Удмуртской Республике (17,55), Томской области (17,19). В последние годы инфицирование населения при укусе клеща происходит не только на территории природных очагов, но и, как и в отношении клещевого энцефалита, в городских парках и скверах (Арумова, Воронцова, 2000; Злобин и др., 2004; О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 2011). Повышается число обращений населения по поводу укуса иксодового клеща (табл. 1), что, впрочем, свидетельствует не только о росте обилия клещей, но и о повышении санитарной культуры людей и их заботе о своем здоровье. В 2011г. 6,1% клещей, которые были сняты с людей, были носителями вируса клещевого энцефалита, а 10,7% − боррелий (из исследованных 225 639 клещей) (О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012). Это средние показатели по России. В ряде случаев зараженность клещей может быть существенно выше. Так, на севере Калужской области, по многолетним (1992-2012 гг.) данным, боррелии были выделены из 27,6% клещей *I. ricinus*, причем доля зараженных самцов и самок была одинаковой (27,0 и 27,6%) (Буренкова, 2012). В Московской области за период исследований 1996-2007 гг. средняя зараженность *I. ricinus* составила 11,3%, а *I. persulcatus* − 27,3% (Коротков и др., 2008). Возбудителями болезни в Евразии являются три патогенных для человека вида боррелий: *Borrelia burgdorferi*, *B. garinii*, *B. afzelii*. Заболевание было впервые описано в 1975 году в США, в штате Коннектикут, городке Лайм, от которого и получило свое название. Возбудитель − *B. Burgdorferi* − был выделен в 1982г. Этот вид редко встречается в Евразии, напротив, два других в Северной Америке не обнаружены. Поэтому в последнее время под термином болезнь Лайма понимают комплекс иксодовых клещевых бореллиозов (Манзенюк, Манзенюк, 2005). С инфекцией *B. garinii* связывают неврологическую симптоматику,

сходную с клиническими проявлениями при некоторых формах клещевого энцефалита, *B. burgdorferi* − Лайм-артритом, *B. afzelii* − хроническим атрофическим дерматитом (Манзенюк, Манзенюк, 2005).

Таблица. 1.

Заболеваемость иксодовыми клещевыми боррелиозами (болезнь Лайма) и число обращений по поводу укуса клеща в Российской Федерации

Год	Иксодовый клещевой боррелиоз (болезнь Лайма)		Число обращений населения по поводу укуса иксодового клеща
	Больных на 100 тыс. населения	Абсолютное число больных	
1992	–	2477*	–
1993	–	4727*	–
1994	2,7*	–	–
1995	2,8*	–	–
1996	5,5*	–	–
1997	–	–	–
1998	5,9	8 606	–
1999	5,8	8 470	–
2000	5,4	7 862	–
2001	–	–	–
2002	5,1	7 368	–
2003	6,1	8 707	257 150
2004	4,5	6 463	233 901
2005	–	–	–
2006	–	–	243 640
2007	5,1	7 247	231 334
2008	5,4	7 696	242 562
2009	6,8	9 688	503 137
2010	5,0	7 055	455 285
2011	7,0	9 942	574 402

Примечание: **по: (Арумова, Воронцова, 2000). Остальные данные по: (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012). (Прочерк − отсутствие данных).*

Переносчиками и резервуарами боррелий в природных очагах являются клещи, важнейшими на территории России − *I. persulcatus* и *I. ricinus*. Возбудитель сохраняется в них всю жизнь и передается трансфазово и трансовариально. Прокормителями клещей, а также и резервуарами боррелий, являются различные животные (мелкие

грызуны, насекомоядные, зайцы, птицы − обитатели нижнего яруса леса, копытные).

Общий комплекс переносчиков и их прокормителей обуславливает большое эпидемиологическое сходство болезни Лайма с клещевым энцефалитом. Более того, почти все очаги клещевого энцефалита являются сочетанными с болезнью Лайма. Однако нозоареал последней шире, чем энцефалита. Так, в Центральном и Центрально-Чернозёмном районах заболеваемость боррелиозами регистрируется, а энцефалитом − нет (Злобин, 2010).

Профилактические меры и климатические риски те же, что и в отношении клещевого энцефалита, за исключением того, что средства специфической профилактики не разработаны и вакцинация против болезни Лайма не проводится.

Клещевой сыпной тиф (клещевой риккетсиоз) Северной Азии − природно-очаговое заболевание, также экологически связанное с клещами, очаги которого широко распространены на территории Сибири и Дальнего Востока. Возбудителем его является *Rickettsia sibirica*. Путь передачи − облигатно-трансмиссивный. Резервуаром *Rickettsia sibirica* в очагах являются мелкие грызуны и копытные. Важнейшие переносчики − клещи рода *Dermacentor*, в первую очередь, *D. nuttalli*, а также *D. silvarum*, *D. marginatus*, *D. pictus*. Доказано участие в циркуляции возбудителя и других видов иксодовых клещей: *Haemaphysalis concinna*, *H. punctata*, *H. japonica douglasi*, *Rhipicephalus sanguineus*, *Rh. schulzei*, *Ixodes plumbeum*, *I. apronopharus*, *Ixodes persulcatus*. Они являются не только переносчиками, но и резервуаром возбудителя, причем более важным, чем грызуны, которые сохраняют возбудитель в течение одного сезона. В клещах же возбудитель сохраняется в течение всей их жизни и передается трансфазово и трансовариально (Руководство по зоонозам, 1983; Тарасов, 2002; Лобан и др., 2002).

Уровень заболеваемости в целом по России невелик, но в последние два десятилетия XX века прослеживалась некоторая тенденция к его увеличению: за 1979-1991 гг. было зарегистрировано 11 334 случая клещевого сыпного тифа, а впоследствии, за более чем вдвое меньший период (1994-1998 гг.) − почти столько же (11 809 случаев). Как и в случае других природно-очаговых заболеваний, переносчиком которых являются клещи, возросла заболеваемость городских жителей, что связано с освоением земель под садовые участки, популярностью отдыха на природе и т.д. (Лобан и др.,

2002). В настоящее время показатель заболеваемости стабильно держится на уровне 1,2-1,3 (1797 и 1685 случаев в 2003 и 2004 гг.; и 1808 и 1752 случая в 2008 и 2009 гг.) (Инфекционная заболеваемость…, 2005, 2010). Наиболее неблагоприятны в отношении этого заболевания Красноярский край и Иркутская область (показатель заболеваемости 4,0 − 17,5, причем в ряде районов этих субъектов РФ в отдельные годы показатель возрастал до 244) (Лобан и др., 2002) .

Профилактические меры и климатические риски те же, что и в отношении клещевого энцефалита и болезни Лайма, за исключением того, что средства специфической профилактики не разработаны и вакцинация не производится.

Крымская геморрагическая лихорадка (КГЛ) периодически регистрируется в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах Российской Федерации, а в пределах бывшего СССР − в Средней Азии, Закавказье, Украине. Её возбудитель − вирус из семейства Buyaviridae, род *Nairovirus*. Переносчиками и резервуарами вируса в природе являются клещи рода *Hyalomma*, важнейшие из них в Европейской части России − *H. marginanum*, в Средней Азии − *H. anatolicum*. Вирус выделен также и из ряда других видов клещей, обитающих в степной и полупустынной зоне. Кроме того, источниками вируса служат дикие (грызуны, зайцы, ежи) и домашние (крупный рогатый скот, верблюды) животные, а также птицы. Путь передачи − трансмиссивный, но возможен и контактный, например, при раздавливании клеща (Львов и др., 1989; Тарасов, 2002).

Заболеваемость с 1948 по 2003 гг. распределялась по субъектам Российской Федерации следующим образом: Ростовская область – 357, Астраханская область – 297, Ставропольский край – 189, Волгоградская область – 33, Калмыкия – 23, Краснодарский край – 18, Дагестан – 9 случаев (Бутенко, Ларичев, 2004). В Калмыкии и Волгоградской области случаи заболевания отмечены впервые в 2000г., а в Дагестане – в 2001г. Это связывается с тем, что вследствие потепления климата граница ареала основного переносчика – клеща *Hyalomma marginatum* – продвинулась к северу, возросла его численность и, как следствие, расширился ареал инфекции. Предпочтительным местом обитания его стали природные биотопы лесостепной зоны, что свидетельствует о вовлечении новых территорий (в т.ч. Западной, Северо-Западной и Центральной частей

Ставропольского края). Это подтверждено результатами положительных находок антигена вируса КГЛ в клещах на указанных территориях. Показатели вирусофорности клещей в степных и лесостепных ландшафтах районов в 1,5 раза выше, чем в зоне полупустынь (Бутенко, Ларичев, 2004; О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 2010). Уровень заболеваемости за последнее десятилетие представлен на рис. 6. Обращает на себя внимание существенный рост числа обращений населения по поводу укуса клеща.

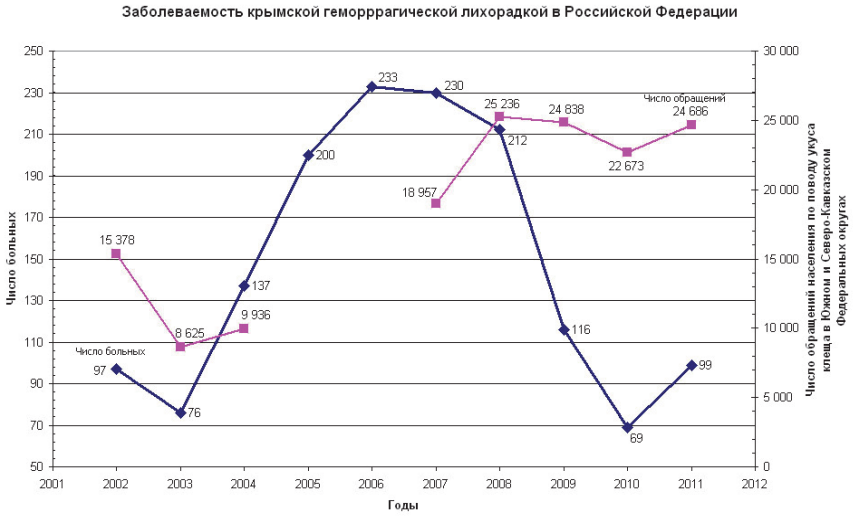

Рис. 6. *Заболеваемость крымской геморррагической лихорадкой в Российской Федерации и число обращений населения по поводу укуса клеща в Южном и Северо-кавказском Федеральных округах (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 2003-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).*

Мерами профилактики являются индивидуальная защита от нападения клещей и применение репеллентов. Климатический риск − расширение ареала переносчиков.

Лихорадка Западного Нила (ЛЗН) − природно-очаговое заболевание, циркулирующее в популяциях птиц, в основном, водного и околоводного комплексов. Его возбудитель − *Flavivirus* (сем. Flaviviridae, антигенный комплекс японского энцефалита)

впервые был выделен в Уганде, в провинции Западный Нил, за что заболевание и получило свое название (Львов и др., 1989). Перелетные птицы могут переносить вирус на большие расстояния, вследствие чего он может обнаруживаться и в местностях, считающимися неэндемичными по ЛЗН, например, в Сибири (Платонова и др., 2006). Эндемичными же считаются районы, где среднегодовая сумма активных температур при пороговом значении 10°С превышает 2 800°С. Интенсивная циркуляция вируса в теплое время года возможна при среднегодовой сумме температур более 2 200°С (Platonov et al., 2008).

Рис. 7. *Динамика заболеваемости лихорадкой Западного Нила в Российской Федерации (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).*

Основными переносчиками возбудителя являются орнитофильные виды комаров родов *Culex*, *Aedes, Uranotaenia, Anopheles* и некоторых других. В городских условиях велика роль как переносчика обитающего в затопленных подвалах *Culex pipiens molestus.* Возбудитель неоднократно обнаруживался в иксодовых и

аргасовых клещах (Львов и др., 1989; Тарасов, 2002; Федорова, 2007; Орехов и др., 2008; Platonov et al., 2008).

В Российской Федерации ЛЗН регистрируется с 1997 года. Динамика заболеваемости представлена на рис. 7.

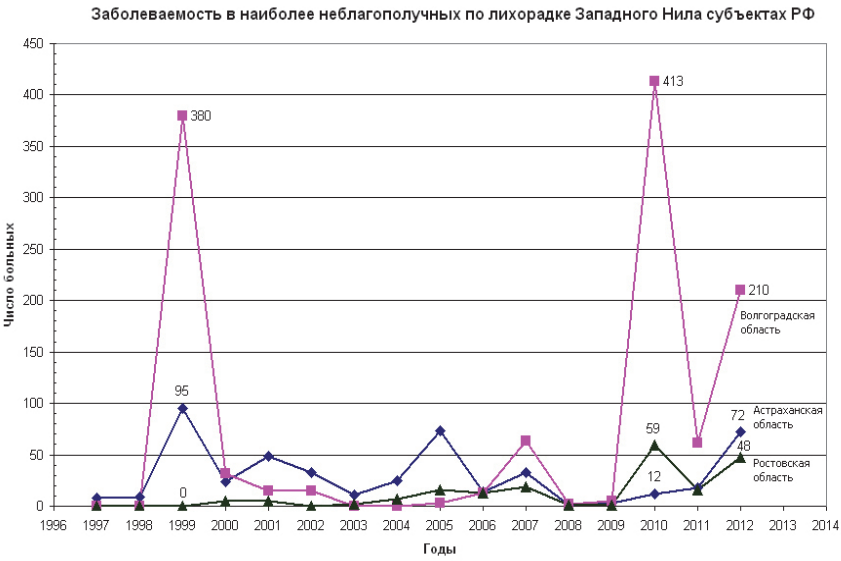

Рис. 8. *Динамика заболеваемости в наиболее неблагополучных по лихорадке Западного Нила субъектах РФ (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012; Лихорадка Западного Нила в мире, 2013).*

В 1999г. в Волгоградской и Астраханской областях возникла эпидемическая вспышка ЛЗН, в результате которой заболело 475 человек. Этот год был одним из наиболее теплых за более чем 100 лет наблюдений, с чем и связывается такой рост заболеваемости (Платонов, 2004, 2006). Однако, следует иметь в виду, что аномально теплые годы часто бывают и аномально засушливыми (Оценочный доклад…, т.I), что влечет за собой сокращение мест выплода комаров и, соответственно, падение их численности, что снижает интенсивность передачи возбудителя. После ряда благополучных лет последовал резкий подъем заболеваемости: в 2010г. был

зарегистрирован 521 больной, в следующем году − 163 и в 2012г. − 454 (рис. 7).

Наиболее неблагоприятна обстановка в Астраханской, Волгоградской и Ростовской областях. На их долю приходится подавляющее большинство случаев заболеваний ЛЗН (рис. 8).

В 1997-1998 гг. единичные случаи регистрировались только в Астраханской области, в 1999г. в Астраханской и Волгоградской областях, со следующего года к ним прибавилась Ростовская. С 2006г. единичные случаи стали регистрироваться в Ульяновской области. В 2010г. случаи заболевания были уже в 9 субъектах Российской Федерации, в 2011г. − в 10. В 2012г. количество субъектов РФ, где регистрировалась заболеваемость ЛЗН, достигло 21. К ним относятся Волгоградская, Ростовская, Воронежская, Астраханская, Липецкая, Самарская, Саратовская, Белгородская, Ульяновская области, Краснодарский и Ставропольский края, Республики Татарстан, Калмыкия, Адыгея. По 1 случаю отмечено в Пермском крае, Новосибирской, Омской, Московской, Курской областях и Республике Мордовия, а также в Москве. Возможно, что это завоз из эндемичных местностей (Лихорадка Западного Нила в мире, 2013).

Анализ динамики заболеваемости (рис. 7, 8) − низкий уровень в течение ряда лет, резкий подъем в отдельные годы и столь же резкий спад − позволяет сделать предположение, что трансмиссивный путь передачи вируса от человека к человеку малоэффективен. Человек, видимо, является тупиковой ветвью в циркуляции «птица − комар − птица». В пользу этого говорит и сравнительно небольшое число больных в годы вспышек − порядка полутысячи человек. При высокоэффективной же передаче возбудителя комарами от человека к человеку в эпидемический процесс за короткий срок вовлекается большое число больных и локальная вспышка перерастает в широкомасштабную эпидемию, охватывающую многие тысячи, а то и сотни тысяч человек. Так было в Бразилии, когда в результате завоза в 1930 годы высокоэффективного африканского переносчика *Anopheles gambia* и его укоренения возникла самая крупная в истории страны эпидемия тропической малярии (Elton, 1958). Те же черты присущи эпидемиям желтой лихорадки в Судане в 1940-х гг. и Эфиопии в 1959-1962 гг. (Львов и др., 1989).

Причину вспышек, видимо, следует искать не столько в повышении температуры в отдельные годы (что, конечно,

способствует повышению интенсивности циркуляции вируса в природных очагах), сколько в эпизоотиях среди птиц в местах зимовок, высокоэндемичных в отношении ЛЗН. Возвращаясь к местам гнездования, птицы массово заносят вирус на территорию России, что и вызывает резкий подъем заболеваемости.

Меры специфической профилактики при ЛЗН отсутствуют, поэтому мерой профилактики является уничтожение комаров, особенно в городах. Большое значение в этом имеет осушение затопленных подвалов, обеспечивающих круглогодичное размножение *Culex pipiens molestus* в населенных пунктах.

Климатический риск, как и при многих других трансмиссивных заболеваниях − расширение ареалов переносчиков, а также общее потепление, вовлекающее в циркуляцию вируса все новые субъекты РФ.

Дополнительным фактором риска является ситуация по ЛЗН в США, где ЛЗН регистрируется с 1999г. Там только за сентябрь и октябрь 2012г. заболело более 5 тыс. человек в 48 штатах, из них 229 погибли (Лихорадка Западного Нила в мире, 2013). Возможная причина этого в том, что североамериканские переносчики более эффективны, чем европейские (Сергиев, 2011). Возможно также, что в США был завезен и стал циркулировать более вирулентный по отношению к человеку штамм возбудителя. В любом случае, завоз американских переносчиков и вируса в Европу может коренным образом изменить эпидемическую ситуацию по ЛЗН, как в Западной Европе, так и в России (Сергиев, 2011). Заметим, что в 2012г. в странах Евросоюза и сопредельных государствах было зарегистрировано 411 случаев заболевания, то есть почти столько же, что и в России (Лихорадка Западного Нила в мире, 2013).

Малярия была и остается одним из самых распространенных заболеваний в мире. Так, в 2000г. в мире зарегистрировано 233 млн. случаев малярии (985 тыс. случаев смерти), в 2009 − 225 млн. и 781 тыс. соответственно, большая часть из которых приходится на Африку (в отношении смертельных исходов 91%) (Кондрашин и др., 2011). Кроме того, опасения внушают часто регистрируемые в последнее десятилетие в странах Восточной Азии и Океании случаи заболевания человека малярией приматов *Plasmodium knowlesi*. Морфологически этот вид сходен с возбудителем четырехдневной малярии человека (*P. malaria*), а по клиническому течению болезни –

с тропической малярией (*P. falciparum*), что представляет большую опасность, так как этот вид возбудителя обуславливает более 90% летальных исходов при малярии (Баранова, 2011). Обзору ситуации по малярии на территории России и сопредельных стран посвящена статья одного из авторов (Ясюкевич, 2002). Здесь приведем лишь ключевые моменты. В Российской Империи и СССР малярия была общенациональной проблемой. Основным видом возбудителя был *P.vivax* (трехдневная малярия), но в меньших масштабах существовала тропическая и четырехдневная малярия. С 1884 по 1914 гг. ежегодно регистрировалось от 3 до 3,6 млн. больных (Лейзерман, 1943). В СССР заболеваемость росла, достигнув пика в 1934 − 1935 гг. (9 477 007 и 9 023 909 случаев). По РСФСР, соответственно, 5 319 018 и 5 371 743 случая. В дальнейшем в результате широкомасштабной программы по борьбе с малярией появилась устойчивая тенденция к снижению заболеваемости. В 1940г. в РСФСР было зарегистрировано только 1 912 386 больных. В начале 1960-х гг. было объявлено, что малярия как эпидемическое заболевание в СССР ликвидирована, сохранились лишь остаточные очаги малярии в Азербайджане и Таджикистане (Васильев, 2000, 2001). К сожалению, при этом была упразднена и сеть противомалярийных станций, созданная в 1920-х гг.

В современной Российской Федерации ситуация по малярии может считаться достаточно благоприятной. Динамика заболеваемости малярией представлена на рис. 9.

Максимальное количество больных было зарегистрировано в 1998г. − 1107, из них 65 случаев местной передачи (5,9%). В дальнейшем масштабы завоза стали снижаться, но возникла тенденция к увеличению местных случаев малярии.

В 2001г. было выявлено 898 случаев, из них 134 в результате местной передачи (14,9%), в 2002г. 644 и 139 соответственно (21,6%). В 2003г. положение улучшилось: из 533 зарегистрированных случаев местных было 73 (13,7%).

В последующие 2 года при снижении общего числа больных (382 и 212 соответственно) доля местных случаев (68 и 40 больных) снова начала возрастать и составила 17,8 и 18,9%. В 2006 и 2007 гг. доля местных существенно снизилась и составила 6,7 и 8,6%

соответственно. В последние годы (2011 − 2012) было 86 и 87 больных (0 и 1 случай местной передачи).

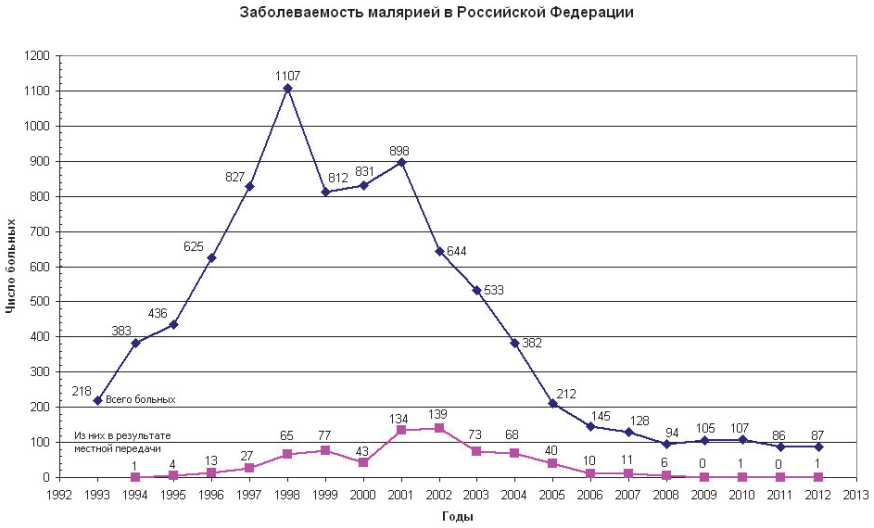

Рис. 9. *Динамика заболеваемости малярией в Российской Федерации (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998-2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012).*

В ближайшем окружении России оставались очаги малярии, которые дали о себе знать после развала Советского Союза. Так, в Азербайджане в 1996г. было зарегистрировано 13 135 больных, а в Таджикистане в 1997г. 29 794 официально зарегистрированных (по неофициальным оценкам экспертов ВОЗ, работавших в стране − на порядок больше) (Ясюкевич, 2002). И завоз малярии из этих стран в Россию во второй половине 1990 и начале 2000 гг. существенно преобладал над завозом из стран дальнего зарубежья (Лобзин, Козлов, 2004).

Наибольшее число больных малярией (как завозные, так и ранее − местные случаи) выявляется в Москве и Московской области (О санитарно-эпидемиологической обстановке…, 1998−2011; О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения…, 2012). Но это связано не с особо благоприятной климатической обстановкой для распространения малярии, сложившейся в Московском регионе, как полагают некоторые

авторы (Миронова, 2006; Ревич, Малеев, 2011). Даже с учетом того, что Москва, как и другие мегаполисы мира, является «островом тепла» по отношению к окружающей местности (Mogi, 1996; Todhunter, 1996; Hansen et al., 2010), такие же более благоприятные условия создались и в других городах средней полосы России, где повышенной заболеваемости не наблюдается. Причина этого − экономическая. Москва − деловой и культурный центр России. Трудовые мигранты из эндемичных по малярии стран, среди которых встречаются и больные, прибывают в столицу и стремятся, прежде всего, обосноваться в Московском регионе. Многие люди из развивающихся стран хотят получить образование в московских учебных заведениях, а это тоже возможный источник завоза малярии (Баранова, 2010).

Современное благополучие в отношении малярии обусловлено рядом причин. Стабилизировалась ситуация в Республиках Азербайджан и Таджикистан, где были полномасштабные эпидемии, и в Республиках Киргизия и Узбекистан, где наблюдались локальные вспышки. В результате этого завоз малярии резко сократился. Сейчас первое место как источник завозных случаев занимает Индия (студенты и бизнесмены). В процессе ликвидации малярии в СССР были уничтожены фенотипы возбудителя, адаптированные к условиям средней полосы и местным видам переносчиков. Сейчас не существует единой популяции возбудителя, в которой возможны процессы отбора и адаптации вследствие эпизодических завозов различных фенотипов из многих стран и отсутствия непрерывной циркуляции возбудителя. Совершенствуется миграционная политика: нелегальных мигрантов стало меньше, а легальным разрешения выдаются с тем расчетом, чтобы потенциальный больной не попал на территорию России в сезон передачи малярии. Повысилась санитарная культура населения и настороженность медицинских работников, что обеспечило своевременное выявление и лечение больных, поэтому вторичные от завозных и местные случаи единичны (Баранова, 2010).

Одной из черт малярии как нозологической единицы является ее способность быстро возвращаться на исходные позиции при ослаблении контроля. Примером служат эпидемии малярии в Азербайджане и Таджикистане, локальные вспышки в Узбекистане и Киргизии, последовавшие после распада СССР и связанных с этим событий, эпидемии в Турции (в конце 1970 гг. на Чукуровской

равнине, в 1990 гг. в юго-восточных и южных районах Анатолии), периодические возникающие локальные вспышки в странах Южной Европы (Ясюкевич, 2002; Лысенко и др., 2003; Кондрашин и др., 2011).

Таким образом, несмотря на невысокий уровень заболеваемости, предпосылки возобновления широкомасштабной передачи малярии, в первую очередь, трехдневной, в России остаются. К ним относятся сохраняющийся завоз малярии и большое число обитающих видов переносчиков.

На территории бывшего СССР известны следующие виды переносчиков малярии: *Anopheles maculipennis, An. melanoon, An. beklemishevi, An. messeae, An. atroparvus, An. sacharovi, An. martinius, (*виды комплекса *An. maculipennis), An. hyrcanus, An. sinensis, An. claviger, An. plumbeus, An. algeriensis, An. barianensis, An. lindesayi, An. marteri, An. superpictus, An. pulcherrimus, An. multicolor*. В России превалируют виды комплекса *An. maculipennis*. Кроме того, в ряде публикаций сообщается о нахождении на территории СНГ и других видов комплекса *An. maculipennis: An. persiensis, An. daciae, An. lewisi, An. artemievi* (Беклемишев, 1970; Гордеев и др., 2005, 2006, 2010; Лопатин и др., 2006; Djadid et al., 2007). Многие из этих видов являются весьма эффективными переносчиками малярии.

Изменения климата, произошедшие в XX – начале XXI веков на территории стран СНГ и Балтии, не могли не сказаться на ареалах переносчиков и условиях развития возбудителя в их организме. Последствия этих изменений в отношении малярийных комаров были оценены расчетным методом с использованием прикладных климатических индексов выявленных В.Н. Беклемишевым и его сотрудниками (Беклемишев, 1970), определяющих условия существования переносчиков малярии в зависимости от температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы и суммы осадков (Ясюкевич и др., 2012). Оценке изменения потенциального ареала возбудителей малярии посвящена наша более ранняя работа (Ясюкевич, Гельвер, 2007).

В этой работе показано, что изменение температуры воздуха в приповерхностном слое, произошедшее в период 1966-1995 гг. по сравнению с 1936-1965 гг., привело к изменениям границ потенциальных ареалов возбудителей малярии территории бывшего СССР. Для *P. vivax* северная граница ареала сместилась к северу в

секторе 90 − 100º в.д. В остальной части ареала положение границы не изменилось или же ареал сузился. Для *P. falciparum* северная граница ареала сместилась к северу в секторе 70 − 90º в.д. и к востоку от 135º в.д. В целом пространственный масштаб изменений потенциальных ареалов этих возбудителей малярии в конце XX века можно оценить как субрегиональный. Смещение границ ареала каждого из двух исследованных видов возбудителей малярии разнонаправлено и составило 100 − 200 км.

Модельный расчет, выполненный в соответствии с инерционным сценарием, показывает, что в первой четверти XXI века повсеместного движения северных границ ареалов на север не ожидается. При этом расчетное для 1996-2025 гг. расширение ареалов возбудителей трехдневной и тропической малярии на территории России невелико и в целом уступает по масштабам ожидаемому в других частях ареала сокращению. Расширение ареалов происходит субрегионально в Азиатской части России, где плотность населения по большей части невелика, а сокращение, наоборот, ожидается, в том числе, и в густонаселенной Европейской части России.

В настоящей работе такую оценку мы не приводим, так как завоз малярии невелик, местные случаи в настоящее время единичны и наибольшую потенциальную угрозу представляет расширение ареалов переносчиков.

На рис. 10 показан климатобусловленный ареал комаров комплекса видов *An. maculipennis*. Модельный ареал достаточно точно отображает северную границу распространения *An. beklemishevi* и *An. messeae* (Маркович и др., 2001), за исключением восточной части. Реально распространение на восток *An. messeae* ограничивается междуречьем рек Зеи и Буреи (около 125° в.д.), это наиболее далеко заходящий на восток вид комплекса, а *An. beklemishevi* доходит примерно до 90° в.д. (Маркович и др., 2001). Для объяснения этого факта В.Н. Беклемишевым было выдвинуто 2 гипотезы. Первая заключается в том, что в нетронутой тайге для комаров *An. maculipennis* s.l. отсутствуют подходящие по температурному режиму водоемы, и они следуют за человеком, осваивающим тайгу. Однако, сравнение данных 1920 и 1930 гг. (Беклемишев, 1970), а также современных (Маркович и др., 2001), не

показывает распространения *An. maculipennis* s. l. далее на восток, хотя этот регион интенсивно осваивался за эти годы.

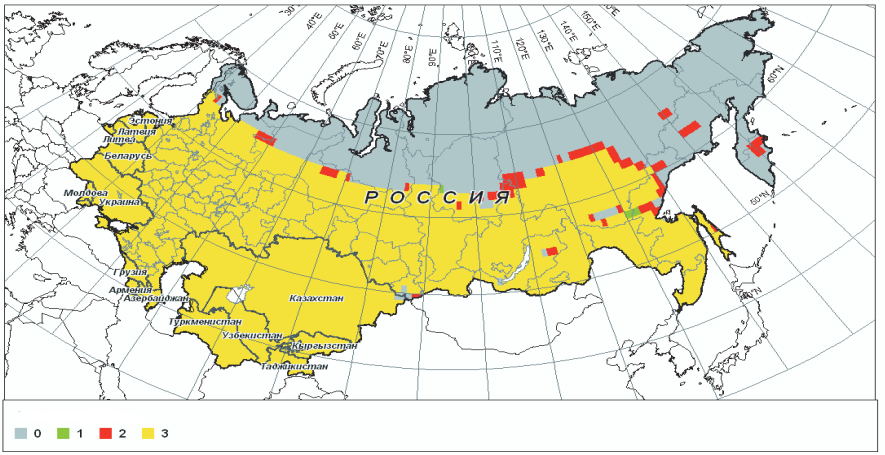

Рис. 10. *Изменения климатообусловленного модельного ареала комаров комплекса видов An. maculipennis за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1936-1965 гг. Обозначения: 0 − точка в ареал не входит; 1 − сокращение ареала; 2 − расширение ареала; 3 − в сравниваемые периоды изменения не произошло (Ясюкевич и др., 2012, 2013)*

Вторая заключается в том, что распространенный на Дальнем Востоке *An. sinensis* имеет решающее преимущество в конкурентной борьбе с *An. messeae* и препятствует расширению его ареала. Это представляется нам более правдоподобным. В отношении северной границы наш анализ показывает некоторое расширение ареала в северном направлении, особенно заметное на территории Восточной Сибири. Сокращение ареала незначительно.

На рис. 11 представлен групповой модельный ареал экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии и периодически питающихся кровью. К ним относятся *An. superpictus* (Средняя Азия, Закавказье, Дагестан), *An. sacharovi* (равнины Закавказья и Дагестана) и *An. atroparvus* (Закавказье, Северный Кавказ, и далее к западу от Каспия). Эти виды высоко восприимчивы к возбудителю трехдневной малярии *Plasmodium vivax* и являются более эффективными переносчиками, чем *An. beklemishevi* и *An. messeae*. На рисунке видно, что граница потенциального ареала

существенно сдвинулась к востоку и к северу. По последним данным, *An. sacharovi* обнаружен в Калмыкии (окрестности Элисты), где ранее этот вид не отмечался, причем плотность личинок IV стадии в водоеме была весьма высокой, до 25 особей/м^2 (Перевозкин и др., 2012). Это подтверждает правильность нашего расчета.

Рис. 11. *Изменения климатообусловленного модельного ареала экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии, за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1936-1965 гг. Обозначения как на рис. 10 (Ясюкевич и др., 2012, 2013). Позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

На рис. 12 представлен потенциальный ареал *An. pulcherrimus*. В Российской Федерации этот вид не встречается, но широко распространен в независимых государствах Средней Азии. Модельный анализ показал существенное увеличение площади его ареала.

Расширение ареала *An. superpictus* и *An. pulcherrimus* в Средней Азии является фактором риска возобновления малярии в государствах этого региона. В республике Таджикистан в 1970 – 1980 гг. эти виды были уничтожены почти полностью, сейчас же их численность восстановилась к уровню, когда широкомасштабная

борьба с ними не проводилась. Более того, установлено, что *An. superpictus*, считавшийся ранее горно-ручьевым комаром, сейчас активно заселяет равнинные водоемы с более высокой эвтрофикацией. Это может осложнить маляриологическую обстановку в этом регионе и привести к увеличению масштаба завоза малярии на территорию России (Кадамов, 2010).

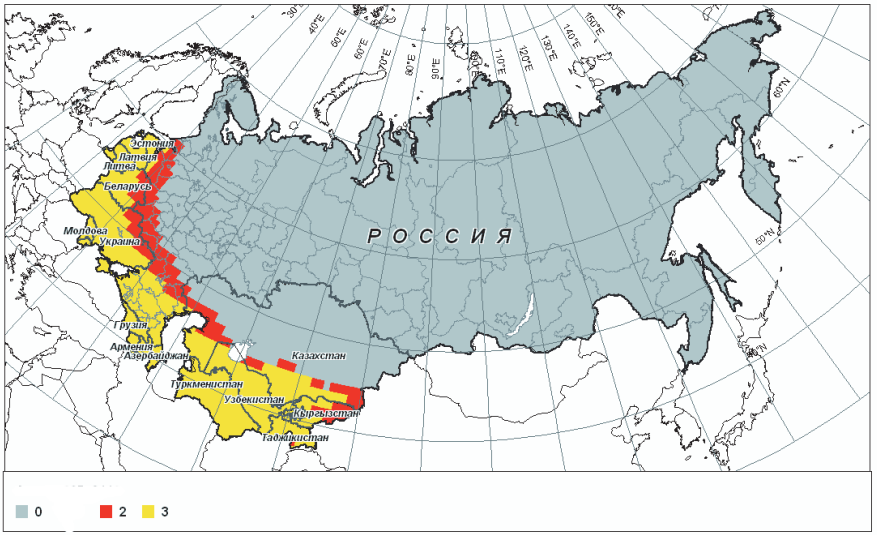

Рис. 12. *Изменения климатообусловленного модельного ареала An. pulcherrimus, за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1936-1965 гг. Обозначения как на рис. 10 (Ясюкевич и др., 2012, 2013). Позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Таким образом, климатические изменения за период 1981 − 2010 гг. по сравнению с периодом 1936 − 1965 гг. создали предпосылки для расширения климатообусловленных ареалов исследованных видов переносчиков малярии в восточном и северном направлениях, что может привести к обнаружению некоторых из них в местностях, где они ранее не встречались. Сокращения ареалов модельный расчет не выявил. Это делает мониторинг видового состава и численности переносчиков по-прежнему актуальным (Ясюкевич и др., 2012, 2013)

Средствами противодействия возобновлению передачи малярии на территории России являются меры по сокращению ее завоза, своевременное выявление и изоляция больных, мониторинг численности и видового состава переносчиков − комаров рода *Anopheles* и борьба с ними.

Климатическим риском является расширение ареалов переносчиков и возбудителей малярии. Необходимо отметить, что выявленное расширение ареалов *An. atroparvus, An. sacharovi, An. superpictus* и *An. pulcherrimus* представляет собой более существенную угрозу, чем *An. beklemishevi* и *An. messeae*, поскольку последние виды являются менее эффективными переносчиками, чем перечисленные в первой группе.

Представленные в научной литературе ***перспективные оценки*** изменения характера распространения инфекционных заболеваний в XXI веке вследствие ожидаемых изменений климата, обычно имеют качественных характер.

Дальнейшее смещение границ ареалов иксодовых клещей, как это происходит в настоящее время (Ясюкевич и др., 2009; рис. 4, 5), к северо-востоку будет способствовать повышению заболеваемости клещевым энцефалитом, боррелиозами и риккетсиозами. В то же время вследствие повышения аридности в южных регионах России южная граница распространения *Ixodes ricinus* и *I. persulcatus* может сдвинуться к северу (Алексеев, 2004, 2006). Для большинства членистоногих переносчиков болезней человека предполагается расширение периода активности, то есть более ранний выход из зимовки весной и уход в диапаузу осенью. (Алексеев, 2004, 2006).

Улучшение вследствие потепления условий обитания местных видов комаров, являющихся переносчиками арбовирусов, будет способствовать формированию новых природных очагов комариных лихорадок и энцефалитов (Алексеев, 2004, 2006). Так, считается вероятным возникновение природных очагов и проявление клинических случаев лихорадки Западного Нила в Саратовской, Самарской, Оренбургской, Воронежской, Курской, Белгородской, Омской и Новосибирской областях, Алтайском крае (Платонов, 2006; Платонов и др., 2004; Платонова и др., 2006; Platonov et al., 2008).

Согласно оценкам МГЭИК, в Северном Полушарии потенциальный ареал малярии в XXI веке при потеплении климата расширится, в основном, к северу. На территориях, где малярия человека эндемична, увеличится длительность сезона передачи.

Значительно увеличится число людей, проживающих в зонах с большим риском заражения малярией. Если сейчас на территориях, где потенциально существует возможность заражения малярией, проживает 2400 млн. человек, что составляет около 40% населения Земного шара, то к 2080г. это число увеличится, по различным оценкам, еще на 220 − 400 млн. человек. Новые риски, как и во многих других случаях, коснутся в первую очередь стран с низким уровнем жизни (Хайнес и др., 2004; Martens et al., 1999; Lieshout et al., 2004; Climate Change 2007, 2007).

Северные границы ареалов малярийных комаров сдвинутся к северу, как это уже происходит, возможно замещение северных популяций южными. На Европейской территории России вследствие уменьшения континентальности климата возможно дальнейшее расширение ареалов *An. atroparvus, An. maculipennis* и *An. superpictus*, которые являются более эффективными переносчиками малярии, чем *An. beklemishevi* и *An. messeae.* При активизации завоза возбудителя это может существенно осложнить эпидемиологическую ситуацию по малярии (Сергиев и др., 2004; Ясюкевич и др., 2012, 2013).

В последние годы была выявлена ***новая биологическая угроза*** для России − на Черноморском побережье Кавказа были обнаружены желтолихорадочный комар *Aedes aegypti* и азиатский тигровый комар *Ae. albopictus.* Эти виды являются переносчиками большого числа арбовирусных инфекций, в том числе таких опасных, как желтая лихорадка, лихорадки денге, Чикунгунья, эпидемии которых охватывали десятки и сотни тысяч человек и сопровождались большой летальностью. Первый является синантропным видом, второй − полусинантропным, что увеличивает их опасность как переносчиков циркулирующих среди людей заболеваний. *Ae. albopictus* является полуэндофильным видом, в отличие от эндофильного *Ae. aegypti,* поэтому обработки помещений стойкими контактными инсектицидами против него менее эффективны (Ганушкина, Дремова, 2011, 2012).

Ae. aegypti, не встречавшийся на территории СССР более 50 лет, был выявлен в 2001г. в городе Сочи (Рябова и др., 2005). Дальнейшими исследованиями было подтверждено наличие его устойчивой популяции в Сочи и дальнейшее распространение по территории России − городах Туапсе, Адлер, Сухуми, Гаудаута. (Юничева и др., 2008). Впервые же в России он был найден в 1911г. в

Батуми, затем в Туапсе и Закавказье − городах Кутаиси, Тбилиси, Баку и прилегающих местностях. Численность его быстро возросла, что создало предпосылки при появлении источника инфекции широкомасштабных эпидемий. В результате предпринятых истребительных мероприятий в 1930 − 1940 гг. ее удалось резко снизить, а с начала 1950 гг. этот переносчик уже не регистрировался в СССР.

Первичным его местообитанием считается Западная Африка. С развитием мореплавания в течение нескольких веков он был развезен по всем тропическим широтам. Пик его распространения пришелся на 1930 годы (рис. 13).

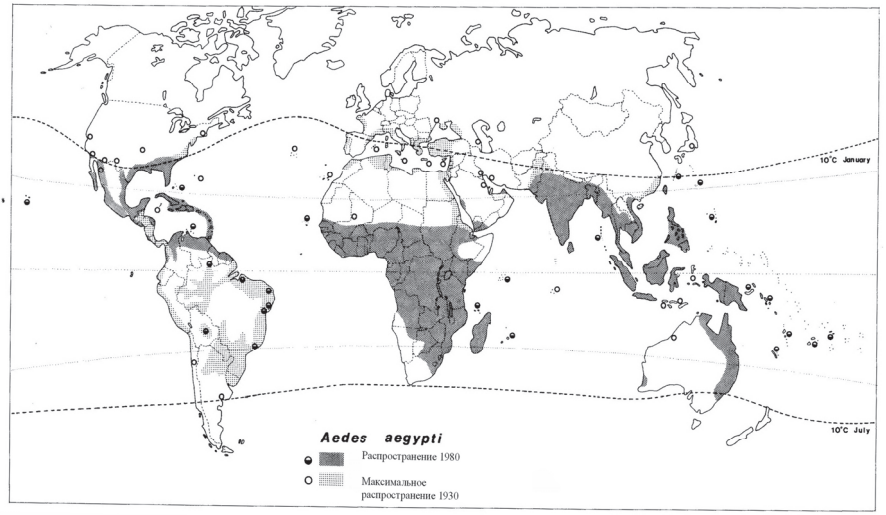

Рис. 13. *Глобальное распространение Ae. aegypti (Geographical distribution…, 1989).*

В 2011г. там же (Район Большого Сочи, пос. Хоста) был выявлен другой опасный переносчик – *Ae. albopictus* (Ганушкина и др., 2012). Первичный его ареал тропики Юго-Восточной Азии и острова Океании. Развитие транспорта и торговли способствовали его широкому распространению по странам и континентам, которое отмечается со второй половины XX века (Knudsen, 1995; Tatem et al., 2006) (рис. 14).

Ведущую роль в этом процессе сыграла торговля подержанными автопокрышками (Маркович, 1997), которые для вторичной

переработки могут перевозиться за многие тысячи километров. Они как нельзя лучше подходят для выплода комаров и откладки яиц, так как в большинстве случаев хранятся под открытым небом, заливаются водой.

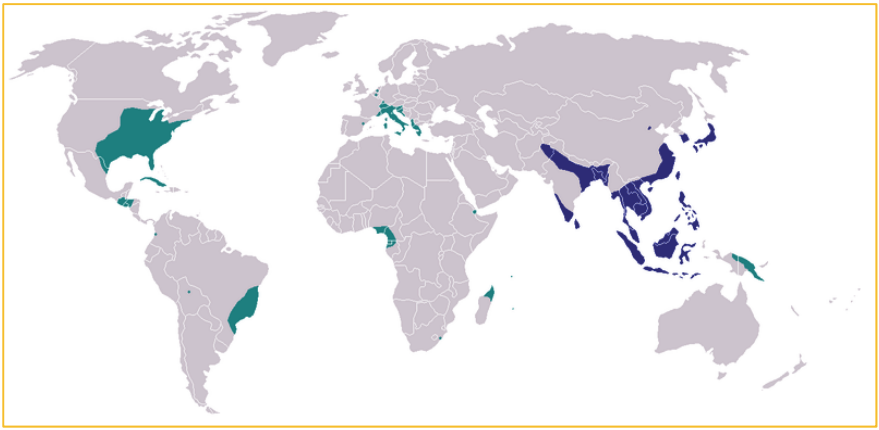

Рис. 14. *Глобальное распространение Ae. albopictus. Синим цветом показан первичный ареал, зеленым вторичный (состояние на 2007г.)* (http://en.wikipedia.org/wiki/Aedes_albopictus).

Как известно, яйца комаров рода *Aedes* после завершения эмбриогенеза способны длительное время сохранять жизнеспособность в сухом виде, а при попадании их в воду происходит выход личинок и их дальнейшее развитие. В Европе *Ae. albopictus* стал отмечаться с начала 1990 гг. и к настоящему времени распространился во многих странах Южной Европы (Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes…, 2012).

Появление этих двух видов на Черноморском побережье Кавказа сделало актуальной оценку возможности потенциального их распространения на территории России, тем более, что в настоящее время их расселение продолжается (Ганушкина и др., 2013).

Яйца *Ae. aegypti* не переносят низких температур, поэтому фактором, лимитирующим распространение этого вида, является среднемесячная температура января 0°С. Яйца *Ae. albopictus* зимуют, в отличие от *Ae. aegypti,* в состоянии диапаузы и переносят легкое промораживание. Пределом их распространения считается

среднемесячная температура января −1°С…−3°С. Некоторый разброс связан, скорее всего, с популяционными различиями.

Так, в Японии популяции этого вида стабильно существуют при −2°С, в Южной Корее при −3°С. Другим ограничивающим климатическим фактором является среднегодовая сумма осадков не менее 450 мм (Ганушкина, Дремова, 2011; Kobayashi et al., 2002, 2008; Neteler et al., 2011; Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes…, 2012). Эти предикторы мы использовали для оценки возможного распространения этих видов на территории России, стран СНГ и Балтии при климатических условиях последнего десятилетия – 2000 − 2010 гг. (рис. 15).

Рис. 15. *Пределы возможного распространения Aedes aegypti и Ae. albopictus на территории России, стран СНГ и Балтии при климатических условиях периода 2000-2010 гг.*

Как следует из этого рисунка, укоренение *Ae.aegypti* возможно на Черноморском побережье Кавказа до широты Краснодара, а также на всей территории Крыма (Украина).

В силу особенностей биологии, *Aedes albopictus* способен распространиться существенно далее в глубь территории России, чем *Aedes aegypti*. Если принять за границу распространения январскую изотерму −1°С, то на Черноморском побережье Кавказа он продвинется несколько севернее, чем *Aedes aegypti,* заселит также Крым. Пригодными окажутся также небольшие участки Каспийского

побережья Дагестана. За пределами России возможна акклиматизация *Aedes albopictus* на крайнем юге Молдавии и Черноморском побережье Украины до Одессы, а также Прикаспийской части Азербайджана и восточном побережье Каспия южнее залива Кара-Богаз-Гол (Туркменистан).

Если предположить, что были завезены комары из наиболее холодостойкой популяции (оценка по январской изотерме −3°С), то в потенциальную область его распространения войдет Северный Кавказ, Краснодарский и Ставропольский края, Калининградская область и прилегающие районы Литвы, Закавказье (кроме высокогорных районов), южные области Украины, почти вся территория Молдавии, обширные участки восточного побережья Каспия к югу и северу от залива Кара-Богаз-Гол (Туркменистан). Возможно также его укоренение в Киргизии (рис. 15).

При массовом распространении этих видов комаров по территории России они представляют существенную угрозу здоровью населения. Особенно опасны они как переносчики лихорадки денге. Средства специфической профилактики лихорадки денге не разработаны. Эта инфекция широко распространена в мире, она регистрируется в 125 странах. Заболеваемость за последние 50 лет выросла в 30 раз. Эпидемические вспышки лихорадки денге уже только в начале 2013 года зарегистрированы в Венесуэле, Бразилии, Мексике, Перу, Парагвае, Никарагуа, Колумбии, Таиланде, Вьетнаме, Шри-Ланке, Малайзии, Каймановых островах. Завозные случаи регулярно отмечаются в России. Так, в 2012г. было 37 случаев, а только в январе 2013г. − 29, связанных с пребыванием в Таиланде. Однако ни одного случая не зарегистрировано на Черноморском побережье Кавказа (Об эпидситуации по заболеваемости лихорадкой денге, 2013).

Заболеваемость желтой лихорадкой существенно ниже, что объясняется наличием высокоэффективной вакцины. Ряд стран, со списком которых можно ознакомиться на сайте Роспотребнадзора (http://rospotrebnadzor.ru), не допускает на свою территорию приезжающих без сертификата о прививке, что препятствует распространению инфекции.

Таким образом, мерами профилактики при этой новой угрозе являются мониторинг численности и распространения переносчиков, борьба с ними, меры индивидуальной защиты от нападения комаров. При выявлении случаев заболевания, даже завозных, вакцинация

населения. К сожалению, последнее действенно только при желтой лихорадке. Климатические риски − дальнейшее расселение этих переносчиков из мест локального обнаружения по территории России и нарастание их численности, а также расширение их климатобусловленного ареала при предполагаемом изменении климата.

Заключение

Мы проанализировали ситуацию по ряду климатозависимых заболеваний различной этиологии, наиболее характерных для территории России, в основном, трансмиссивных, а также оценили возможное влияние изменения климата на переносчиков возбудителей путем математического моделирования с использованием климатических предикторов.

Среди нетрансмиссивных природно-очаговых зоонозов наиболее распространена геморрагическая лихорадка с почечным синдромом. Это заболевание вирусной этиологии. В качестве климатозависимых болезней бактериальной этиологии мы рассмотрели лептоспироз и туляремию. Лептоспироз передается только нетрансмиссивно, туляремии, кроме ряда нетрансмиссивных путей, свойственен и факультативно-трансмиссивный путь, когда членистоногие, в первую очередь, кровососущие двукрылые, выступают в качестве механических переносчиков. В последние годы заболеваемость имеет тенденцию к снижению, но распределение ее неравномерно. По геморрагической лихорадке с почечным синдромом наиболее неблагополучная обстановка сохраняется в субъектах Приволжского федерального округа (Удмуртской Республике, Республиках Башкортостан, Марий Эл, Татарстан). Заболеваемость там превышает среднюю во много раз.

Среди трансмиссивных природно-очаговых заболеваний различной этиологии, переносчиками которых являются иксодовые клещи, мы рассмотрели клещевой энцефалит, иксодовые клещевые боррелиозы (болезнь Лайма), клещевой сыпной тиф (клещевой риккетсиоз) Северной Азии, крымскую геморрагическую лихорадку. Первые три заболевания являются преобладающими на территории России, причем распределение их неравномерно. На Европейской территории России и Уральском Федеральном округе преобладает болезнь Лайма, заболеваемость клещевым энцефалитом в 2 − 3 раза меньше (кроме Южного и Северо-Кавказского Федеральных округов, где отмечается исключительно болезнь Лайма), клещевой риккетсиоз

не регистрируется. Заболеваемость клещевым энцефалитом в целом по России в последнее десятилетие снижается, а болезнью Лайма − растет. На территориях Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов, наоборот, из всех трех нозологических форм преобладает клещевой риккетсиоз (Рудаков и др., www.oniipi.org). Крымская геморрагическая лихорадка регистрируется эпизодически в Южном и Северо-Кавказском Федеральных округах.

Из природно-очаговых заболеваний, переносчиками которых являются комары, наибольшее значение имеет лихорадка Западного Нила. Заболеваемость ЛЗН низка, но периодически возникают локальные вспышки. Наиболее неблагоприятна обстановка в Астраханской, Волгоградской и Ростовской областях. На их долю приходится подавляющее большинство случаев заболевания.

Классическим примером паразитарного антропоноза является малярия. Эпидемиологическая ситуация в настоящее время может считаться благоприятной: число завозных случаев невелико, порядка сотни в год, а местных − единично. Однако малярия является и классическим примером заболевания, способного быстро восстанавливать свои позиции при ослаблении контроля.

Таким образом, в последние полтора десятилетия уровень заболеваемости по рассмотренным климатозависимым заболеваниям, кроме болезни Лайма и лихорадки Западного Нила, имеет тенденцию к снижению.

Модельный анализ изменения распространения иксодовых клещей − переносчиков клещевого энцефалита и малярийных комаров показал, что их ареалы под влиянием наблюдаемых изменений климата существенно расширяются в северном и восточном направлении, а сокращение незначительно.

Предпосылки к увеличению заболеваемости этими инфекциями и более широкому их распространению сохраняются. В первую очередь, они связаны с изменениями климата, как наблюдаемыми ныне, так и предполагаемыми.

К факторам климатического риска относятся расширение ареалов членистоногих переносчиков и повышение их численности, а также аналогичное повышение численности и расширение ареалов позвоночных, преимущественно мышевидных грызунов, являющихся резервуарами природно-очаговых инфекций и прокормителями переносчиков в природе. Новым фактором риска является завоз экзотических переносчиков на территорию России и

их укоренение, значение которых усиливается при предполагаемом потеплении.

Мерами противодействия (мерами адаптации) климатозависимым инфекциям являются специфическая профилактика (вакцинация), усиление мониторинга за видовым составом и численностью переносчиков и резервуаров инфекций, увеличение масштабов и результативности борьбы с ними. К ним же относятся средства индивидуальной защиты от нападения переносчиков, усиление эффективности которых должно основываться не только на собственно совершенствовании этих средств, но и на повышении санитарно-эпидемиологической культуры населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Н. 2004. Возможные последствия вероятного глобального потепления климата для распространения кровососущих эктопаразитов и передаваемых ими патогенов. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 67-79.
2. Алексеев А.Н. 2006. Влияние глобального изменения климата на кровососущих эктопаразитов и передаваемых ими возбудителей болезней. Вестник РАМН. № 3. С. 21-25.
3. Арумова Е.А., Воронцова Т.В. 2000. Клещевой боррелиоз (болезнь Лайма) в России. Дезинфекционное дело. № 2. С. 5-7.
4. Баранова А.М. 2010. Почему не укоренилась малярия в современной России? Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 2. С. 22-24.
5. Баранова А.М. 2011. *Plasmodium knowlesi*: распространенный и опасный для человека вид возбудителей малярии из Юго-Восточной Азии и островов Тихого океана. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 8-10.
6. Беклемишев В.Н. Биоценологические основы сравнительной паразитологии. – М.: Наука. 1970. 502 С.
7. Бернштейн А.Д., Апекина Н.С., Коротков Ю.С., Демина В.Т., Хворенков А.В. 2004. Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом: экологические предпосылки активизации европейских лесных очагов. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)./Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 105-113.
8. Буренкова Л.А. 2012. Итоги двадцатилетних наблюдений за динамикой численности популяций *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) и изменением ее зараженности возбудителями клещевых бореллиозов на севере Калужской области. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №4. С. 30-32.
9. Бутенко А.М., Ларичев В.Ф. 2004. Влияние климата на активность и распространение очагов крымской геморрагической лихорадки (кгл) в

северной части ареала вируса кгл. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 134-138.
10. Васильев Г.К. 2000. Исторический опыт борьбы с малярией. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 2. С. 54-56.
11. Васильев К.Г. 2001. История эпидемий и борьбы с ними в XX столетии. –М.: Медицина. 256 С.
12. Ганушкина Л.А., Дремова В.П. 2011. Комары *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus* – переносчики арбовирусных инфекций, биология, экология, распространение, отличительные признаки видов. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 4. С. 24-28.
13. Ганушкина Л.А., Дремова В.П. 2012. Комары *Aedes aegypti* L. и *Aedes albopictus* Skuse – новая биологическая угроза для юга России. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 49-55.
14. Ганушкина Л.А., Таныгина Е.Ю., Безжонова О.В., Сергиев В.П. 2012. Об обнаружении комаров *Aedes (Stegomyia) albopictus Skus.* на териитории Российской Федерации. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 3-4.
15. Ганушкина Л.А., Безжонова О.В., Патраман И.В., Таныгина Е.Ю., Сергиев В.П. 2013. Распространение комаров *Aedes (Stegomyia) aegypti* L. и *Aedes (Stegomyia) albopictus* Skus. на Черноморском побережье Кавказа. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 45-46.
16. Глушкова Л.И. Корабельников И.В. Егорова Ю.И. 2011. Распространение *Ixodes persulcatus* Schulze в южных и центральных районах Республики Коми. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №3. С. 48-50.
17. Гордеев М.И., Званцов А.Б., Горячева И.И. и др. 2005. Описание нового вида *Anopheles artemievi sp. n.* (Diptera, Culicidae). Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 2. С. 4-5.
18. Гордеев М.И., Званцов А.Б., Усенбаев Н.Т. 2006. Фауна комаров рода *Anopheles* (Diptera, Culicidae) Тянь-Шаня. Материалы I Всероссийского совещания по кровососущим насекомым, Санкт-Петербург, 24-27 октября 2006 г., –С.Пб. С. 59-61.
19. Гордеев М.И., Безжонова О.В., Горячева И.И. и др. 2010. Молекулярно-генентический анализ малярийных комаров комплекса *Anopheles maculipennis* (Diptera, Culicidae) Азербайджана. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №4. С. 43-45.
20. Зильбер Л.А. 1939. Весенний (весенне-летний) эпидемический клещевой энцефалит. Архив биол. наук. Т. 56. Вып. 2. С. 9-37.
21. Злобин В.И. 2010. Эпидемиологическая обстановка и проблемы профилактики клещевого энцефалита в Российской Федерации. Прикладная энтомология. №1 (1). С. 14-21.
22. Злобин В.И., Данчинова Г.А., Сунцова О.В., Бадуева Л.Б. 2004. Климат как один из факторов, влияющих на уровень заболеваемости клещевым энцефалитом. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 121-124.

23. Инфекционная заболеваемость в Российской Федерации в 2003 – 2004 гг. Информационный сборник статистических и аналитических материалов. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005.
24. Инфекционная заболеваемость в Российской Федерации в 2008 – 2009 гг. Информационный сборник статистических и аналитических материалов. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.
25. Кадамов Д.С. 2010. Кровососущие комары (Culicidae) Гиссарской долины Таджикистана. Автореф. На соиск. уч. ст. кандидата биол. наук. –М.: 27 С.
26. Кондрашин А.В., Баранова А.М., Морозова Л.Ф., Степанова Е.В. Тенденции в борьбе с малярией в мире. Прогресс и актуальные задачи в программах борьбы с малярией. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2011. №4. С. 3-8.
27. Коренберг Э.И. 2004. Экологические предпосылки возможного влияния изменений климата на природные очаги и их эпидемическое проявление. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 54-67.
28. Коренберг Э.И. 2008. Современные черты клещевого энцефалита: новые или хорошо забытые? Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №3. С. 3-8.
29. Коротков Ю.С., Кисленко Г.С., Буренкова Л.А., Рудникова Н.А., Карань –Л.: С. 2008. Пространственная и временная изменчивость зараженности клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* возбудителем болезни Лайма в Московской области. Паразитология. Т. 42, №6. С. 441-451.
30. Лейзерман Л.И. 1943. Малярия. Сталинабад. 174 С.
31. Лихорадка Западного Нила в мире. 2013. http://rospotrebnadzor.ru/epidemiologic_sytuation/...
32. Лобан К.М., Лобзин Ю.В., Лукин Е.П. 2002. Риккетсиозы человека (руководство для врачей). –С.-Пб.: Элби. 474 С.
33. Лобзин Ю.В., Козлов С.С. 2004. Изменения климата, как один из факторов, определяющих расширение спектра паразитарных болезней в вооруженных силах РФ. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». -С. 166-170.
34. Лопатин О.Е., Катохин А.В., Шевченко А.И. и др. 2006. Исследование видового состава представителей рода *Anopheles* в Западной Сибири, Казахстане и Узбекистане с помощью молекулярно-генетических маркеров.Материалы I Всероссийского совещания по кровососущим насекомым. Санкт-Петербург, 24-27 октября 2006 г. –С.Пб.: С. 112-113.
35. Лысенко А.Я., Кондрашин А.А., Ежов М.Н. 2003. Малариология. –М.: Открытые системы, 512 С.
36. Львов Д.К., Клименко С.М., Гайдамович С.Я., Березина Л.К. и др. 1989. Арбовирусы и арбовирусные инфекции. М. : Медицина. 336 С.
37. Лялина Л.В. 2004. Проблемы оценки влияния глобальных изменений климата на эпидемический процесс. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под

ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 80-84.
38. Манзенюк И.Н., Манзенюк О.Ю. 2005.Клещевые боррелиозы (болезнь Лайма). Кольцово. 85 С.
39. Маркович Н.Я. 1997. Мировая торговля старыми автопокрышками и современный ареал комаров *Aedes (Stegomya) albopictus.* Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 4. С. 54-59.
40. Маркович Н.Я., Артемьев М.М., Дарченкова Н.Н. 2001. Видовой состав и географическое распространение основных переносчиков малярии – комаров комплекса *An. maculipennis* в России. РЭТ-ИНФО. № 3. С. 5-9.
41. Миронова В.А. 2006. Тенденции изменения климата и малярия в Московском регионе. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 4. С. 20-25.
42. Нафеев А.А., Салина Г.В. 2012. Проблемы в организации эпидемиологического надзора за природно-очаговыми инфекциями и пути их решения. Медицинская паразитология и паразитарные болезни, 2012, №2. С. 27-30.
43. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 1998 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр госсанэпид-надзора Минздрава России, 1999. 222 С.
44. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2000 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2001. 188 С.
45. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2002 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. 221 С.
46. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2003 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 239 С.
47. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2004 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005. 269 С.
48. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2005 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 301 С.
49. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2006 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007. 360 С.
50. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2007 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 397 С.
51. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2008 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 467 С.
52. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2009 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 456 С.
53. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2010 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 431 С.

54. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2011 году: Государственный доклад. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 316 С.
55. Об эпидситуации по заболеваемости лихорадкой Денге. 2013. http://49.rospotrebnadzor.ru/rss_all//asset_publisher/Kq6J/content/id/150331
56. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Том I. Изменения климата. –М.: Росгидромет. 227 С.
57. Орехов И.В., Москвитина Э.А., Пичурина Н.Л., Забашта М.В., Водяницкая С.Ю., Адаменко В.И. 2008. Кровососущие комары, составляющие паразитарную систему при лихорадке Западного Нила в Ростовской области. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 30−32.
58. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Том II. Последствия изменений климата. –М.: Росгидромет. 288 С.
59. Перевозкин В.П., Бондарчук С.С., Гордеев М.И. 2012. Популяционно-видовая структура малярийных комаров (Diptera, Culicidae) Прикаспийской низменности и Кумо-Манычской впадины. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 12-17.
60. Платонов А.Е. 2006. Влияние погодных условий на эпидемиологию трансмиссивных инфекций (на примере лихорадки Западного Нила в России). Вестник РАМН. № 2. С. 25-29.
61. Платонов А.Е., Рудникова Н.А., Лазоренко В.В., Журавлев В.И. 2004. Влияние погодных условий на эпидемиологию лихорадки Западного Нила в южных регионах России. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. –М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 113-121.
62. Платонова Л.В., Михеев В.Н., Локтев В.Б., Кононова Ю.В., Шестопалов А.М., Дупал Т.А. 2006. О первых результатах эпидемиологического мониторинга лихорадки Западного Нила в Новосибирской области. Сибирь-Восток, № 3. С. 45-48.
63. Ревич Б.А., Малеев В.В. 2011. Изменение климата и здоровье населения России: анализ ситуации и прогнозные оценки. –М.: ЛЕНАНД. 208 С.
64. Рудаков Н.В., Шпынов С.Н., Самойленко И.Е., Л.В.Кумпан, Решетникова Т.А.,.Рудакова С.А. Омск: Омский НИИ природно-очаговых инфекций, Омская медицинская академия. www.oniipi.org.
65. Руководство по зоонозам. 1983. Под ред. В.И. Покровского. –Л.: Медицина. 320 С.
66. Рябова Т.Е., Юничева Ю.В., Маркович Н.Я., Ганушкина Л.А., Орабей Г.В., Сергиев В.П. 2005. Обнаружение комаров *Aedes (Stegomyia) aegypti* L. В г.Сочи. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №3. С. 3-5.
67. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. –М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.
68. Сергиев В.П. 2011. Появление экзотических переносчиков арбовирусных лихорадок − новая недостаточно оцениваемая биологическая угроза южным регионам России. Журнал инфектологии. Т. 3, № 1. С. 59-63.

69. Сергиев В.П., Баранова А.М., Маркович Н.Я., Супряга В.Г., Ганушкина Л.А. 2004. Возможное влияние изменения климата на распространение трансмиссивных болезней на территории России. В кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.)/Под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. – М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 143-147.
70. Тарасов В.В. 2002. Эпидемиология трансмиссивных болезней. –М.: Изд-во МГУ. 336 С.
71. Федорова М.В. 2007. Комары (Diptera, Culicidae) − переносчики вируса лихорадки Западного Нила на территории России. РЭТ-инфо. № 3. С. 11−15.
72. Хайнес А., Коватс Р.С., Кемпбелл-Лендрум Д., Корвалан К. 2004. Изменение климата и здоровье человека – воздействия, уязвимость и адаптация. Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003 г. Труды конференции. –М.: С. 307-322.
73. Юничева Ю.В., Рябова Т.Е., Маркович Н.Я., Безжонова О.В. И др. 2008. Первые данные о наличии размножающейся популяции комаров *Aedes aegypti* L. в районе Большого Сочи и в отдельных городах Абхазии. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 40-43.
74. Ясюкевич В.В. Малярия в России и ее ближайшем географическом окружении: анализ ситуации в связи с предполагаемым изменением климата. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2002. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат. Т. 18. С. 142-157.
75. Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2007. Последствия изменений климата для переносчиков и возбудителей малярии человека в России и ее ближайшем географическом окружении. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат, Т. 21. С. 293-347.
76. Ясюкевич В.В., Ревич Б.А. 2009. Изменение климата на территории России и здоровье населения. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2009. –М.: ИГКЭ. Т. 22. С. 147-169.
77. Ясюкевич В.В., Казакова Е.В., Попов И.О. 2009. Возможное влияние изменения климата на распространение клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* (Parasitiformes, Ixodidae) на территории России. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2009. –М.: ИГКЭ. Т. 22. С. 198-206.
78. Ясюкевич В.В., Титкина С.Н., Семенов С.М., Давидович Е.А., Ясюкевич Н.В. 2012. Возможные изменения климатообусловленных ареалов основных переносчиков малярии на территории России и сопредельных стран во второй половине XX – начале XXI веков, связанные с наблюдаемым изменением климата. Труды Ставропольского отделения Русского Энтомологического общества. Вып. 8. Материалы V международной научно-практической Интернет-конференции «Актуальные вопросы энтомологии» (30 мая 2012 г.) Ставрополь: Ставропольское издательство «Параграф» С. 76-82.
79. Ясюкевич В.В., Титкина С.Н., Семенов С.М., Давидович Е.А., Ясюкевич Н.В. 2013. Изменения климата во второй половине XX – начале XXI веков и связанные с ними изменения климатообусловленных ареалов основных переносчиков малярии на территории России и сопредельных стран. Прикладная энтомология. Т. 4, № 1 (9), С. 24-30.

80. Climate Change 2007. 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Parry M., Canziani O., Paluticof J. et al., editors). Cambridge University Press. 976 P.
81. Djadid N.D., Gholizadeh S., Tafsiri E., Romi R., Gordeev M., Zakeri S. 2007. Molecular identification of Palearctic members of *Anopheles maculipennis* in northern Iran. Malaria Journal. V. 6. http://www.malariajournal.com/content/6/1/6
82. Geographical distribution of arthropod-borne diseases and their principal vectors. 1989. (WHO/VBC/ 89.967). Geneva. 134 P.
83. Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes in Europe. 2012. European Centre for Disease Prevention and Control. Stockholm: ECDC. 100 P.
84. Hansen J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo (2010), Global surface temperature change, Rev. Geophys. V. 48. RG4004. 29 P. doi:10.1029/2010RG000345.
85. Elton C.S. 1958. The ecology of invasions by animals and plants . London: Chapman and Hall. 181 P.
86. Knudsen A.B. 1995. Global distribution and continuing spread of *Aedes albopictus*. Parassitologia. V. 37, № 2-3. P. 91-97.
87. Kobayashi M., Nihei N., Kurihara T. 2002. Analysis of Northern Distribution of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Japan by Geographical Information System. J. Med. Entomol. V. 39, № 1. P. 4-11.
88. Kobayashi M., Komagata O., Nihei N. 2008. GlobalWarming and Vector-borne Infectious Diseases. Journal of Disaster Research. V.3, № 2. P. 105-112.
89. Lieshout van M., Kovats R.S., Livermore M.T.J., Martens P. 2004. Climate change and malaria: analysis of the SRES climate and socio-economic scenarios. Global Environmental Change 14. P. 87-99.
90. Martens P., Kovats R.S., Nijhof S., de Vries P., Livermore M.T.J., Bradley D.J., Cox J., McMichael A.J. 1999. Climate change and future populations at risk of malaria. Global Environmental Change 9. P. 89-107.
91. Mogi M. 1996. Overwintering strategies of mosquitoes (Diptera, Culicidae) on warmer islands may predict impact of global warming on Kyushu, Japan. J. Med. Entomol. V. 33, № 3. P. 438-444.
92. Neteler M., Roiz D., Rocchini D., Castellani C., Rizzoli A. Terra and Aqua satellites track tiger mosquito invasion: modelling the potential distribution of Aedes albopictus in north-eastern Italy. International Journal of Health Geographics. 2011. V. 10. http://www.ijhealthgeographics.com/content/10/1/49.
93. Platonov A.E., Fedorova M.V., Karan L.S., Shopenskaya T.A., Platonova O.V., Zhuravlev V.I. 2008. Epidemiology of West Nile infection in Volgograd, Russia, in relation to climate change and mosquito (Diptera: Culicidae) bionomics. Parasitology research. (Suppl 1). V. 103. P. 45–53. DOI 10.1007/s00436-008-1050-0
94. Tatem A.J.; Hay S.I., Rogers D.J. 2006. Global traffic and disease vector dispersal. Proceedings of National Academy of Sciences of the USA. V.103, N.16. P. 6242-6247.
95. Todhanter P.E. 1996. Environmental indices for the twin cities metropolitan area (Minnesota, USA) urban heat island − 1989. Climate Res. V. 6. P. 59−69.
96. Tokarevich N.K., Tronin A.A., Blinova O.V., Buzinov R.V., Boltenkov V.P., Yurasova E.D., Nurse J. 2011. The impact of climate change on the expansion of Ixodes persulcatus habitat and the incidence of tickborne encephalitis in the north of European Russia. Global Health Action, V. 4: 8448 - DOI: 10.3402/gha.v4i0.8448

ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Е.Л. Жильцова, О.А. Анисимов*

Россия, 199053 С-Петербург, 2-ая Линия В.О., 23, Государственный гидрологический институт, *EL-spb@mail.ru

Реферат. Цель работы состоит в том, чтобы оценить отклик растительности на ожидаемые изменения климата на территории России в XXI веке. Для этого создана эмпирико-статистическая модель, использующая биоклиматические индексы для расчета положения границ основных биомов при заданном климате. Калибровка модели была проведена с использованием данных о современном распределении растительных зон в России. Разработанная модель используется для оценки потенциальных изменений растительной зональности в XXI веке в условиях будущих климатов, описываемых моделями семейства CMIP3, для нескольких временных срезов в XXI веке. Некоторые из них соответствуют глобальному потеплению на 2°C по отношению к доиндустриальному уровню (непревышение этого уровня − «глобальная цель», принятая на 15-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата). В данной работе установлено, что в первой четверти XXI века на территории России равновесные границы биомов заметно изменятся при рассматриваемых будущих климатах.

Ключевые слова. Растительность, моделирование, изменение климата.

EMPIRICO-STATISTICAL MODELING OF VEGETATION ZONATION UNDER CLIMATE CHANGE IN RUSSIA

E.L. Ziltcova, O.A. Anisimov*

State Hydrological Institute, 23, Second Line V.O., 199053 St.Petersburg, Russia. *EL-spb@mail.ru

Abstract. This study is targeted at the assessment of vegetation response in Russia to projected changes in climate in the 21st century. An empirical statistical model based on bioclimatic indices for the computation of main bioms' boundaries was developed to accomplish this goal. The model was calibrated using data on the contemporary distribution of the vegetation zones in Russia. The model was used for the assessment of potential changes in the vegetation zones' boundaries under future climates computing with the CMIP3 climatic models for several 21st century time slices. Some of them correspond to 2°C global warming above the preindustrial level (keeping the global temperature below this level is the actual global target adopted by the Fifteenth Conference of Parties of the UN Framework Convention on Climate Change). It is found in this paper that equilibrium boundaries of biomes in Russia will be noticeably changed in the first quarter of the 21st century under abovementioned climates.

Key words. Vegetation, modeling, climate change.

Введение

Вследствие продолжающегося последние несколько десятилетий глобального потепления климата исключительно важное значение приобрело изучение различных аспектов отклика на него природной среды. Для определения уровня воздействия изменений климата на ключевой элемент природной среды – растительность – нами была разработана эмпирико-статистическая модель, рассматривающая пространственное распределение биомов, под которыми понимается совокупность экосистем одной природно-климатической зоны. Конечной целью такого моделирования является отражение возможного смещения ареалов биомов в результате происходящих климатических изменений. В данной статье приводится описание калибровки и валидации модели на современных данных, а также обсуждаются результаты прогностических расчетов изменения границ растительных зон на территории России в условиях будущего климата первой четверти, середины и конца 21 века.

Эмпирико-статистическая модель климатообусловленной динамики биомов на территории России

Разработанная эмпирико-статистическая модель основывается на том, что распределение растительных биомов на поверхности

суши определяется, главным образом, тремя основными климатическими факторами: теплообеспеченностью в вегетационный период, континентальностью климата и режимом увлажнения. Существенное значение имеет также распределение почв. Они, в свою очередь, формируются под влиянием растительного покрова, но обладают, по сравнению с растительностью, гораздо большей инерционностью, а период их формирования столь длителен, что, говоря о современной динамике природной среды на протяжении нескольких десятилетий, этот фактор можно считать неизменным, если речь идет о естественных условиях. В субарктической области важную роль играет наличие многолетнемерзлых грунтов и глубина сезонного протаивания, определяющая мощность корнеобитаемого слоя. Для количественного описания этих факторов были выбраны три климатические индекса, которые ранее использовались в работах для описания распространения различных пород деревьев в лесах Средней Сибири (Чебакова и др., 2003; Чебакова, Парфенова, 2006):

- ✓ сумма температур выше 5°C ($\Sigma T>5°C$) – характеризует температурный режим вегетационного периода, а также неявно учитывает изменение мощности сезонно-талого слоя многолетнемерзлых грунтов в области криолитозоны (поскольку она, в первом приближении, связана квадратичной зависимостью с суммой летних температур);
- ✓ сумма температур ниже 0°C ($\Sigma T<0°C$) – характеризует суровость зим (важный лимитирующий фактор для растительности в условиях континентального климата);
- ✓ индекс увлажнения (D), равный отношению суммы температур выше 5°C к годовому количеству осадков.

Для отображения современного распределения биомов на территории России была составлена соответствующая карта – путем совмещения и генерализации двух цифровых карт: карты растительности из «Атласа земельных ресурсов России» (Stolbovoi, McCallum, 2002) и подробной карты растительности циркумполярного региона (Circumpolar Arctic Vegetation Map, 2003), поскольку именно в этой области, согласно многочисленным наблюдениям, происходят наиболее заметные изменения биомов. Обе исходные карты были созданы на основе синтеза данных полевых наблюдений и спутниковой информации и адекватно отражают современную биоклиматическую зональность.

Итоговая карта распределения биомов (рис. 1) разрешением 0,5° по широте и долготе включает следующие 15 биомов:

1) полярная пустыня;
2) граминоидная (злаковая) тундра;
3) кустарничковая тундра;
4) кустарниковая тундра;
5) лесотундра;
6) северная тайга;
7) средняя тайга;

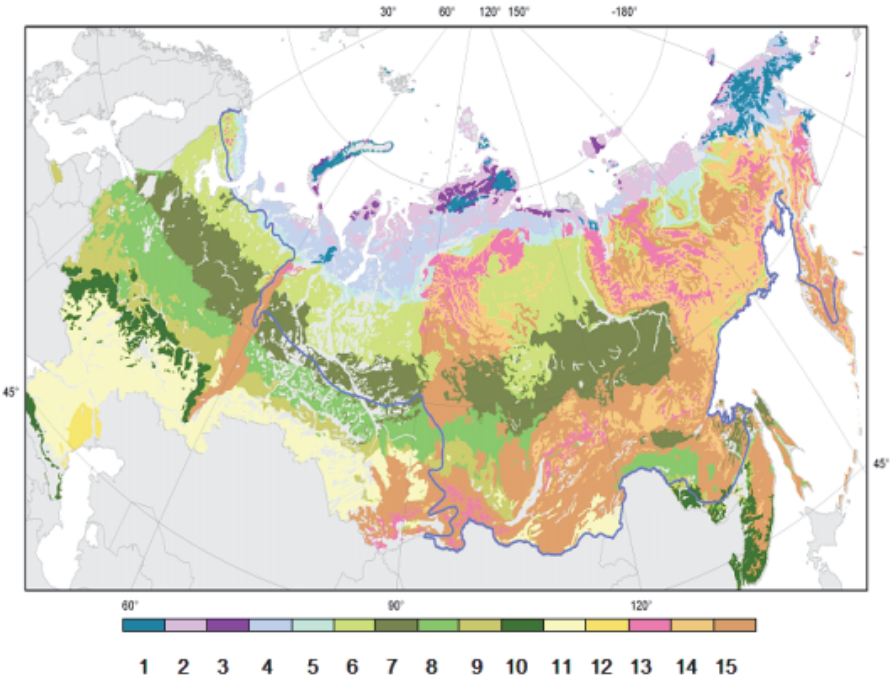

Рис. 1. *Современная карта природных зон России: 1 – полярная пустыня; 2 – граминоидная тундра; 3 – кустарничковая тундра; 4 – кустарниковая тундра; 5 – лесотундра; 6 – северная тайга; 7 – средняя тайга; 8 – южная тайга; 9 –смешанный лес; 10 – широколиственный лес; 11 – степь;12 – полупустыня; 13 – альпийская тундра; 14 – субгольцевые редколесья; 15 – горная тайга. Синей линией показана граница области распространения многолетней мерзлоты.*

8) южная тайга;
9) подтайга (смешанный лес);
10) широколиственные леса;
11) степи;
12) полупустыни;

в горных областях:

13) альпийская тундра;
14) субгольцевые редколесья;
15) горная тайга.

Расчет современных значений биоклиматических индексов-предикторов проводился по данным метеорологического архива CRU-2 (Tyndall Centre for Climate Change Recearch, UK), представляющего собой результат интерполяции наблюдений мировой метеорологической сети в узлы регулярной сетки с разрешением 0,5° по широте и долготе за период 1901-2002 гг. Ранее нами было показано, что для нескольких последних десятилетий этот архив воспроизводит поля температуры воздуха и осадков на территории стран бывшего СССР с относительно небольшой погрешностью (Жильцова, Анисимов, 2009).

Формирование ареалов основных растительных зон – длительный инерционный процесс, требующий в условиях стационарного климата не одного десятилетия, поэтому как для определения климатических границ, так и для восстановления современных ареалов растительных зон на территории России в качестве фонового был взят период 1901-1980 гг.

Воспроизведение моделью современных границ биомов на территории России

Вследствие огромной широтной протяженности территории России и большого разнообразия рельефа, принимая во внимание физиологическую адаптацию растений к местным условиям, из-за которой климатические границы одних и тех же видов, произрастающих в разных регионах, могут существенно различаться (Tchebakova et al., 2010), для более адекватного отражения распределения биомов ее территория была разделена на четыре сектора: европейскую часть (до 60°в.д.), Западную Сибирь (до 90°в.д.), Восточную Сибирь (до 130°в.д.) и Дальний Восток. Отладка модели проводилась для каждого из этих секторов в отдельности. В

таблицах 1-4 приведены полученные граничные значения биоклиматических индексов биомов для четырех рассмотренных секторов.

Таблица 1.

Граничные значения биоклиматических индексов биомов на Европейской части России

Биом	ΣT>5°C		ΣT<0°C		D	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1	0	700	-5700	-3200	0,0	1,7
2	200	1100	-4200	-2400	0,4	2,5
3	100	1200	-4500	-2500	0,2	2,4
4	500	1400	-3400	-1200	1,4	2,6
5	1000	1400	-3300	-1100	1,9	3,0
6	1200	1800	-2600	-1000	2,0	3,3
7	1500	2100	-2400	-900	2,6	3,6
8	1900	2500	-1900	-700	2,8	4,7
9	2200	2800	-1800	-400	3,1	5,1
10	2200	3800	-1800	-100	3,0	8,3
11	2700	4100	-2100	-100	3,0	11,7
12	3600	4300	-800	-100	9,4	20,9
13	600	1400	-4000	-1200	0,9	2,7
15	1100	2500	-3000	-1400	1,4	4,9

Таблица 2.

Граничные значения биоклиматических индексов биомов в Западносибирском регионе

Биом	ΣT>5°C		ΣT<0°C		D	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1	0	700	-6500	-3800	0,0	2,2
2	100	900	-5900	-3400	0,3	2,7
3	300	700	-6600	-3600	0,7	2,5
4	500	1200	-5100	-3000	1,4	3,0
5	900	1300	-4700	-2700	1,9	3,1
6	1100	1700	-4200	-2800	2,3	3,3
7	1500	2100	-3300	-2200	2,7	4,1
8	1900	2200	-2800	-1900	3,4	4,9
9	1800	2600	-2700	-1600	3,7	6,1
11	2100	3000	-2500	-1600	3,9	9,2
13	400	1100	-6300	-3000	0,8	2,7
14	600	1300	-5700	-4300	1,2	2,3
15	800	2600	-4500	-1400	1,6	5,4

Таблица 3.

Граничные значения биоклиматических индексов биомов в Восточносибирском регионе

Биом	ΣT>5°C		ΣT<0°C		D	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1	0	600	-8400	-5500	0,0	3,3
2	50	1200	-8000	-5100	0,2	4,4
3	100	1100	-7500	-5800	0,3	4,2
4	500	1200	-7100	-5000	1,5	5,0
5	800	1200	-7700	-4700	2,1	4,9
6	800	1500	-7000	-4300	2,2	5,1
7	1000	1900	-6000	-3500	2,3	5,7
8	1300	2300	-4400	-2400	3,1	5,7
9	1800	2500	-3500	-2100	3,5	6,0
10	2200	2600	-3200	-2000	3,7	4,9
11	1700	2700	-4000	-2200	3,8	10,3
13	300	1200	-8800	-3100	0,4	4,0
14	400	1500	-7600	-3500	1,0	4,2
15	600	2100	-6100	-2500	1,2	6,0

Таблица 4.

Граничные значения биоклиматических индексов для биомов в регионе Дальнего Востока

Биом	ΣT>5°C		ΣT<0°C		D	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1	0	800	-10000	-3300	0,0	3,6
2	0	1000	-8900	-2500	0,0	8,2
3	0	1000	-8900	-3100	0,0	8,4
4	0	1200	-8000	-3000	1,2	7,3
5	700	1300	-7300	-4500	2,8	5,3
6	900	1500	-8400	-3000	1,9	6,2
7	1200	2000	-8200	-700	2,0	8,0
8	1500	2600	-5000	-800	3,3	6,1
9	1600	2900	-3500	-2000	3,9	5,9
10	1700	3300	-3000	-700	3,0	7,2
13	50	1200	-10000	-1300	0,0	4,4
14	150	1400	-9300	-932,5	0,2	4,3
15	250	2200	-9400	-700	0,4	5,7

Для проверки адекватности модели, рассчитанные по данным архива CRU-2 за базовый период 1901-1980 гг. значения биоклиматических индексов были проинтерполированы в сетку с шагом 0,5° по широте и долготе, после чего было воспроизведено современное распределение растительных зон для каждого из четырех секторов (см. рис. 2-5).

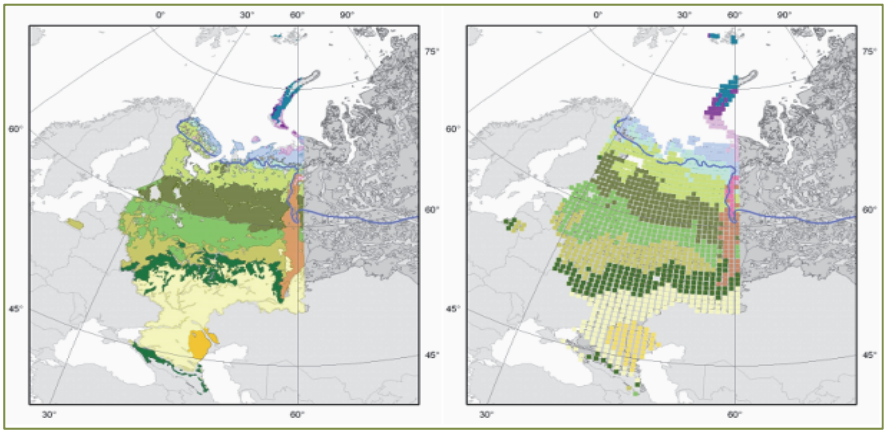

Рис. 2. *Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Европейской части России.*

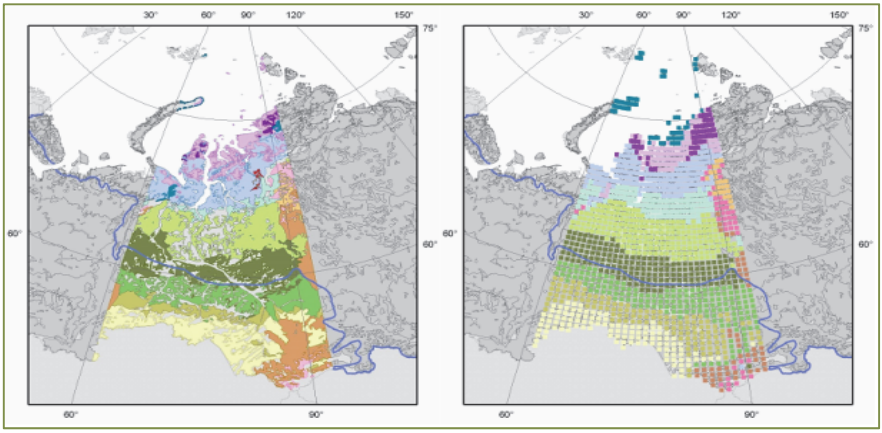

Рис. 3. *Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Западной Сибири.*

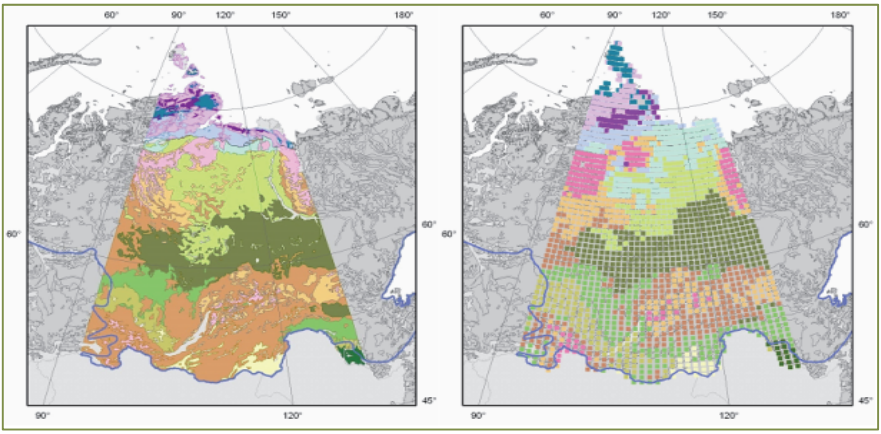

Рис. 4. *Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Средней и Восточной Сибири.*

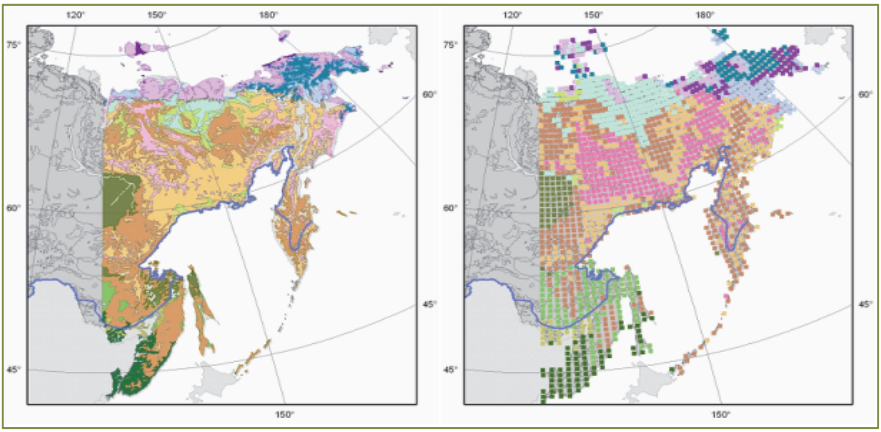

Рис. 5. *Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Дальнего Востока.*

Общий характер распределения растительных зон, воссозданный моделью, хорошо соотносится с актуальными данными, в том числе и в региональных деталях. Несомненно, имеются и различия, однако можно считать, что они не критичны, поскольку в контексте рассматриваемой задачи главным является не столько точность воспроизведения конкретного ареала отдельных растительных зон, сколько выявление тех областей, где при заданном уровне

потепления предстоящие изменения климата и вечной мерзлоты могут привести к радикальному изменению ныне существующей растительности с последствиями для всего природного комплекса. Отметим, что соответствие расчета актуальной карте, которая использовалась в модели для определения климатических границ растительных зон, нельзя считать проверкой на независимом материале, однако оно подтверждает достаточно высокую точность модели и возможность ее использования в прогностических целях.

В качестве прогноза климата были использованы результаты расчетов по гидродинамическим моделям CMIP3 (http://www-cmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php) для одного из наиболее жестких сценариев эмиссии парниковых газов A2. В нашем случае выбор сценария не имеет особого значения, поскольку им определяется в основном скорость потепления, тогда как для нашей задачи важен лишь его уровень. По расчетам 17 моделей CMIP3 была получена ансамблевая климатическая проекция с пространственным разрешением 2,5° по широте и долготе, по данным которой затем было проведено осреднение для четырех 30-летних периодов 21-го века: 2001-2030, 2016-2045, 2031-2060 и 2066-2095 гг. Следует отметить, что Европейским Союзом была поставлена стратегическая задача добиться ограничения глобального потепления на уровне +2°C по отношению к доиндустриальному периоду. В используемой нами ансамблевой проекции по сценарию A2 этот уровень будет достигнут в период 2031-2060 гг., и на него стоит обратить особое внимание.

Чтобы минимизировать погрешности, связанные со смещением модельных оценок, расчет прогнозируемых климатических характеристик проводился следующим образом: рассчитанные по модели средние отклонения месячных величин температуры воздуха и осадков за каждый из выбранных периодов по отношению к среднему за период 1961-1990гг. накладывались на норму, рассчитанную за этот же период по данным архива CRU-2.

На рисунке 6 представлены прогностические карты растительности для периодов 2016-2045 и 2031-2060 гг.

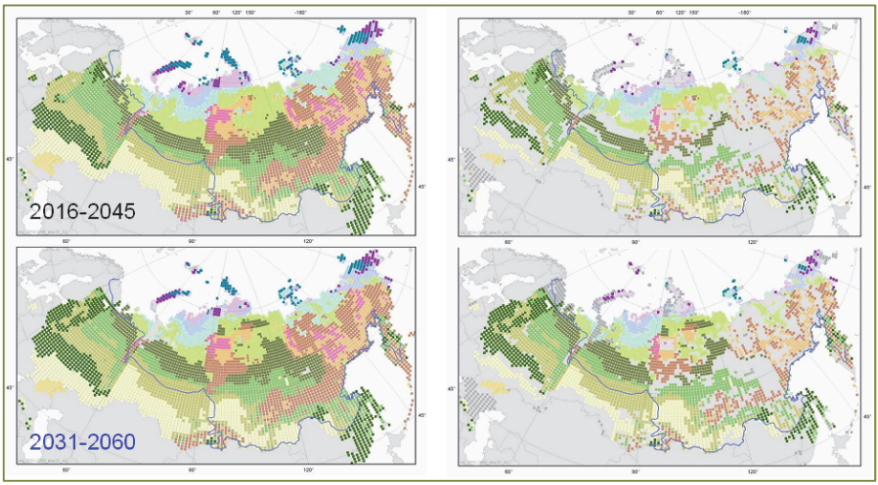

Рис. 6. *Прогноз растительной зональности на 2016-2045 и 2031-2060 гг. Слева – общая картина, справа – прогнозируемые изменения.*

На картах справа цветом выделены только те участки, где климатические изменения могут привести к смене растительной зоны. Иллюстрация наглядно показывает степень влияния изменения климата на экосистемы. Количественной оценкой такого влияния может служить отношение площади, где предполагаются изменения, к общей площади рассматриваемой территории (табл. 5).

Таблица 5.

Доля территории России (%), где прогнозируется изменение растительных зон

Период	ЕТР	Западная Сибирь	Восточная Сибирь	Дальний Восток	Россия в целом
2016-2045 гг.	58	64	55	48	56
2031-2060 гг.	71	74	70	57	67

Можно видеть, что уже в первой половине 21-го века изменение климата может привести к смене экосистем на большей части бореальной зоны Европейской территории России, в Западной и Восточной Сибири. К середине века изменения могут стать

тотальными. (Конечно, следует иметь в виду, что процесс формирования и смены экосистем обладает значительной инерционностью, и отклик природной среды на климатические изменения не может быть мгновенным.)

Дискуссия

Интересно сопоставить полученные результаты с данными наблюдений за происходящими в настоящее время изменениями растительности, особенно в субарктическом поясе, где они проявляются наиболее наглядно. Обзор, представленный в работе (Richter-Menge, Overland, 2010), свидетельствует о том, что и наземные наблюдения, и спутниковый мониторинг подтверждают наличие выявленных модельными расчетами тенденций. Так, эксперимент по изучению искусственного воздействия на арктическую растительность повышенной температуры воздуха, увеличенной концентрации углекислого газа и усиленного азотного питания, проводившийся в течение нескольких лет на экспериментальных площадках Аляски, Чукотки, Сибири и Северной Швеции, продемонстрировал характерное для таких условий изменение соотношения растительных видов − увеличение доли сосудистых растений и сокращение доли мхов и лишайников.

Аналогичные изменения происходят и в естественной среде. Почти тридцатилетние наблюдения (1981-2008 гг.) на биостанции Toolik Lake на Аляске показали увеличение доли сосудистых растений на 18%, а также рост высоты растений и увеличение общей биомассы (Hudson, Henry, 2009). При этом наиболее существенные изменения наблюдаются в самых северных биомах. Особенно ярко они проявились в канадской части Арктики, где за последние тридцать лет, на фоне интенсивного повышения температуры воздуха (около 0,6 – 1,0 ºС / 10 лет), произошло значительное сокращение зоны полярной пустыни (Hudson, Henry, 2009). На севере Европейской части России (Кольский полуостров) за последние десятилетия, по данным спутниковых наблюдений, также зафиксированы смещение к северу границы тундры и лесотундры, продвижение лесотундровой растительности вверх по склонам, замещение лишайниковой и кустарничково-лишайниковой тундры лишайниково-кустарничковой и кустарничковой, зарастание болот древесно-кустарниковой растительностью (Кравцов, Лошкарева, 2010).

Получивший широкое распространение спутниковый мониторинг индекса фотосинтетической активности растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) позволяет связать изменение продуктивности растительности с изменением теплообеспеченности, также оцениваемым по спутниковым данным о радиационной температуре. Наблюдения показали, что за период 1982-2008 гг. в целом по Арктике теплообеспеченность увеличилась на 21%, а индекс NDVI вырос на 7% (Bhatt et al., 2010).

Все эти материалы подтверждают положенную в основу работы концепцию, в соответствии с которой растительность должна положительно реагировать на увеличение теплообеспеченности, только если теплообеспеченность является одним из основных лимитирующих факторов, то есть в высоких и средних широтах, где и наблюдается значительная корреляция между теплообеспеченностью и NDVI. При этом до какого-то момента отклик может проявляться в увеличении биомассы и фотосинтетической активности растительности при сохранении неизменного видового состава. Когда же уровень теплообеспеченности приближается к границам допустимого для существующего на данной территории биома диапазона, результатом становятся кардинальные изменения – биом теряет стабильность, изменяется соотношение между отдельными видами растений, некоторые виды вытесняются, происходит инвазия новых видов из соседних биомов, в итоге образуются новые растительные сообщества, обладающие новыми свойствами (это может привести, в частности, к изменению альбедо и отразиться в противонаправленном теплообеспеченности изменении NDVI). Закономерным следствием этого процесса, обусловленного монотонным повышением глобальной температуры в течение последних десятилетий и прогнозируемым продолжающимся ее повышением на протяжении всего 21-го века, является изменение ареалов растительных зон с общим смещением их границ к северу (в северном полушарии), сокращение и дальнейшее исчезновение зоны тундры, а также изменение высотной поясности. Такая радикальная трансформация неизбежно должна привести к изменению всей природной среды, поскольку растительность является одним из определяющих, ключевых ее элементов, а уровень потепления, приводящий к таким последствиям, можно назвать критическим (Анисимов и др., 2011).

В заключение можно сказать, что предложенная эмпирико-статистическая модель растительности может быть полезна в свете решения задачи адаптации природной среды и общества к происходящим изменениям климата, основной целью которой является сохранение биогеосистемной, социально-экономической, этнокультурной стабильности. Для России, практически вся территория которой расположена в высоких и средних широтах и большую ее часть занимает область многолетней мерзлоты, проблема адаптации к климатическим изменениям является особенно актуальной.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 13-05-00072 и 13-05-91171-ГФЕН_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А. 2011. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России. Метеорология и гидрология. №11. С. 31-41.
2. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. 2009. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами. Метеорология и гидрология. № 10. С. 79-90.
3. Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. 2010. Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения. Вестник МГУ. Сер. Геогр. №6. С. 49-57.
4. Чебакова Н.М., Парфенова Е.И. 2006. Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу XX века в Средней Сибири. Вычислительные технологии. №3. С. 77-86.
5. Чебакова Н.М., Рейфельдт Д.Е., Парфенова Е.И. 2003. Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата. Сибирский экологический журнал. № 6. С. 677-686.
6. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Comiso J.C., Epstein H.E., Jia G.J., Gens R., Pinzon J.E., Tucker C.J., Tweedie C.E., Webber P.J. 2010. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea-ice decline. Earth Interactions. V. 14. Paper №8. 19 P. doi: 10.1175/2010EI315.1.
7. Circumpolar Arctic Vegetation Map. 2003. CAVM Team. http://www.geobotany.uaf.edu/cavm/, http://www.arcticatlas.org/maps/themes/cp/.
8. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. 2009. Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008. Ecology. №90. P. 2657-2663.
9. Richter-Menge J., Overland J.E. 2010. Arctic Report Card. http://www.arctic.noaa.gov/reportcard.

10. Stolbovoi V., McCallum I. 2002. CD-ROM Land Resources of Russia. International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science: Laxenburg, Austria.
11. Tchebakova N.M., Rehfeldt G.E., Parfenova E.I. 2010. From vegetation zones to climatypes: effects of climate warming on Siberian ecosystems, in Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological studies. A. Osawa et al., Eds. Springer Science+Business Media. P. 427-447.

ИЗМЕНЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В РОССИИ И СОСЕДНИХ СТРАНАХ НЕПАРНОГО ШЕЛКОПРЯДА И ШЕЛКОПРЯДА-МОНАШЕНКИ (*LYMANTRIA DISPAR* L. И *LYMANTRIA MONACHA* L., LYMANTRIIDAE, LEPIDOPTERA) ПОД ВЛИЯНИЕМ НАБЛЮДАЕМОГО И ОЖИДАЕМОГО В XXI ВЕКЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

*С.Н. Титкина, И.О. Попов, С.М. Семенов, В.В. Ясюкевич**

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. * v1959@yandex.ru

Реферат. Изменение климата в 1981-2010 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. создали предпосылки к значительному расширению ареалов непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки в северном и восточном направлениях. В Восточной Сибири в районе Алданского нагорья и севернее Байкала до 60-й параллели появились новые участки, не связанные с основным ареалом, пригодные для существования непарного шелкопряда по климатическим показателям. Наибольшее расширение климатического ареала монашенки наблюдается в районе Приленского плато и северной части Алданского нагорья. Сокращение ареала выявлено только на Алтае в очень ограниченном масштабе. Для монашенки возможно также смыкание европейско-сибирской и дальневосточной частей ареала.

При изменениях климата в соответствии с рассмотренными в статье сценариями возможно расширение климатических ареалов обоих видов в северном и восточном направлениях. Их сокращения в большинстве случаев не произойдет.

Воздействия на ареалы непарного шелкопряда и монашенки изменений климата в соответствии со сценариями умеренного (RCP4.5) и экстремального (RCP8.5) антропогенных воздействий на климатическую систему в первой половине XXI века приведут к сходным последствиям. Различия (более существенное расширение ареалов при сценарии RCP8.5) будут проявляться во второй половине XXI века.

Ключевые слова. Изменение климата, климатические предикторы, непарный шелкопряд, шелкопряд-монашенка, модельный ареал, климатический сценарий.

CHANGES IN DISTRIBUTION IN RUSSIA AND NEIGHBORING COUNTRIES OF GIPSY MOTH AND NUN MOTH (*LYMANTRIA DISPAR* L. AND *LYMANTRIA MONACHA* L., LYMANTRIIDAE, LEPIDOPTERA) DUE TO OBSERVED CLIMATE CHANGE AND PROJECTED ONES FOR XXI CENTURY

*S.N. Titkina, I.O. Popov, S.M. Semenov, V.V. Yasjukevich**

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, * v1959@yandex.ru

Abstract. Changes in climate in 1981-2010 vs. 1951-1980 created conditions for substantial expansion of Gipsy moth and Nun moth northward and eastward. In the Eastern Siberia, in the Aldan upland and in the area situated to the north of Lake Baykal up to 60° N new regions climatically suitable for Gipsy moth appeared. Those parts are distinguished from the main range. The most pronounced extension of the Nun moth climatic range was observed in the Lena plateau and in the northern part of the Aldan upland. Reduction of the range was observed in Altai only, but its scale was very limited. Merging of the European-Siberian and the Far Eastern parts of the range is possible for the Nun moth.

All climatic scenarios considered in this paper will lead to the extension of ranges for both species northward and eastward. No reduction is expected. Impacts of climate change on Gipsy moth and Nun moth ranges corresponding to moderate scenario (RCP4.5) and extreme scenario (RCP8.5) of anthropogenic impact on the Earth's climate system will result in similar outcomes in the first half of the 21st century. Differences will reveal in the second half of the 21st century, namely, more pronounced extension of ranges under RCP8.5 scenario.

Key words. Climate change, climatic predictors, Gipsy moth, Nun moth, modeled ranges, climatic scenario.

Введение

Настоящая статья посвящена оценке влияния потепления климата на изменения ареалов непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки в период с 1981 по 2010 год по сравнению с предшествующим периодом 1951-1980 гг. методами математического моделирования с использованием климатических предикторов, а также возможному климатообусловленному

изменению их ареалов в будущем до конца XXI века включительно. Эти виды широко распространены на территории Евразии. Ареал непарного шелкопряда на территории бывшего СССР простирается от западных границ до Тихого океана. Отсутствует этот вид только в пустынных районах Средней Азии (Кожанчиков, 1950; Афонин и др., 2006; Giese, Schneider, 1979; Orozumbekov et al., 2009). Ареал монашенки состоит из трех разобщенных частей: европейско-сибирской, дальневосточной и кавказской (Кожанчиков, 1950; Гниненко, 2002; Гниненко и др., 2005). Кавказская часть ареала отделена от европейской безлесными степями Кубани, Нижнего Дона и Калмыкии. Причины разрыва в Забайкалье не выяснены до конца. Возможно, причиной этого является низкая морозоустойчивость кладок монашенки (Гниненко, 2002). В Средней Азии монашенка не встречается (Кожанчиков, 1950).

Непарный шелкопряд и монашенка существенно повреждают многие лиственные и хвойные древесные породы, вредят также и плодовым деревьям. Предпочтение к лиственным породам у непарного шелкопряда выражено в большей степени, чем у монашенки. На всем протяжении ареала моновольтинны (Кожанчиков, 1950; Васильев, Лившиц, 1984; Orozumbekov et al., 2009).

Вредоносность этих видов весьма высока. Оба они периодически дают вспышки массового размножения. Непарный шелкопряд среди листогрызущих насекомых является наиболее широко распространенным и опасным вредителем. За предыдущие двадцать лет площадь очагов непарного шелкопряда по России ни разу не снижалась ниже 200 тыс. га, а среднегодовая площадь за этот период составляет 726 тыс. га. Площадь очагов, превышающая 1 млн. га, отмечалась в 1977, 1978, 1991, 1994, 1996 и 1997 гг. (Соколов, 2009; Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов…, 2010). В лесах Северо-Западного Кавказа (Республика Адыгея и Краснодарский Край) вспышкой массового размножения в 2009г. было охвачено 470 тыс. га, а в Южном Кыргызстане в 1981г. − 65 тыс. га (Замотайлов, Щуров, 2010; Пономарев и др., 2005). Вспышки массового размножения монашенки куда менее масштабны (за период с 1977г. средняя площадь очагов по России 33,7 тыс. га), но и они так же, как вспышки непарного шелкопряда, отмечаются от Калининградской области до Приморья. Наиболее крупные вспышки зарегистрированы в 1978, 1985 и 2000 гг. − 70,3, 80,2 и 73,7 тыс. га

соответственно (Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов…, 2010).

Методические вопросы, связанные с использованием климатической базы и моделированием ареалов, подробно рассмотрены в монографии С.М. Семенова и др., 2006.

Результаты и обсуждение

Модельный климатообусловленный ареал шелкопряда-монашенки и его изменения показан на рис. 1. Климатические изменения за период 1981 − 2010 гг. по сравнению с периодом 1951 − 1980 гг. создали предпосылки к существенному расширению ареала в северном и восточном направлениях и смыканию европейско-сибирской и дальневосточной частей ареала.

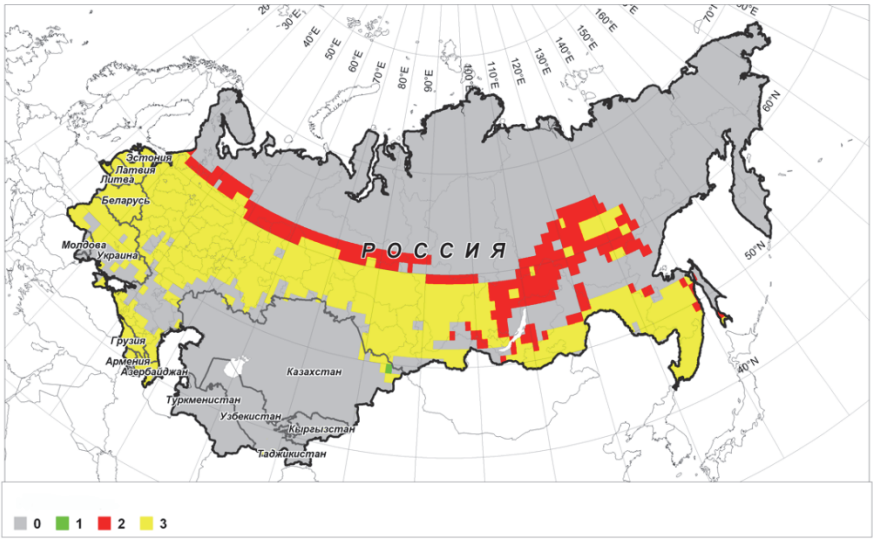

Рис. 1. *Модельный климатообусловленный ареал шелкопряда-монашенки: изменения за период 1981−2010 гг. по сравнению с периодом 1951−1980 гг. Обозначения: 0 − территория в ареал не входит; 1 − сокращение ареала; 2 − расширение ареала; 3 − территория входила в ареал в оба периода (Ясюкевич и др., 2013).*

Наибольшее расширение ареала наблюдается в районе Приленского плато и северной части Алданского нагорья. Сокращение ареала выявлено только на Алтае в очень ограниченном

масштабе. Не исключено, что смешение сибирских и дальневосточных популяций, ранее изолированных друг от друга, в результате эффекта гетерозиса значительно повысит вспышечный потенциал монашенки (Ясюкевич и др., 2013).

На рис. 2 показан модельный климатообусловленный ареал непарного шелкопряда и его изменения за период 1981 − 2010 гг. по сравнению с периодом 1951 − 1980 гг. Так, за период 1981 − 2010 гг. по сравнению с периодом 1951 − 1980 гг. его границы почти повсеместно существенно сдвинулись к северу и востоку. Кроме того, в Восточной Сибири в районе Алданского нагорья и севернее Байкала до 60-й параллели появились новые участки, пригодные для существования непарного шелкопряда по климатическим показателям, но не связанные с основным ареалом.

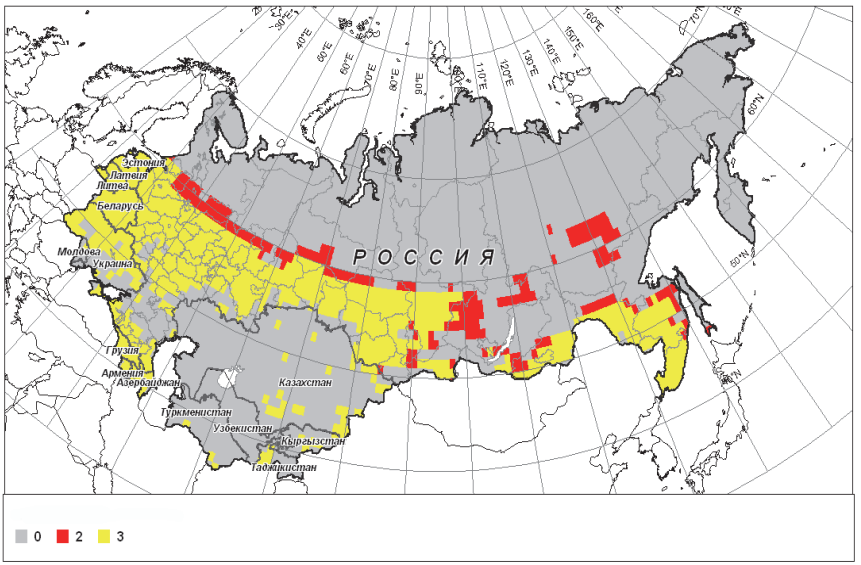

Рис. 2. *Модельный климатообусловленный ареал непарного шелкопряда: изменения за период 1981−2010 гг. по сравнению с периодом 1951−1980 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено (Ясюкевич и др., 2013).*

Сокращения ареала не произошло (Ясюкевич и др., 2013). Эти оценки подтверждаются и данными наблюдений. Указывается, что

очаги массового размножения непарного шелкопряда во второй половине XX века на Дальнем Востоке продвинулись к северу более чем на 500 км (Юрченко, Турова, 1988, цитата по: Гниненко, 2000), а граница его распространения на юго-востоке Западной Сибири проходит на 200 км севернее, чем предполагалось ранее (Ильиных, Кривец, 2011).

Необходимо отметить, что в межвспышечный период для этих видов характерно существование в пределах ареала в виде микропопуляций, пространственно и генетически изолированных друг от друга. Ареал вида становится прерывистым, численность крайне мала (Пономарев, 1992). Так, в Подмосковье в 1960-1963 гг. (период депрессии) после вспышки 1957-1958 гг. средняя численность непарного шелкопряда составляла 0,018 – 0,033 кладки на 100 деревьев (Белов, 1998). В межвспышечный период численность монашенки (данные по Свердловской области) также очень низка − 1 самка на 1,5 тыс. деревьев (Марков, 1995). Для сравнения в эруптивный период вспышки регистрировали до 100 − 150 кладок на дерево у непарного шелкопряда и 15 − 40 кладок у монашенки (Замотайлов, Щуров, 2010; Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов…, 2010). В период вспышки эти микропопуляции сливаются. Здесь представлены максимально возможные ареалы монашенки и непарного шелкопряда, обусловленные климатическими показателями.

Распространение этих видов в будущем на первом этапе проводилось на основе климатической модели, разработанной в ИГКЭ (Семенов и др., 2013). В этой работе изменения климата на территории России при глобальном уровне потепления 1,5°С даются в сравнении с базовым периодом 1981 − 2000 гг. Это приблизительно соответствует превышению доиндустриального уровня на 2°С. Модельный ареал шелкопряда-монашенки представлен на рис. 3.

При глобальном уровне потепления 1,5°С площадь ареала монашенки существенно увеличится, в основном, за счет северного и восточного направлений, создадутся условия для заселения этим вредителем южной части Сахалина. Европейско-сибирская и дальневосточная части ареала сольются в единый евроазиатский ареал. Изолированной останется кавказская часть ареала, отделенная от основной безлесными степями Кубани, Нижнего Дона и Калмыкии.

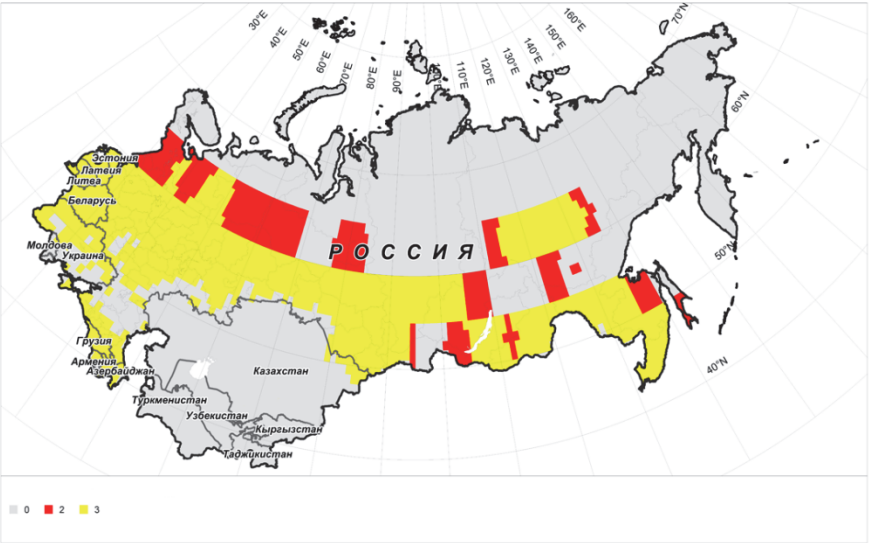

Рис. 3. *Модельный климатообусловленный ареал шелкопряда-монашенки: изменения при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981−2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

На рис. 4 показан построенный по аналогичному принципу ареал непарного шелкопряда. И в этом случае модельный анализ показывает существенное расширение ареала в северном и восточном направлениях на Европейской территории России, Байкальском регионе, Восточной Сибири и Дальнем Востоке.

Следующая часть раздела посвящена оценкам распространения непарного шелкопряда и монашенки по моделям, рассчитанным Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) по параметрам будущего климата, полученным осреднением результатов вычислений по ансамблю из 31 МОЦАО (Моделей Общей Циркуляции Атмосферы и Океана), которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project − Phase 5) и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли семейства RCP (Representative Concentration Pathways): сценарий умеренного воздействия RCP4.5 и сценарий экстремального воздействия RCP8.5.

Рис. 4. *Модельный климатообусловленный ареал непарного шелкопряда: изменения при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981−2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Эти сценарии подробно рассмотрены в разделе 3 Второго оценочного доклада…, 2014. Оценки получены для следующих временных периодов в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг. (s1):

- ✓ s2 – 2011-2030 гг.
- ✓ s3 – 2034-2053 гг. для RCP4.5 или 2028-2047 гг. для RCP8.5 (переход глобального интеграла через 2°С)
- ✓ s4 – 2041-2060 гг.
- ✓ s5 – 2080-2099 гг.

На рис. 5 показаны оценки изменения ареала шелкопряда-монашенки по сценарию умеренного воздействия на климатическую систему RCP4.5 для различных периодов, указанных выше. По мере потепления климата ареал будет все более и более расширяться в

северном направлении. Имеющиеся разрывы в гористой части Восточной Сибири будут сокращаться.

На рис. 6 показаны аналогичные оценки изменения ареала шелкопряда-монашенки по сценарию экстремального воздействия на климатическую систему RCP8.5.

Тенденции к расширению ареала, отмеченные при анализе рис. 5., в соответствии со сценарием RCP8.5 усилятся, что особенно заметно для периодов 2041-2060 гг. и 2080-2099 гг., причем в последнем случае монашенка распространится на большей части территории России до 70° с.ш., а разрыв ареала в гористой части Восточной Сибири исчезнет. Климатически обусловленных предпосылок сокращения ареала не выявляется ни в одном случае.

На рис. 7 и 8 представлены аналогичные оценки изменения ареала непарного шелкопряда по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 соответственно.

Как и в случае с шелкопрядом-монашенкой, ареал непарного шелкопряда при обоих сценариях и всех рассмотренных временных периодах будет расширяться в северном и восточном направлениях, что особенно заметно для периодов 2041-2060 гг. и 2080-2099 гг. Тенденций к сокращению ареала не выявлено.

Необходимо отметить, что как на рис. 5 и 6 (монашенка), так и на рис. 7 и 8 (непарный шелкопряд) позиции а) и б) практически не отличаются. Это означает, что климатическое воздействие в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 в периоды 2011-2030 гг. и 2028-2047 гг. и 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С) для RCP4.5 и RCP8.5 соответственно на каждый из видов сказывается одинаково. Наоборот, позиции в) и г) (периоды 2041-2060 гг. и 2080-2099 гг.) на этих рисунках существенно различны. Таким образом, расхождение по степени климатического воздействия между сценариями RCP4.5 и RCP8.5 начнет сказываться с 40-х годов XXI века.

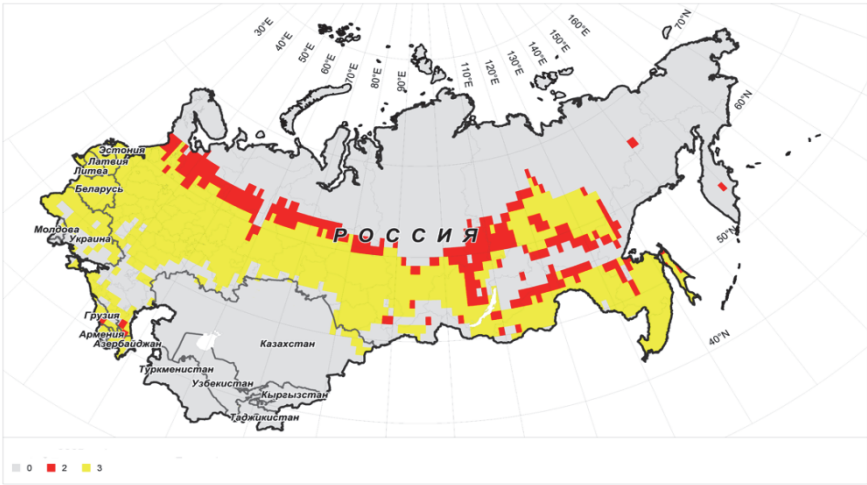

Рис. 5а.

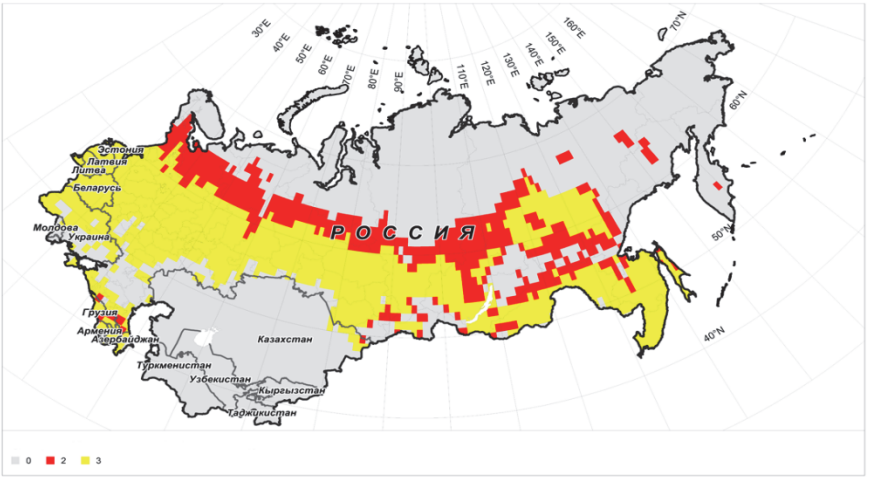

Рис. 5б.

Рис. 5 а,б. *Изменение ареала шелкопряда-монашенки в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

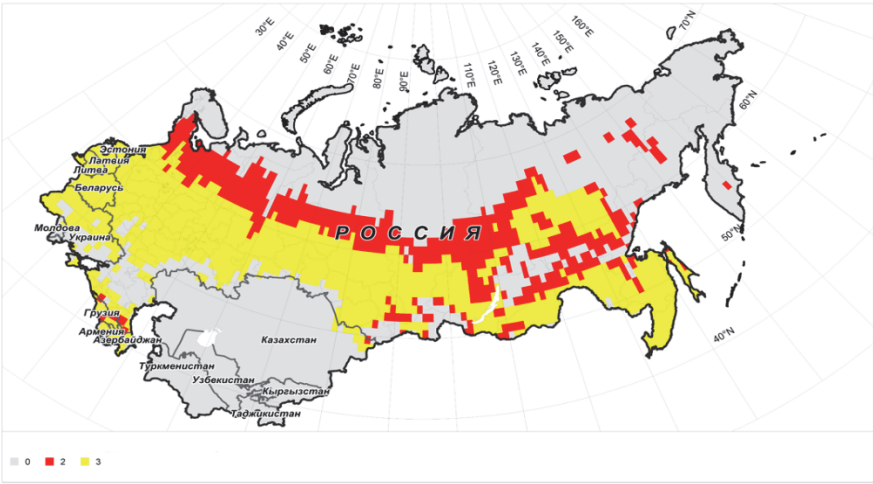

Рис. 5в.

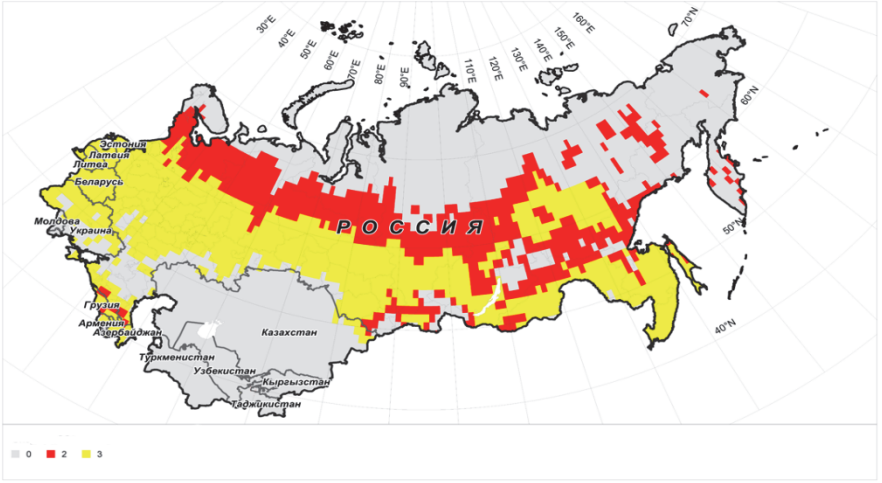

Рис. 5г.

Рис. 5 в,г. *Изменение ареала шелкопряда-монашенки в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

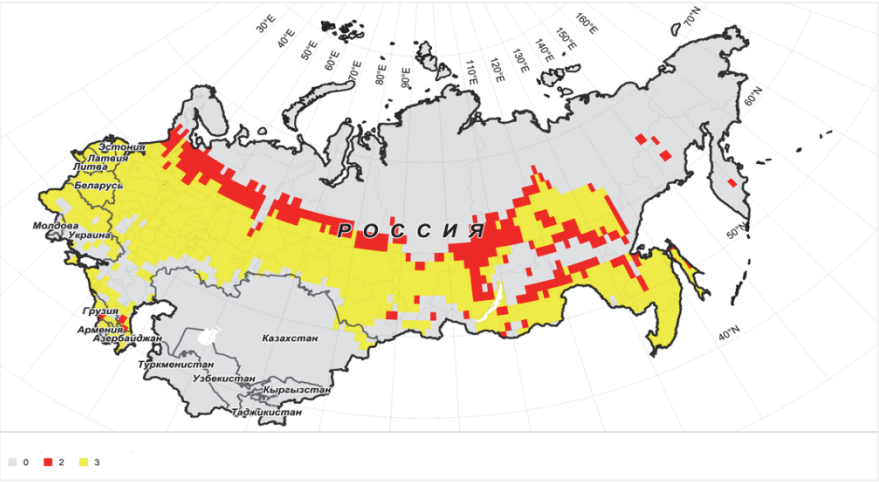

Рис. 6а.

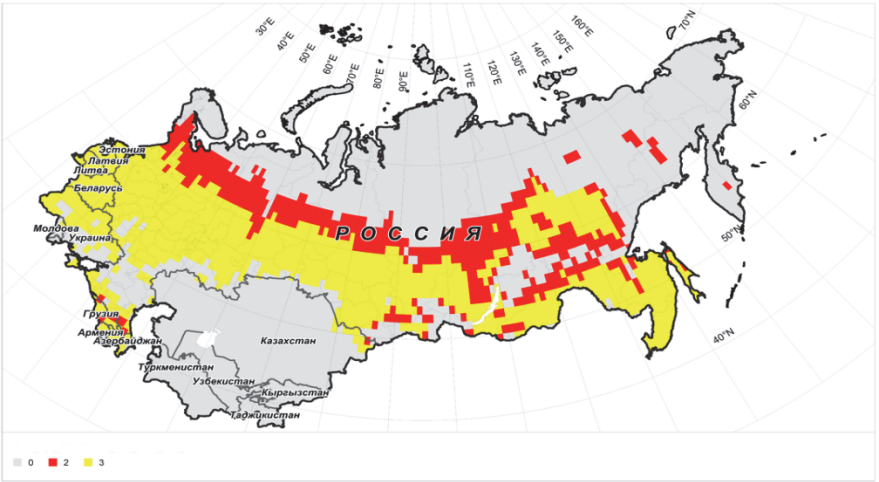

Рис. 6б.

Рис. 6 а,б. *Изменение ареала шелкопряда-монашенки в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

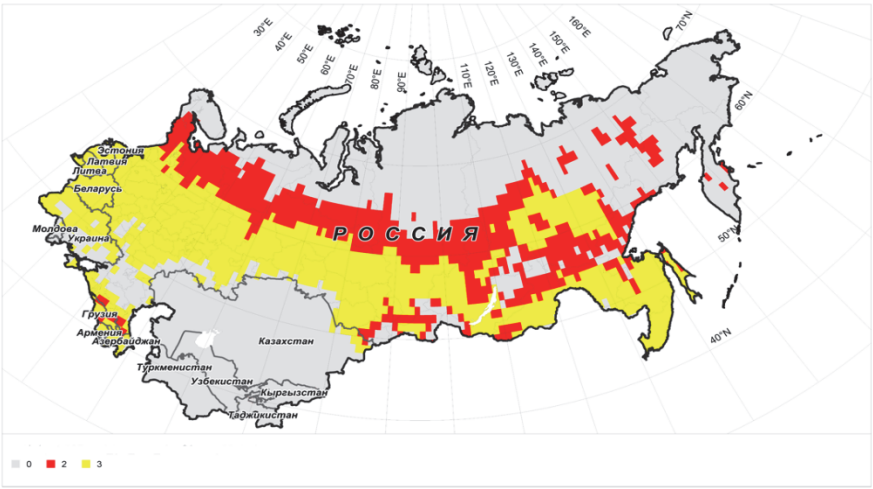

Рис 6в.

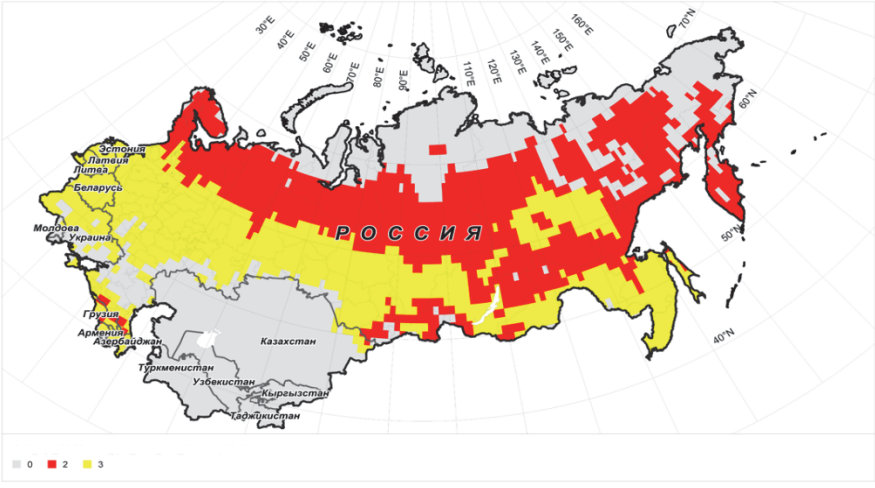

Рис. 6г.

Рис. 6 в,г. *Изменение ареала шелкопряда-монашенки в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

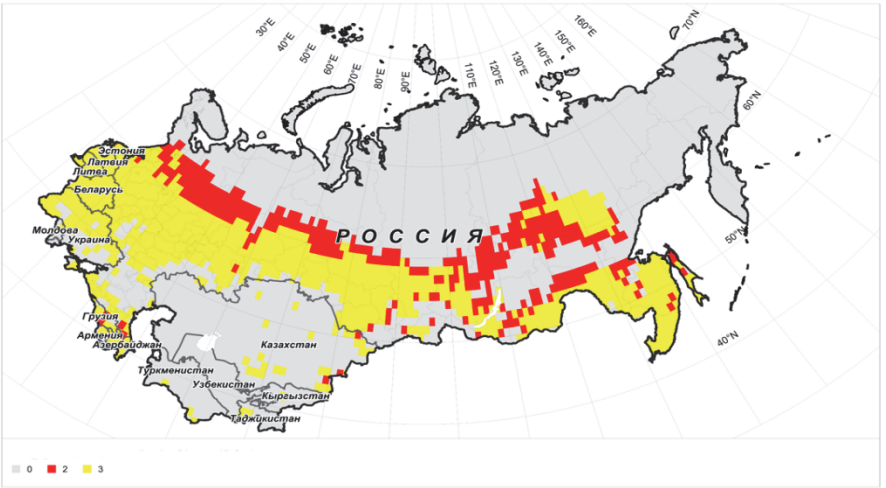

Рис. 7а.

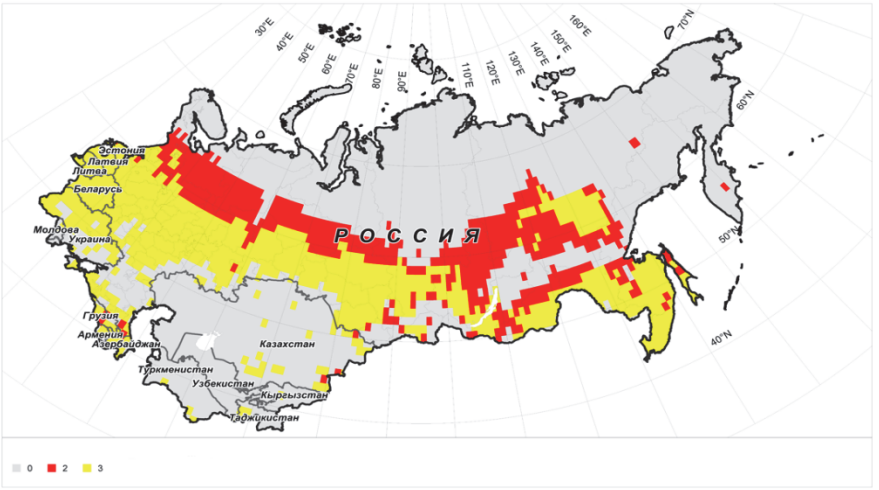

Рис. 7б.

Рис. 7 а, б. *Изменение ареала непарного шелкопряда в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

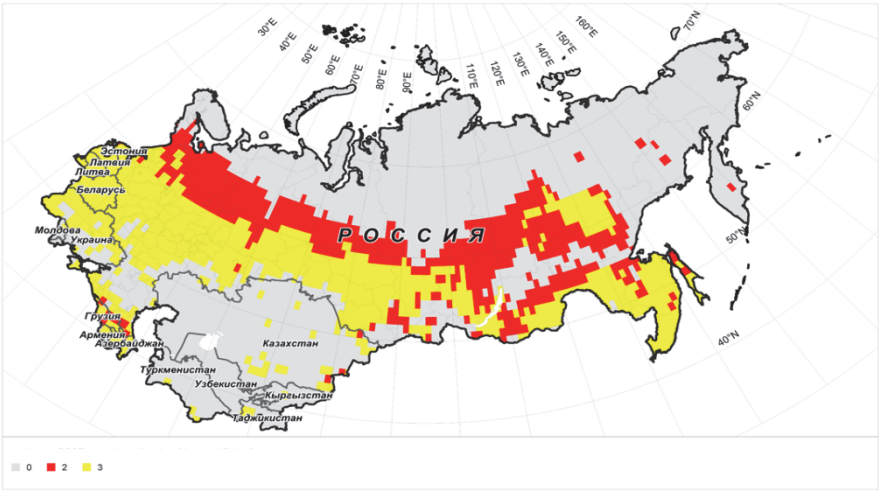

Рис. 7в.

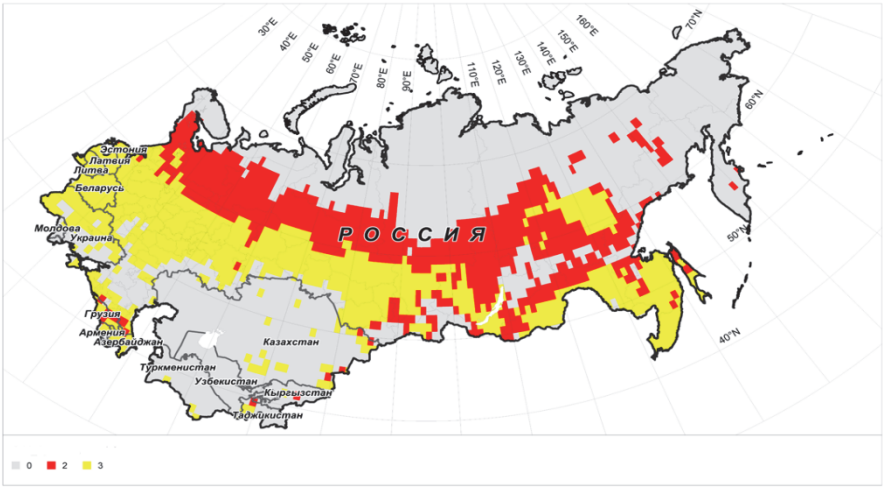

Рис. 7г.

Рис. 7 в, г. *Изменение ареала непарного шелкопряда в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 8а.

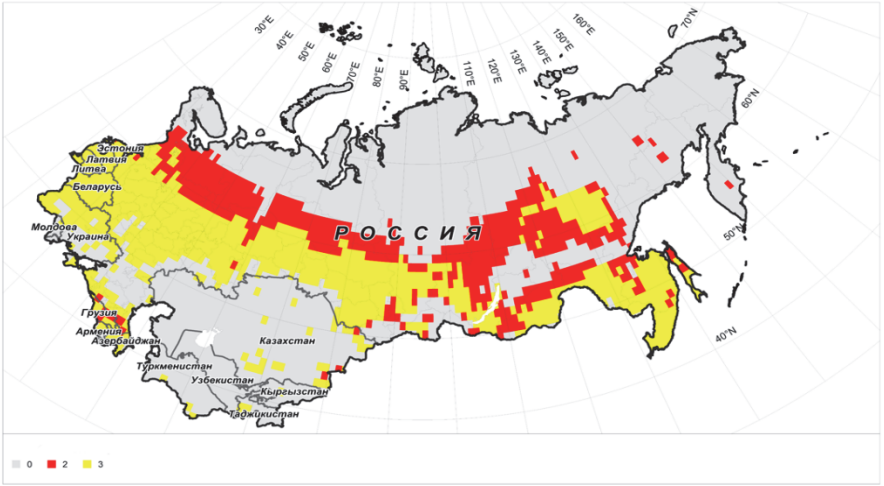

Рис. 8б.

Рис. 8 а, б. *Изменение ареала непарного шелкопряда в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

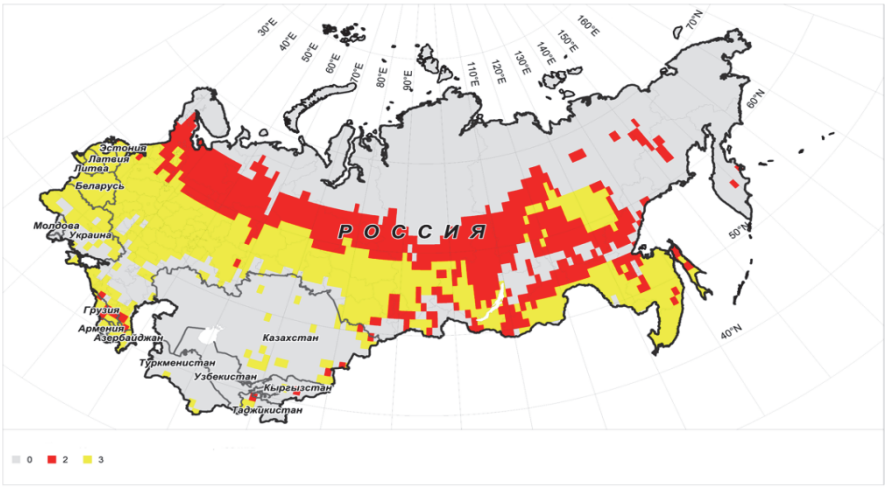

Рис. 8в.

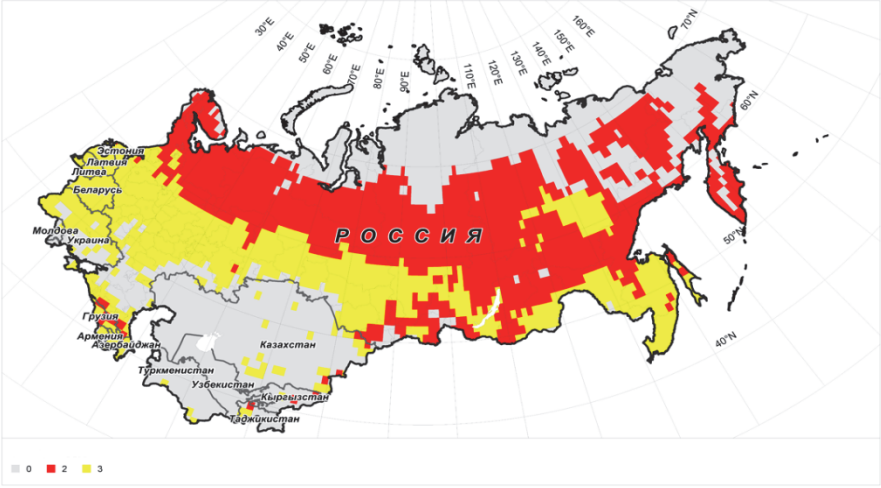

Рис. 8г.

Рис. 8 в, г. *Изменение ареала непарного шелкопряда в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Заключение

Климатические изменения за период 1981 − 2010 гг. по сравнению с периодом 1951 − 1980 гг. создали предпосылки к значительному расширению их ареалов в северном и восточном направлениях. В Восточной Сибири в районе Алданского нагорья и севернее Байкала до 60-й параллели появились новые участки, пригодные для существования непарника по климатическим показателям, но не связанные с основным ареалом. Наибольшее расширение ареала монашенки наблюдается в районе Приленского плато и северной части Алданского нагорья. Сокращение ареала выявлено только на Алтае в очень ограниченном масштабе. В отношении монашенки возможно также смыкание европейско-сибирской и дальневосточной частей ареала.

По мере предполагаемого изменения климата как по сценарию ИГКЭ, так и по сценариям ГГО, характерно существенное расширение ареалов в северном и восточном направлениях. Сокращения ареалов в большинстве случаев не произойдет.

Воздействие на ареалы переносчиков изменений климата в соответствии со сценариями ГГО умеренного RCP4.5 и экстремального RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему в первой половине XXI века скажется одинаково. Различия (более существенное расширение ареалов по сценарию RCP8.5) будут проявляться во второй половине XXI века.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин А.Н.; Гринн С.Л.; Дзюбенко Н.И.; Фролов А.Н. 2006. Интерактивный Атлас полезных растений, их вредителей и экологических факторов России и сопредельных государств [Интернет-версия 1.0]. Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербургский Государственный Университет, Факультет Географии. http://www.agroatlas.ru.
2. Белов Д.А. 1998. Вспышка массового размножения непарного шелкопряда в условиях Москвы. Экология, мониторинг и рациональное природопользование. Научн. тр., вып. 294 (1). –М.: МГУЛ. С. 181-190.
3. Васильев В.П., Лившиц И.З. 1984. Вредители плодовых культур. –М.: Колос. 399С.
4. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. –М.: Росгидромет, 2014. (в печати).

5. Гниненко Ю.И. 2000. Некоторые экологические изменения в лесах Сибири: вспышки численности новых видов. В кн.: Проблемы региональной экологии. Материалы всероссийской конференции. Красноярск. С. 174-175.
6. Гниненко Ю.И. 2002. Инвазии чуждых видов в лесные сообщества. Экологическая безопасность и инвазии чужеродных организмов. Сборник материалов Круглого стола Всероссийской конференции по экологической безопасности России (4-5 июня 2002 г.). –М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцева, IUCN (МСОП), С. 65-74.
7. Гниненко Ю.И., Щуров В.И., Лянгузов М.И., Гниненко А.Ю. 2005. Особенности биологии шелкопряда-монашенки в лесах России. Лесоведение. № 5. С. 65-68.
8. Замотайлов А.С., Щуров В.И. 2010. Энтомофауна Северо-Западного Кавказа на современном этапе планетарного развития климата: угрозы и перспективы. Труды Кубанского государственного аграрного университета. № 1 (22). С. 32-39.
9. Ильиных А.В., Кривец С.А. 2011. Результаты феромонного анализа мониторинга непарного шелкопряда *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptera, Lymantriidae) на Юго-востоке Западной Сибири. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 196. –С.-Пб.: СПб ГЛТА. С. 45-53.
10. Кожанчиков И.В. 1950. Фауна СССР. Насекомые чешуекрылые. Т. 12. Волнянки (Orgyidae). –М., –Л.: Изд-во АН СССР. 582 С.
11. Марков В.А. 1995. Развитие шелкопряда-монашенки *Lymantria monacha* L. (Lepidoptera, Lymantriidae) в период нарастания ее численности. Энтомологическое обозрение. Т. 74. № 2. С. 323-341.
12. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов на землях лесного фонда Российской Федерации за 2009 год. 2010. Пущино: ФГУ «Российский центр защиты леса». 179 С.
13. Пономарев В.И. 1992. Экологические и генетико-популяционные особенности непарного шелкорпяда. Препринт. Екатеринбург: УрО РАН. 60 С.
14. Пономарев В.И., Орозумбеков А.А., Мамытов А.М., Кожоев Ш.С. 2005. Затухание перманентной вспышки непарного шелкопряда в орехоплодных лесах. Лесное хозяйство. № 6. С. 45-46.
15. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. –М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.
16. Семенов С.М., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Попов И.О., Титкина С.Н. 2013. Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т.25. (В печати).
17. Соколов Г.И. 2009. Массовое размножение вредителей леса в челябинской области**.** Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 187. –С.-Пб.: СПб ГЛТА. С. 331−342.
18. Ясюкевич В.В., Давидович Е.А., Титкина С.Н., Ясюкевич Н.В. 2013. Изменения климата во второй половине XX – начале XXI веков и связанные с ними изменения климатообусловленных ареалов непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки на территории России и сопредельных стран. Прикладная энтомология. Т.4, № 1 (9). С. (В печати).

19. Giese R.L., Schneider M.L. 1979. Cartographic comparisons of Eurasian gypsy moth distribution (*Lymantria dispar* L.; Lepidoptera: Lymantriidae). Entomological News. V.1, № 1. P. 1-16.
20. Orozumbekov A.A., Liebhold A.M., Ponomarev V.I., Tobin P.C. 2009. Gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) in Central Asia. American entologist. V. 55, N4. P. 258-264.

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЕРЕНОСЧИКОВ НЕКОТОРЫХ БОЛЕЗНЕЙ ЧЕЛОВЕКА В XXI ВЕКЕ В РОССИИ И СОСЕДНИХ СТРАНАХ

*И.О. Попов, С.Н. Титкина, С.М. Семенов, В.В. Ясюкевич**

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. * v1959@yandex.ru

Реферат. В статье приведены оценки климатических ареалов переносчиков ряда болезней человека (иксодовых клещей, комаров *Anopheles* и *Aedes*) в XXI веке при определенных будущих климатах. Эти климаты соответствуют сценариям RCP4.5 и RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, а также увеличению средней глобальной температуры в приповерхностном слое на 1,5°С по отношению к уровню 1981-2000гг. Для всех исследованных видов переносчиков при рассматриваемых изменениях климата характерно существенное расширение ареалов в северном и восточном направлениях. Сокращения ареалов в большинстве случаев не происходит. Исключение составляет *Ixodes persulcatus*, западная граница ареала которого будет смещаться к востоку на протяжении всего XXI века в рамках рассмотренных сценариев RCP. Для *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus* в конце XXI века также отмечено небольшое сокращение ареалов в высокогорных районах Кавказа, а для последнего − и в Приднестровье.

Последствия изменений климата для климатических ареалов рассмотренных переносчиков в соответствии с умеренным RCP4.5 и экстремальным RCP8.5 сценариями в первой половине XXI века близки. Различия (более существенное расширение ареалов в условиях сценария RCP8.5) будут проявляться со второй половине XXI века.

Ключевые слова. Переносчик, болезнь, человек, ареал, изменение климата, сценарий.

MODEL ASSESSMENT OF DISTRIBUTION FOR VECTORS OF SOME HUMAN DISEASES IN XXI CENTURY IN RUSSIA AND ADJACENT COUNTRIES

*I.O. Popov, S.N. Titkina, S.M. Semenov, V.V. Yasukevich**

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, * v1959@yandex.ru

Abstract. Climatic ranges for vectors of some human diseases (ticks *Ixodes*, mosquitoes *Anopheles* and *Aedes*) in the 21st century under certain future climates are presented. The climates correspond to RCP4.5 and RCP8.5 scenarios of anthropogenic impact on the Earth's climate system, and to the global mean temperature rise by 1,5°C vs. 1981-2000 level. For all those changes in climate, substantial northward and eastward expansion of ranges is typical of all the vector species under consideration. In the majority of cases no reduction of ranges occurres. *Ixodes persulcatus* is an exception: western boundary of its range will shift eastward over the whole 21st century under considered RCP-scenarios. Also for *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*, in the end of the 21st entury a moderate reduction of ranges is projected in Caucasus uplands and in Pridnestrovie (for the latter species).

Consequences of climate change for climatic ranges of vectors under consideration corresponding to moderate RCP4.5 and extreme RCP8.5 scenarios are similar in the first half of the 21st century. Differences, namely more pronounced expansion of ranges under RCP8.5, will occur in the second half of the 21st century.

Key words. Vector, disease, human, range, climate change, scenario.

Введение

Оценка распространения переносчиков в условиях предполагаемого потепления является важной составляющей мониторинга последствий изменения климата. Модельные оценки проводились как на основе климатической модели, разработанной в ИГКЭ (Семенов и др., 2013), в которой изменения климата на территории России при глобальном уровне потепления 1,5°С (что приблизительно соответствует превышению доиндустриального уровня на 2°С) даются в сравнении с базовым периодом 1981 − 2000гг., так и на моделях, рассчитанных Главной геофизической обсерватории им. А.И.

Воейкова (ГГО) по параметрам будущего климата, полученным осреднением результатов вычислений по ансамблю из 31 МОЦАО (Моделей Общей Циркуляции Атмосферы и Океана), которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project − Phase 5) и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли семейства RCP (Representative Concentration Pathways): сценарий умеренного воздействия RCP4.5 и сценарий экстремального воздействия RCP8.5. и подробно представленных в разделе 3 Второго оценочного доклада…, 2014.

Методические вопросы, связанные с использованием климатической базы и моделированием ареалов, подробно рассмотрены в монографии С.М. Семенова и др., 2006.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим сначала данные, полученные на базе модели ИГКЭ (Семенов и др., 2013). На рис. 1 и 2 представлены перспективные оценки распространения основных переносчиков клещевого энцефалита и болезни Лайма − клещей *Ixodes persulcatus* и *Ix. ricinus*.Как показано на рис. 1, сокращение ареала *Ix. persulcatus* будет наблюдаться в западной его части, а существенное расширение − на территории Уральского Федерального округа и в Восточной Сибири.

Расширение ареала *Ix. ricinus* будет происходить в северном и восточном направлении на Европейской территории России, создадутся климатические предпосылки для его укоренения на Алтае и Дальнем Востоке.

На рис. 3-5 представлены перспективные оценки распространения малярийных комаров.

Как показано на этих рисунках, ареалы малярийных комаров существенно расширятся, по большей части, за счет смещения северных и восточных границ. Сокращения ареалов не предполагается. Возникнут климатические предпосылки для распространения комаров, зимующих в активном состоянии (*An. superpictus*, *An. sacharovi* и *An. atroparvus*), на Дальнем Востоке. *An. pulcherrimus* на территории России не отмечается, но при заданном уровне потепления возможно его появление в Закавказье, где он отмечался в первой половине XX века

(Гуцевич и др., 1970). При более высоком уровне потепления он может распространиться и в России, в равнинной части Дагестана.

В последнее десятилетие возникла новая биологическая угроза для России − выявление на Черноморском побережье Кавказа желтолихорадочного комара *Aedes aegypti* и азиатского тигрового комара *Ae. albopictus* (Рябова и др., 2005; Юничева и др., 2008; Ганушкина, Дремова, 2011, 2012; Ганушкина и др., 2012). Ниже на рис. 6 и 7 представлены перспективные оценки их распространения на территории России.

Как показано на рис. 6, в 1981−2000 гг. уже существовали условия для укоренения *Ae.aegypti* на Черноморском побережье Кавказа, южной части Крыма, а также восточеом побережье Каспия. При дальнейшем область его распространения на Черноморском побережье расширится, он сможет заселить также западную часть Крыма, стык границ Украины, Молдовы и Румынии, большую часть территории Дагестана.

Распространение *Ae. albopictus* будет существенно большим (рис. 7).

Уже к 1981−2000 гг. существовали климатические предпосылки его укоренения в Калининградской области, в Крыму, Грузии, большей части Северо-Кавказского ФО РФ, восточном берегу Каспия и крайнем юге Узбекистана. При дальнейшем потеплении появится возможность его акклиматизации на большей части территории стран Балтии, Белоруссии, Украины, западных областях России.

Следующая часть раздела посвящена оценкам распространения переносчиков по моделям, рассчитанным Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) по параметрам будущего климата, полученным осреднением результатов вычислений по ансамблю из 31 МОЦАО (Моделей Общей Циркуляции Атмосферы и Океана), которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project − Phase 5) и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли семейства RCP (Representative Concentration Pathways): сценарий умеренного воздействия RCP4.5 и сценарий экстремального воздействия RCP8.5. Эти сценарии подробно рассмотрены в разделе 3 Второго оценочного доклада…, 2014. Оценки получены для следующих временных периодов в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг. (s1):

- ✓ s2 – 2011-2030 гг.
- ✓ s3 – 2034-2053 гг. для RCP4.5 или 2028-2047 гг. для RCP8.5 (переход глобального интеграла через 2°C)
- ✓ s4 – 2041-2060 гг.
- ✓ s5 – 2080-2099 гг.

На рис. 8 показано изменение ареала *Ixodes persulcatus* в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5, а на рис. 9 − экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5.

Как показано на этих рисунках, предполагаемые изменения климата вызовут сокращение ареала *Ix. persulcatus* в западной части рассматриваемой территории и расширению его в северном и восточном направлениях. К концу XXI века этот вид может заселить весь север Европейской части России и большую часть Сибири до 70° с.ш. В то же время в странах Балтии, Белоруссии, северной части Украины и западных областях России *Ix. persulcatus* исчезнет.

Аналогично, на рис. 10 показано изменение ареала *Ix. ricinus* в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5, а на рис. 11 − экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5 Сокращение ареала *Ix. ricinus* не прогнозируется. По мере предполагаемого потепления его ареал будет расширяться в северном и восточном направлениях. К концу XXI века этот вид может заселить север Европейской части России и значительную часть Западной Сибири до озера Байкал. Появятся климатические предпосылки для его укоренения на Дальнем Востоке и Камчатке.

Как на рис. 8 и 9 (*Ix. persulcatus*), так и на рис. 10 и 11 (*Ix. ricinus*) позиции а) и б) практически не отличаются. Это означает, что климатическое воздействие в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 в периоды 2011-2030 гг. и 2028-2047 гг. и 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°C) для RCP4.5 и RCP8.5 соответственно на каждый из видов клещей сказывается одинаково. Наоборот, позиции в) и г) (периоды 2041-2060 гг. и 2080-2099 гг.) на этих рисунках существенно различаются. Таким образом, расхождение по степени климатического воздействия на ареалы клещей между сценариями RCP4.5 и RCP8.5 начнет сказываться с 40-х годов XXI века.

Становление ареала *Ix. ricinus* тесно связано с историей европейских мезофильных лесов. В настоящее время этот вид обитает в смешанных и широколиственных лесах от побережья Атлантики до Среднего Поволжья. Предположительно, в плиоцене граница его ареала проходила существенно восточнее, а в конце плиоцена − плейстоцене он был оттеснен к западу под воздействием тайги с севера и степей с юга (Филиппова, 1973). Становление ареала *Ix. persulcatus* связано с таежными ландшафтами. Видимо, в верхнем плиоцене ареал *Ix. persulcatus* ограничивался восточными районами и только в ледниковый период расширился к западу (Филиппова, 1971). Таким образом, предполагаемое потепление будет способствовать процессам изменения ареалов клещей, обратным тем, которые происходили в более ранние исторические периоды.

На рис. 12 и 13 представлены групповые модельные ареалы экологической группы малярийных комаров, зимующих в активном состоянии и периодически питающихся кровью, построенные в соответствии со сценариями изменения климата ГГО. К ним относятся: *An. superpictus* (Средняя Азия, Закавказье, Дагестан), *An. sacharovi* (равнины Закавказья и Дагестана) и *An. atroparvus* (Закавказье, Северный Кавказ, и далее, к западу от Каспия). Представители этой группы являются наиболее опасными переносчиками малярии на рассматриваемой территории.

Как показано на этих рисунках, сокращения комплексного ареала комаров этой экологической группы происходить не будет. Расширение ареала произойдет в восточном и северном направлениях. Возникнут климатические предпосылки для укоренения этих видов комаров на севере Европейской части России, Дальнем Востоке, Камчатке и Чукотке. Причем, реализация этих предпосылок по сценарию RCP4.5 маловероятна в силу особенностей их биологии (нестойкость яиц к высыханию и др., что делает проблематичным завоз этих видов в изолированные от основного ареала области, пусть даже и пригодные по климатическим условиям). Аналогичным образом представляется и возможность заселения Дальневосточных регионов в соответствии со сценарием RCP8.5. В то же время, заселение Европейского севера в соответствии со сценарием RCP8.5 более вероятно, так как на рис. 13 на позициях от а) к г) можно видеть последовательное расширение основной части ареала, которое к концу XXI века захватит и север.

Как и в отношении иксодовых клещей, климатическое воздействие в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 в периоды 2011-2030 гг. и 2028-2047 гг. и 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°C) для RCP4.5 и RCP8.5 соответственно на переносчиков малярии скажется одинаково. Расхождение же по степени климатического воздействия между сценариями RCP4.5 и RCP8.5 будет проявляться с середины XXI века.

На рис. 14 и 15 анализируется возможность распространения желтолихорадочного комара *Ae. aegypti*. Как и в предыдущих случаях, климатическое воздействие на ареал этого переносчика в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 в первой половине XXI века не различается. Во второй половине XXI века изменения климата по сценарию RCP8.5 будут способствовать более существенному расширению потенциального ареала, чем по сценарию RCP4.5. В базовый период 1981−2000 гг. уже существовали климатические предпосылки его существования на Черноморском побережье Кавказа, в Крыму, Грузии и Азербайджане, которые частично реализуются с 2001 года по настоящее время (Ганушкина и др., 2013). При дальнейшем изменении климата его ареал будет расширяться, и в предельном случае будет включать Краснодарский и Ставропольский края, южную часть Ростовской области, Дагестан, Калининградскую область, Молдову, южную часть Украины, западную часть Беларуси, примыкающие к побережью Балтийского моря районы Литвы, Латвии и Эстонии. Возможно его нахождение на локальных участках Кольского полуострова, полуострова Канин, крайнем юге Сахалина и охотском побережье Камчатки. Сокращение ареала выявлено только в высокогорье на границе Грузии и Армении (рис. 15г, сценарий RCP8.5, период 2080-2099 гг.).

На рис. 16 и 17 показано возможное изменение ареала азиатского тигрового комара *Ae. albopictus* в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5. Закономерности распространения этого вида те же, что были изложены выше для *Ae. aegypti.* Однако, в силу большей морозоустойчивости он способен распространиться гораздо шире последнего.

Так, к концу XXI века он сможет заселить не только южные, но и западные области России, всю Украину, Беларусь, Литву, Латвию и Эстонию. Появятся климатические предпосылки для его укоренения на

отдельных участках побережья Белого и Баренцева морей, в Приморье, Камчатке, южной части Сахалина. Заметим, что первичный ареал этого вида включает в себя Японию, кроме северного острова Хоккайдо (Kobayashi et al., 2002; Kobayashi et al., 2008). Это облегчает его проникновение на российский Дальний Восток. Сокращение потенциального ареала может наблюдаться в Приднестровье и высокогорных районах Кавказа (рис. 17г).

Как для *Ae. aegypti*, так и для *Ae. albopictus* заселение отдельных, не связанных с основным ареалом, но пригодным по климатическим условиям, участков представляется более вероятным, чем для комаров *Anopheles*. Это связано с тем, что яйца *Aedes* по завершении эмбриогенеза сохраняют жизнеспособность в сухом состоянии в течение нескольких месяцев и могут быть перевезены за это время с различными товарами, материалами и т.д. на большие расстояния. Кроме того, личинки комаров этих видов могут развиваться в самых разных по размеру и степени эвтрификации водоемах, вплоть до залитых дождевой водой консервных банок.

Рис. 1. *Перспективная оценка распространения Ixodes persulcatus при глобальном уровне потепления 1,5°C по сравнению с периодом 1981–2000 гг. Обозначения: 0 – переносчик отсутствует; 1 – сокращение ареала; 2 – расширение ареала; 3 – переносчик присутствовал как в 1981-2000 гг., так и будет присутствовать в будущем.*

Рис. 2. *Перспективная оценка распространения Ixodes ricinus при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981–2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

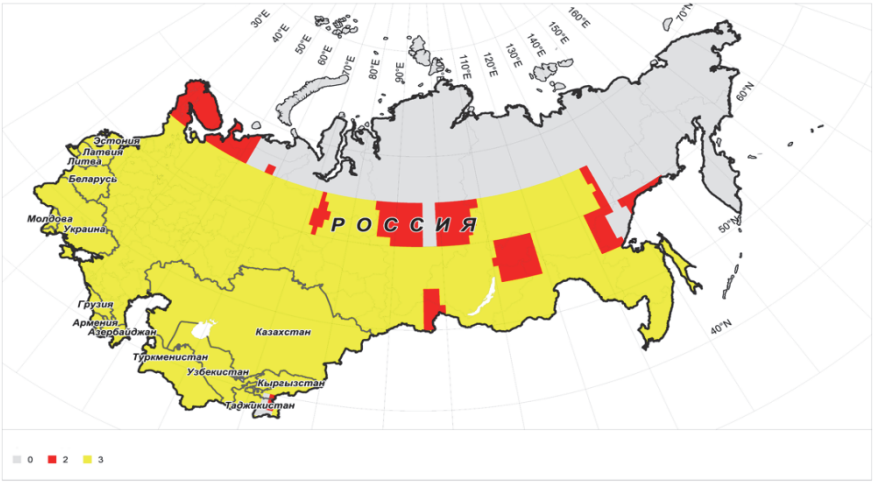

Рис. 3. *Перспективная оценка распространения комплекса видов An.maculipennis при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981–2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 4. *Перспективная оценка распространения экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии, при глобальном уровне потепления 1,5°C по сравнению с периодом 1981–2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 5. *Перспективная оценка распространения An. pulcherrimus при глобальном уровне потепления 1,5°C по сравнению с периодом 1981–2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 6. *Перспективная оценка распространения Ae.aegypti при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981−2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 7. *Перспективная оценка распространения Ae. albopictus при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981-2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

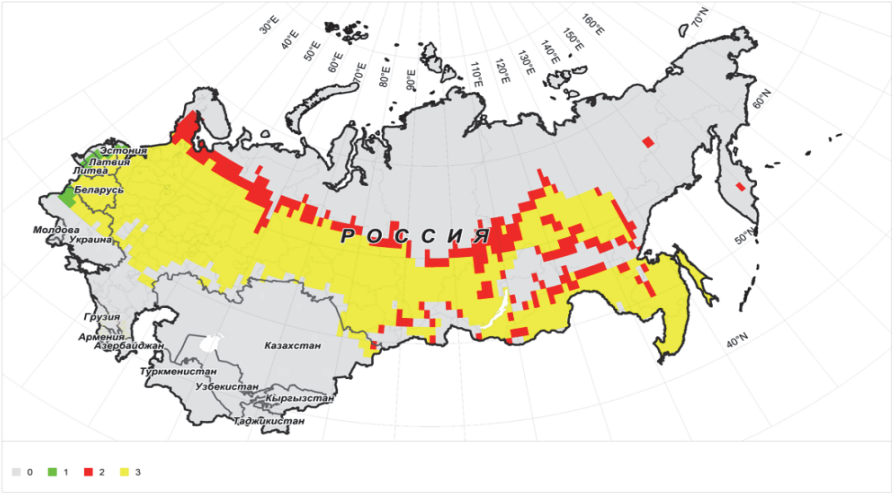

Рис. 8а.

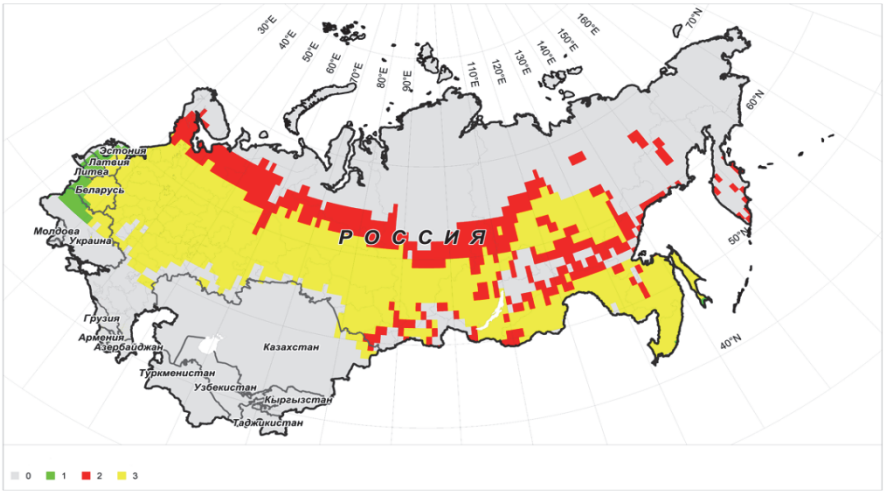

Рис. 8б.

Рис. 8 а, б. *Изменение ареала Ix. persulcatus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1.*

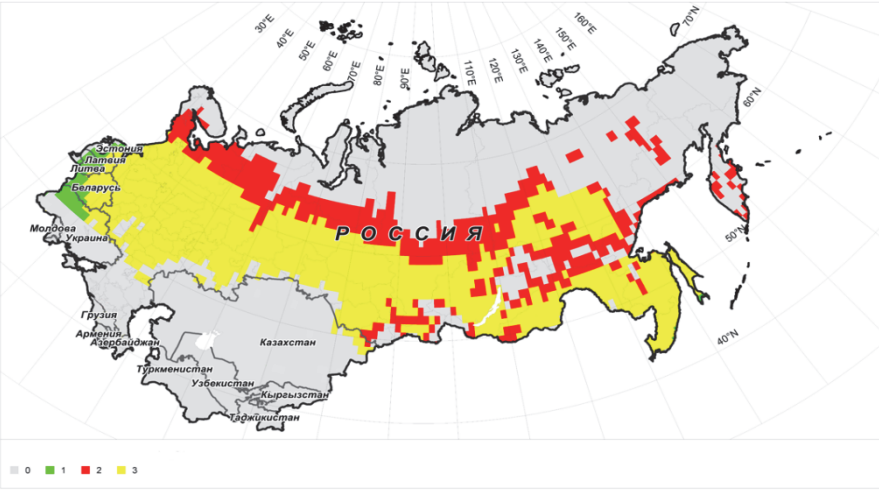

Рис. 8в.

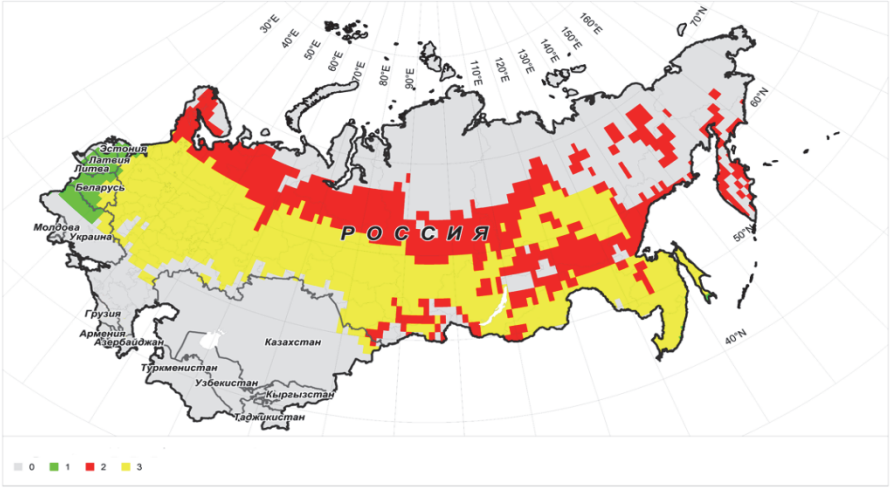

Рис. 8г.

Рис. 8 в, г. *Изменение ареала Ix. persulcatus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1.*

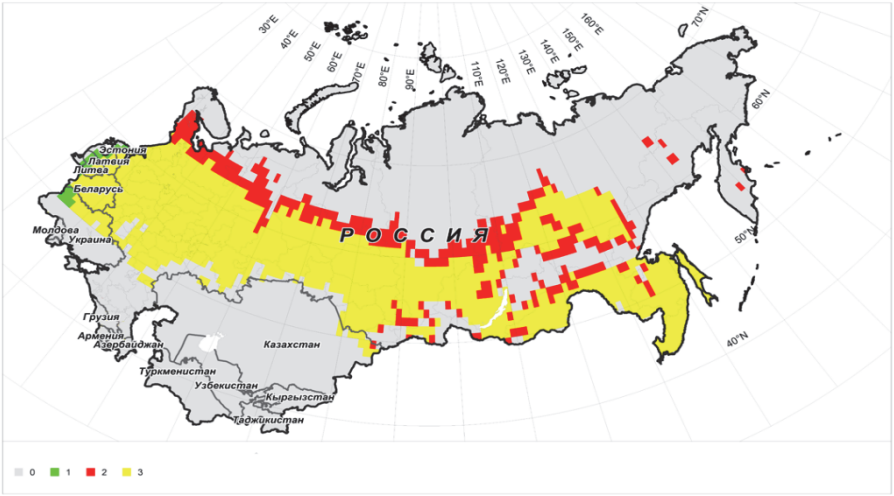

Рис. 9а.

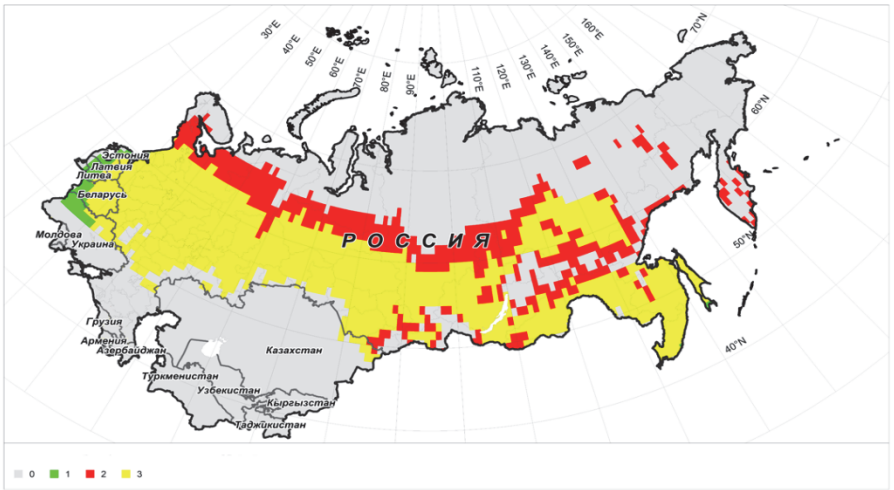

Рис. 9б.

Рис. 9 а, б. *Изменение ареала Ix. persulcatus в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1.*

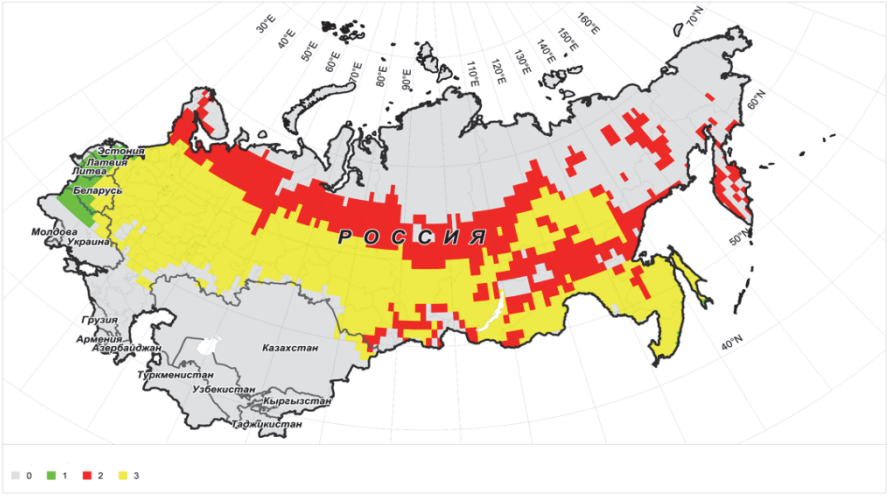

Рис. 9в.

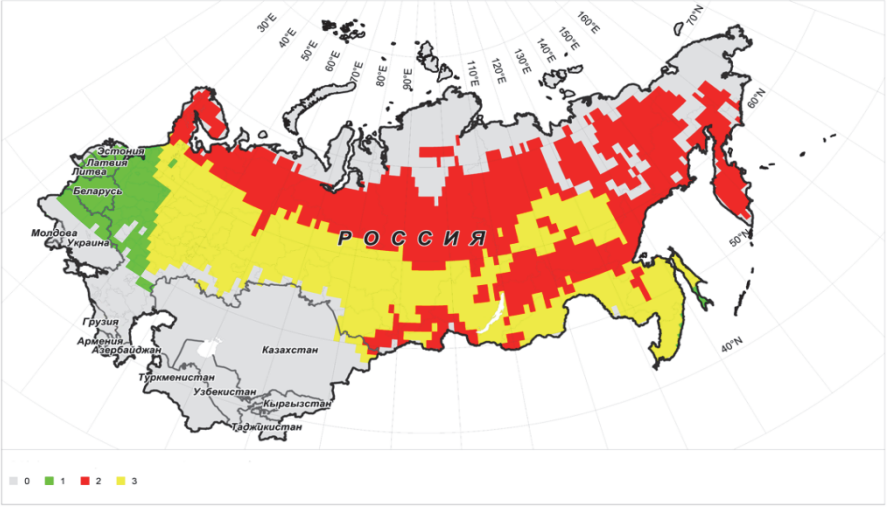

Рис. 9г.

Рис. 9 в, г. *Изменение ареала Ix. persulcatus в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1.*

Рис. 10а.

Рис. 10б.

Рис. 10 а, б. *Изменение ареала Ix. ricinus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С), Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 10в.

Рис. 10г.

Рис. 10 в, г. *Изменение ареала Ix. ricinus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 11а.

Рис. 11б.

Рис. 11 а, б. *Изменение ареала Ix. ricinus в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 11в.

Рис. 11г.

Рис. 11 в, г. *Изменение ареала Ix. ricinus в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 12а.

Рис. 12б.

Рис. 12 а, б. *Изменение ареала экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии, в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 12в.

Рис. 12г.

Рис. 12 в, г. *Изменение ареала экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии, в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 13а.

Рис. 13б.

Рис. 13 а, б. *Изменение ареала экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии, в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 13в.

Рис. 13г.

Рис. 13 в, г. *Изменение ареала экологической группы комаров, зимующих в активном состоянии, в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 14а.

Рис. 14б.

Рис. 14 а, б. *Изменение ареала Ae. aegypti в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 14в.

Рис. 14г.

Рис. 14. *Изменение ареала Ae. aegypti в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 15а.

Рис. 15б.

Рис. 15 а, б. *Изменение ареала Ae. aegypti в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1.*

Рис. 15в.

Рис. 15г.

Рис. 15 в, г. *Изменение ареала Ae. aegypti в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1.*

Рис. 16а.

Рис. 16б.

Рис. 16 а, б. *Изменение ареала Ae. albopictus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 16в.

Рис. 16г.

Рис. 16 в, г. *Изменение ареала Ae. albopictus в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

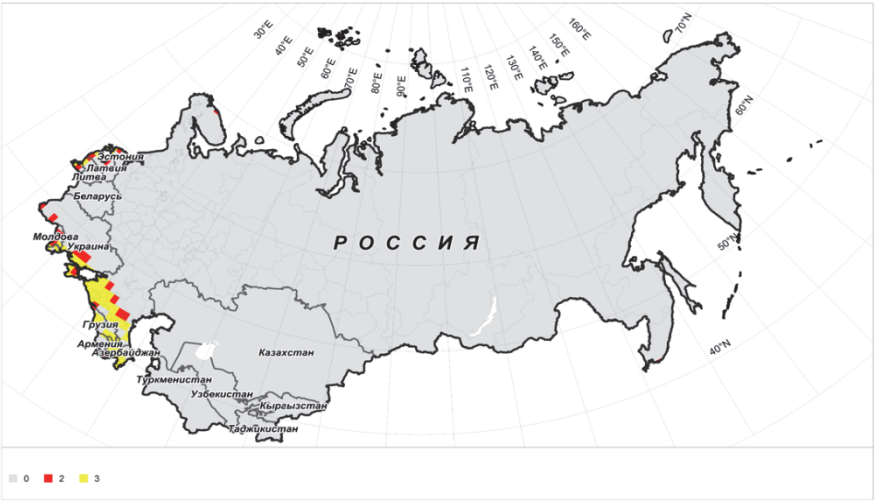

Рис. 17а.

Рис. 17б.

Рис. 17. *Изменение ареала Ae. albopictus в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1.*

Рис. 17в.

Рис. 17г.

Рис. 17 в, г. *Изменение ареала Ae. albopictus в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1.*

Заключение

Таким образом, для всех исследованных видов переносчиков по мере предполагаемого изменения климата характерно существенное расширение ареалов в северном и восточном направлениях. Сокращения ареалов в большинстве случаев не произойдет. Исключение составляет *Ix. persulcatus*, западная граница ареала которого на протяжении всего XXI века будет смещаться к востоку. Для *Ae. aegypti*, и *Ae. albopictus* в конце XXI века отмечено небольшое сокращение ареалов в высокогорных районах Кавказа, а для последнего − и в Приднестровье.

Воздействие на ареалы переносчиков изменений климата в соответствии со сценариями ГГО умеренного RCP4.5 и экстремального RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему в первой половине XXI века одинаково. Различия (более существенное расширение ареалов по сценарию RCP8.5) будут проявляться во второй половине XXI века.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. –М.: Росгидромет, 2014. (в печати).
2. Ганушкина Л.А., Дремова В.П. 2011. Комары *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus* – переносчики арбовирусных инфекций, биология, экология, распространение, отличительные признаки видов. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 4. С. 24-28.
3. Ганушкина Л.А., Дремова В.П. 2012. Комары *Aedes aegypti* L. и *Aedes albopictus* Skuse – новая биологическая угроза для юга России. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 49-55.
4. Ганушкина Л.А., Таныгина Е.Ю., Безжонова О.В., Сергиев В.П. 2012. Об обнаружении комаров *Aedes (Stegomyia) albopictus Skus.* на териитории Российской Федерации. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 3-4.
5. Ганушкина Л.А., Безжонова О.В., Патраман И.В., Таныгина Е.Ю., Сергиев В.П. 2013. Распространение комаров *Aedes (Stegomyia) aegypti* L. и *Aedes (Stegomyia) albopictus* Skus. на Черноморском побережье Кавказа. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №1. С. 45-46.
6. Гуцевич В.А., Мончадский А.С., Штакельберг А.А. 1970. Комары (семейство *Culicidae*). Фауна СССР. Насекомые двукрылые.Т. 3, Вып. 4. –Л.: Наука. 384 С.
7. Рябова Т.Е., Юничева Ю.В., Маркович Н.Я., Ганушкина Л.А., Орабей Г.В., Сергиев В.П. 2005. Обнаружение комаров *Aedes (Stegomyia) aegypti* L. В г.Сочи. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №3. С. 3-5.
8. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. –М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.

9. Семенов С.М., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Попов И.О., Титкина С.Н. 2013. Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –М.: ИГКЭ. Т. 25. (В печати).
10. Филиппова Н.А. 1971. О видах группы *Ixodes persulcatus* (Parasitiiormes, Ixodidae). Особенности ареалов *I. pavlovskyi* Pom. и *I. persulcatus* Schulze в связи с их палеогенезом. Паразитология. Т. 5, № 5. С. 385-391.
11. Филиппова Н.А. 1973. О видах группы *Ixodes persulcatus* (Parasitiformes, Ixodidae). 7. Патогенез южной ветви группы *Ixodes persulcatus* и взаимоотношения с *I. ricinus* (L.). Паразитология. Т. 7, С. 3-13.
12. Юничева Ю.В., Рябова Т.Е., Маркович Н.Я., Безжонова О.В. И др. 2008. Первые данные о наличии размножающейся популяции комаров *Aedes aegypti* L. в районе Большого Сочи и в отдельных городах Абхазии. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 3. С. 40-43.
13. Kobayashi M., Nihei N., Kurihara T. 2002. Analysis of Northern Distribution of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Japan by Geographical Information System. J. Med. Entomol. V. 39, № 1. P. 4-11.
14. Kobayashi M., Komagata O., Nihei N. 2008. GlobalWarming and Vector-borne Infectious Diseases. Journal of Disaster Research. V.3, № 2. P. 105-112.

МОНИТОРИНГ ЛИШАЙНИКОВ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА В КАТОН-КАРАГАЙСКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ ПРИРОДНОМ ПАРКЕ (ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН)

Е.А. Давыдов[1)], Г.Э. Инсаров[2)], А.К. Сундетпаев[3)]

[1)]Россия, 656049 Барнаул, пр. Ленина, д. 61, Алтайский государственный университет; Россия, 656049 Барнаул, ул. Никитина, 111. Государственный природный заповедник «Тигирекский». eadavydov@yandex.ru

[2)]Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН; Россия; 119017 Москва, Старомонетный пер., д. 29, Институт географии РАН. insarov@lichenfield.com

[3)]Республика Казахстан, Восточно-Казахстанская область, Катон-Карагайский район, 070908 с. Катон-Карагай, ул. О.Бокеева, д. 115. Катон-Карагайский государственный национальный природный парк. sundetpaevagadil@mail.ru

Реферат. В Катон-Карагайском государственном национальном природном парке апробирована методика оценки изменений в сообществах лишайников в связи с изменениями климата. Охарактеризован видовой состав лишайников, произрастающих на каменных россыпях из крупнообломочного материала (курумах) в пределах высокогорного пояса и верхней части лесного пояса от 1460 до 2740 м над уровнем моря; выявлено 82 вида лишайников-эпилитов. Намечены экологические группы видов лишайников, различным образом изменяющих встречаемость и проективное покрытие в сообществах при движении по высотному градиенту. Виды, приуроченные к верхней полосе высокогорий, при дальнейшем потеплении могут исчезнуть с территории Парка и Алтая в целом.

Ключевые слова. Эпилитные лишайники, мониторинг, изменение климата, потепление, Алтай, Восточный Казахстан, Центральная Азия

LICHEN MONITORING IN KATON-KARAGAI NATIONAL PARK, EASTERN KAZAKHSTAN, IN CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

E.A. Davydov[1)], G.E Insarov[2)], A.K. Sundetpaev[3)]

[1)]Altai State University, 61 Lenin Avenue, 656049 Barnaul, Russia, and Tigirek State Natural Reserve, 111 Nikitin Street, 656049 Barnaul, Russia. eadavydov@yandex.ru

[2)]Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and Russian Academy of Sciences, 20b Glebovskaya Street, 107258 Moscow, Russia, and Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetny Lane, 119017 Moscow, Russia. insarov@lichenfield.com

[3)] Katon-Karagai National Park, 115 Bokeev Street, 070908 Katon-Karagai, Kazakhstan. sundetpaevagadil@mail.ru

Abstract. Method for assessment of change in epilithic lichen communities under climatic stress is tested in Altai Mountains, Kazakhstan. Lichens on large fragmental rocks are studied along altitudinal gradient from 1460 to 2740 m above sea level in alpine belt, and in upper forest belt; 82 lichen species were found. Ecological groups of lichens differently modifying their occurrence and projective cover in the communities along the altitudinal gradient are outlined. Lichen species associated with the upper alpine zone are considered as threatened in Altai Mountains under further global warming.

Kew words. Epilithic lichens, monitoring, climate change, global warming, Altai Mountains, Eastern Kazakhstan, Central Asia.

Введение

Тенденция повышения температуры воздуха на Алтае прослеживается с начала XVIII века по палеореконструкциям (Eichler et al., 2009; Okamoto et al., 2011). В течение последних 70-ти лет повышение температуры наблюдалось во все сезоны года по инструментальным наблюдениям практически повсеместно на территории Казахстана. Среднегодовая температура воздуха в Казахстане в этот период возрастала со скоростью 0,26°С каждые 10 лет, эта скорость выше, чем скорость увеличения среднегодовой глобальной температуры (IPCC, 2007). Анализ данных гидрометеостанции «Катон-Карагай», ближайшей к Катон-Карагайскому национальному природному парку, за последние 40 лет также выявил рост средней годовой температуры воздуха (Долгих, 2011). Отмеченное в течение последних 50-ти лет сокращение площади ледников Алтая связывают с повышением летних температур воздуха в этот период (Shahgedanova et al., 2010; Aizen, 2011).

Изменение температуры воздуха и осадков в приземном слое атмосферы вызывает ответную реакцию лишайников как на уровне организма, так и на уровне сообществ. Лишайники произрастают на

различных субстратах повсеместно, кроме территорий, постоянно покрытых снегом или льдом. В горах они встречаются во всех поясах. Лишайники используются для мониторинга отклика биоты на климатический стресс (см. Инсаров, 2002 и другие ссылки в этой работе). В ходе нашего исследования наблюдения проводились за сообществами эпилитных лишайников, так как их собственная изменчивость относительно невелика. Собственная изменчивость сообществ лишайников маскирует те изменения, которые вызываются изменениями климата. При долгосрочном мониторинге лишайников, находящихся в условиях климатических изменений, собственная изменчивость рассматривается как «шум» (Инсаров, 2002).

Определение чувствительности лишайников к изменению температуры проводится путем изучения сообществ лишайников вдоль климатических градиентов (Insarov, Insarova, 2002). В горах климатические характеристики меняются с высотой над уровнем моря, поэтому чувствительность лишайников можно оценить с помощью исследований сообществ лишайников вдоль высотного градиента. По прогнозам Межправительственной группы экспертов по изменению климата, наиболее значительные изменения климата ожидаются в горных и полярных областях (IPCC, 2007). Режим особо охраняемых природных территорий (ООПТ) обеспечивает отсутствие таких антропогенных воздействий на биоту ООПТ, как строительство, прокладка дорог, добыча полезных ископаемых, загрязнение природных сред, рубка леса или минимизирует эти воздействия. Поэтому большое значение приобретает изучение отклика биоты на изменение климата с помощью лишайников на особо охраняемых природных территориях в горах.

Изучение эпилитных лишайников в российской части Алтае-Саянского экорегиона (АСЭ) было начато в Катунском государственном биосферном заповеднике и в Природном парке «Белуха» в 2008-2009 годах (Инсаров, 2010). В рамках трансграничного сотрудничества особо охраняемых природных территорий АСЭ, в Катон-Карагайском государственном национальном природном парке проводится долговременный мониторинг сообществ эпилитных лишайников в связи с изменением климата Алтая. Цели исследования следующие: (1) предложить методологию выявления изменений в сообществах лишайников в Катон-Карагайском национальном природном парке, вызванных

изменениями климата; (2) провести базовое исследование, на основании которого последующие изменения в сообществах лишайников могут быть определены и оценены количественно.

В качестве необходимого первого шага в 2011-2012 годах проведены рекогносцировочные исследования, включающие изучение видового состава лишайников на каменных россыпях. Результаты этого изучения представлены в настоящей статье.

Природные условия Катон-Карагайского государственного национального природного парка

Парк находится в Катон-Карагайском районе Восточно-Казахстанской области, граница Парка частично проходит по границе Казахстана с Россией и Китаем. Со стороны России к территории Парка примыкают Катунский биосферный заповедник, природный парк «Белуха» и природный парк «Зона покоя Укок», со стороны Китая – природный заповедник «Канас».

Большая часть территории Парка относится к Южному Алтаю, горной стране, состоящей из системы субширотно простирающихся горных хребтов и разделяющих их межгорных понижений. В пределы Парка вошли хребты Сарым-Сакты, Тарбагатай Алтайский и Южный Алтай, а также западная часть плато Укок, южные макросклоны хребтов Листвяга и Катунский. Северные склоны хребтов – крутые уступообразные, южные – относительно длинные и пологие. Хребты Катунский (высшая точка – г. Белуха (4506 м над ур. м.) и Южный Алтай (3400 – 3500 м вблизи плато Укок) – альпийского типа, здесь расположены два центра современного оледенения. Остальные хребты более сглажены (Геология СССР, 1967; Катон-Карагайский …, 2008). Геология Парка описана в книге Геология СССР (1967), растительный и животный мир – в книге Катон-Карагайский государственный национальный природный парк (2008).

Климат Парка резко континентальный, с большой амплитудой суточных, сезонных и среднегодовых колебаний температуры воздуха. Для территории Парка характерна сильная изменчивость метеорологических параметров (температуры, влажности, облачности и т.д.), что обусловлено строением рельефа и влиянием близлежащих ледников. Разнообразие форм рельефа приводит к образованию на сравнительно небольшой площади ряда микроклиматов, которым в равнинных условиях соответствуют

расстояния в сотни, а иногда и тысячи километров. По данным гидрометеорологической станции «Катон-Карагай» (1081 м над ур. м.), которые можно считать репрезентативными для центральной части территории парка, средние за 1971-2000 гг. характеристики имеют следующие значения. Температура приземного воздуха: годовая – 2,0°С, июля – 16,8°С; количество атмосферных осадков: годовое – 424,3 мм, июля – 57,5 мм; относительная влажность воздуха: годовая – 64%, июля – 66%. Число дней со снегом – 194. Средняя многолетняя высота снега за зиму составляет 30 см, при максимуме 74 см и минимуме 9 см. В среднегорной зоне, мощность снежного покрова колеблется от 70 до 250 см, в высокогорной превышает 250 см (Катон-Карагайский …, 2008; Долгих, 2011; Огарь, 2010; Desmet et al., 2011).

Повышение средней годовой температуры воздуха за последние десятилетия не сопровождается изменениями в количестве и характере осадков. Относительная влажность воздуха также не изменилась (Долгих, 2011). Такое сочетание тенденций в режимах температуры и количества осадков ведет к увеличению засушливости климата, сокращению периода, когда осадки выпадают в твердом виде, к увеличению высоты нулевой изотермы в горных районах, то есть к сокращению зон, где осадки выпадают в твердом виде. Тем самым уменьшается среднее число дней со снежным покровом и увеличивается период, когда происходит фотосинтез и рост эпилитных лишайников.

Материал и методы исследования

Исследования проведены в пределах верхней части лесного пояса и в высокогорном поясе хребтов Тарбагатай Алтайский, Южный Алтай, Катунский, Листвяга и плоскогорья Укок. В ходе работы на выположенных участках каменных россыпей из крупнообломочного материала (курумов) заложены 17 пробных площадей в диапазоне высот от 1460 до 2740 м над ур. м. На каждой пробной площади на горизонтальной поверхности пяти выбранных случайным образом камней выполнены геоботанические описания лишайникового покрова и собрана коллекция эпилитных лишайников. Также для учета лишайников опробован модифицированный метод линейных пересечений (Инсаров, 2002). Гербарный материал определялся с помощью стандартных методик

световой микроскопии. Образцы хранятся в гербарии Алтайского государственного университета (ALTB).

Аннотированный список видов

В ходе работы выявлено 82 вида эпилитных лишайников; значительная часть материала требует дальнейшего изучения. Впервые для территории Катон-Карагайского национального парка в настоящей работе приводятся 72 вида; 10 видов лишайников были указаны впервые для Казахстана ранее (Davydov et al., 2012).

- ***Acarospora cervina* A. Massal.** – часто среди других лишайников, но в небольшом обилии на валунах и скалах. Здесь и далее под обилием вида мы понимаем его проективное покрытие.
- ***Arctoparmelia centrifuga* (L.) Hale** – не часто, но местами обильно, в условиях повышенной влажности воздуха в высокогорном поясе.
- ***Aspicilia aquatica* Körb.** – в водотоках и других местообитаниях, значительную часть года остающихся под водой.
- ***Aspicilia cinerea* (L.) Körb.** – постоянный вид эпилитных сообществ в лесном поясе и нижней полосе высокогорий, с высотой встречаемость падает, и вид замещается другими видами аспицилий, которые требуют дальнейшего изучения для их точной идентификации.
- ***Bacidina inundata* (Fr.) Vězda** – на силикатных камнях, нередко заливаемых водой по берегам водотоков.
- ***Bellemerea alpina* (Sommerf.) Clauzade & Cl. Roux** – единично встречен в высокогорном поясе.
- ***Brodoa oroarctica* (Krog) Goward** – довольно часто в высокогорных сообществах; постоянный вид эпилитно-лишайниковых тундр.
- ***Calvitimela aglaea* (Sommerf.) Hafellner** – часто, но в малом обилии в верхней части высокогорного пояса, обилие с высотой увеличивается.

- ***Calvitimela armeniaca* (DC.) Hafellner** – часто, но в малом обилии в верхней части высокогорного пояса, обилие с высотой увеличивается.
- ***Candelariella aurella* (Hoffm.) Zahlbr.** – часто, но в малом обилии в лесном и высокогорном поясах.
- ***Candelariella vitellina* (Ehrh.) Müll. Arg.** – часто, но в малом обилии в лесном и высокогорном поясах.
- ***Carbonea vorticosa* (Flörke) Hertel.** – часто, но в малом обилии в высокогорном поясе.
- ***Dimelaena oreina* (Ach.) Norman** – постоянный вид на недавно обнажившихся экспонированных поверхностях камней.
- ***Immersaria athroocarpa* (Ach.) Rambold & Pietschm.** – встречается достаточно редко, но талломы, как правило, довольно крупные.
- ***Immersaria cupreoatra* (Nyl.) Calat. et Rambold** – постоянный вид высокогорных эпилитных сообществ.
- ***Lasallia pennsylvanica* (Hoffm.) Llano** – довольно часто в лесном и высокогорном поясе, иногда на поздних стадиях зарастания валунов образует одновидовые сообщества.
- ***Lasallia pertusa* (Rass.) Llano** – на экспонированных скалах в относительно сухих условиях, в горных степях.
- ***Lasallia rossica* Dombr.** – часто, в относительно влажных условиях лесного и высокогорного поясов.
- ***Lecanora argopholis* (Ach.) Ach.** – на экспонированных скалах в относительно сухих условиях, в горных степях.
- ***Lecanora baicalensis* Zahlbr.** – на экспонированных скалах вместе с *Dimelaena oreina*.
- ***Lecanora bicincta* Ramond** – часто в высокогорном поясе и верхней части лесного.
- ***Lecanora campestris* (Schaer.) Hue** – на силикатных скалах в высокогорном поясе и верхней части лесного.

- ***Lecanora intricata* (Ach.) Ach.** – часто но в малом обилии во влажных условиях высокогорного пояса и в верхней части лесного.
- ***Lecanora polytropa* (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh.** – постоянный вид на силикатных камнях во влажных условиях высокогорного пояса.
- ***Lecidea atrobrunnea* (Ramond ex Lam. & DC.) Schaer.** – спорадически на силикатных камнях в высокогорном поясе.
- ***Lecidea confluens* (Weber) Ach.** – нередко на силикатных скалах в высокогорном поясе.
- ***Lecidea lapicida* (Ach.) Ach. var. *pantherina* Ach.** – часто на силикатных камнях в высокогорном поясе.
- ***Lecidea paratropoides* Müll.Arg.** – редко на силикатных камнях в высокогорном поясе.
- ***Lecidella carpathica* Körb.** – часто, но в малом обилии на экспонированных скалах в высокогорном поясе
- ***Lecidella stigmatea* (Ach.) Hertel et Leuckert** – нередко на скалах в лесном и высокогорном поясе.
- ***Melanelia disjuncta* (Erichsen) Essl.** – нередко на скалах и курумах в лесном и высокогорном поясе.
- ***Melanelia stygia* (L.) Essl.** – нередко на скалах и курумах в лесном и высокогорном поясе.
- ***Melanelia tominii* (Oxner) Essl.** – постоянный вид эпилитных сообществ на курумах.
- ***Melanohalea infumata* (Nyl.) O. Blanco & al.** – на камнях в верхней части лесного пояса.
- ***Miriquidica deusta* (Stenh.) Hertel & Rambold** – не часто на камнях в высокогорном поясе.
- ***Ophioparma ventosa* (L.) Norman** – на камнях в верхней части высокогорного пояса.
- ***Parmelia omphalodes* (L.) Ach.** – на каменистом субстрате и почве в высокогорном и лесном поясах.

- ***Parmelia saxatilis* (L.) Ach.** – на каменистом субстрате, иногда на древесине в лесном и высокогорном поясах.
- ***Physcia caesia* (Hoffm.) Fürnr.** – на скалах в горно-степных фитоценозах; нитрофил.
- ***Porpidia crustulata* (Ach.) Hertel et Knoph** – на камнях во влажных условиях высокогорного пояса.
- ***Porpidia macrocarpa* (DC.) Hertel & A. J. Schwab** – на камнях во влажных условиях высокогорного по яса.
- ***Protoparmelia badia* (Hoffm.) Haffelner** – постоянный вид на скалах во влажных условиях высокогорного пояса.
- ***Protoparmelia cupreobadia* (Nyl.) Poelt** – постоянный вид на курумах в высокогорном поясе (Davydov et al. 2012).
- ***Pseudephebe minuscula* (Nyl. ex Arnold) Brodo & D. Hawksw.** – нередко, но в малом обилии, на скалах в высокогорном поясе.
- ***Ramalina capitata* (Ach.) Nyl.** – на скалах в горно-степных фитоценозах.
- ***Rhizocarpon badioatrum* (Flörke ex Spreng) Th. Fr.** – нередко во влажных условиях высокогорного пояса.
- ***Rhizocarpon disporum* (Nägeli ex Hepp) Müll.Arg.** – нередко на скалах высокогорного пояса.
- ***Rhizocarpon effiguratum* (Anzi) Th.Fr.** – нередко в несомкнутых сообществах в верхней части высокогорного пояса (Davydov et al. 2012).
- ***Rhizocarpon eupetraeum* (Nyl.) Arnold** – спорадически встречается в высокогорном поясе.
- ***Rhizocarpon geographicum* (L.) DC.** – постоянный вид на камнях в высокогорном поясе в широком диапазоне высот.
- ***Rhizocarpon lecanorinum* Anders** – спорадически встречается в высокогорном поясе.
- ***Rhizocarpon pusillum* Runemark** – паразитирует на *Sporastatia* spp., реже на других видах в верхней части высокогорного пояса (Davydov et al. 2012).

- ***Rhizocarpon subgeminatum*** **Eitner** – спорадически встречается в высокогорном и лесном поясе.
- ***Rhizocarpon superficiale*** **(Schaer.) Malme** – спорадически встречается в высокогорном поясе.
- ***Rhizoplaca chrysoleuca*** **(Sm.) Zopf** – часто в лесном и высокогорном поясе; нитрофил.
- ***Rhizoplaca melanophthalma*** **(DC.) Leuckert et Poelt** – часто в лесном и высокогорном поясе; нитрофил.
- ***Rhizoplaca peltata*** **(Ramond) Leuckert et Poelt** – на скалах в горно-степных фитоценозах.
- ***Rimularia insularis*** **(Nyl.) Rambold et Hertel** – нередко; паразитирует на *Lecanora bicincta*.
- ***Rinodina milvina*** **(Wahlenb.) Th. Fr.** – нередко, но в малом обилии на камнях в высокогорном поясе.
- ***Rinodina parasitica*** **H.Mayrhofer et Poelt** – единично встречен в высокогорном поясе (Davydov et al. 2012).
- ***Schaereria fuscocinerea*** **(Nyl.) Clauzade & Roux** – спорадически встречается в высокогорном поясе.
- ***Sporastatia polyspora*** **(Nyl.) Grummann** – нередко в верхней части лесного пояса.
- ***Sporastatia testudinea*** **(Ach.) A.Massal.** – постоянный вид в верхней части высокогорного пояса.
- ***Tephromela atra*** **(Huds.) Hafellner** – спорадически встречается в лесном и высокогорном поясе.
- ***Tremolecia atrata*** **(Ach.) Hertel** – часто, но в малом обилии в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria altaiensis*** **J. C. Wei & Y. M. Jiang** – нередко во влажных условиях высокогорного пояса (Давыдов, 2006; Давыдов и др., 2007).
- ***Umbilicaria cinereorufescens*** **(Schaer.) Frey** – редко на скалах в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria cylindrica*** **(L.) Delise ex Duby** – часто на камнях в высокогорном поясе и верхней части лесного.

- ***Umbilicaria decussata* (Vill.) Zahlbr.** – редко, на камнях в верхней части высокогорного пояса.
- ***Umbilicaria deusta* (L.) Baumg.** – часто на камнях в верхней части лесного пояса и нижней полосе высокогорного.
- ***Umbilicaria hirsuta* (Sw. ex Westr.) Hoffm.** – редко, от степного до высокогорного пояса, предпочитает скалы, посещаемые птицами.
- ***Umbilicaria hyperborea* (Ach.) Hoffm.** – на камнях в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria lyngei* Schol.** – часто на камнях в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria nylanderiana* (Zahlbr.) H. Magn.** – часто на камнях в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria polaris* (Schol.) Zahlbr.** (см. Davydov et al. 2011) – на скалах в высокогорном поясе, наиболее массово на обдуваемых ветром останцах на локальных вершинах.
- ***Umbilicaria proboscidea* (L.) Schrad.** – редко на скалах в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria subglabra* (Nyl.) Harm.** – часто на камнях в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria torrefacta* (Lightf.) Schrad.** – нередко, но в малом обилии на камнях в высокогорном поясе.
- ***Umbilicaria vellea* (L.) Hoffm.** – редко на камнях во влажных условиях лесного и высокогорного пояса.
- ***Xanthoparmelia conspersa* (Ehrh. ex Ach.) Hale** – на камнях в горно-степных фитоценозах.
- ***Xanthoparmelia stenophylla* (Ach.) Ahti & Hawksw.** – на камнях в горно-степных фитоценозах.
- ***Xanthoria elegans* (Link) Th. Fr. (=*Rusavskia elegans* (Link) S. Kondr. et Kärnefelt)** – постоянный вид на недавно обнажившихся затененных поверхностях камней.

Заключение

Представленный список эпилитных лишайников верхней части лесного пояса и высокогорного пояса не является исчерпывающим, в него включены виды, произрастающие непосредственно на поверхности камней на каменных россыпях – курумах, в пределах площадок, выбранных для геоботанических описаний. Характеризуя изменение видового состава и встречаемости видов при движении по высотному градиенту, можно выделить несколько групп лишайников.

1. Массовые виды, встречающиеся в широком диапазоне высот – *Aspicilia cinerea, Dimelaena oreina, Lecanora bicincta, Lecidea lapicida, Melanelia tominii, Rhizocarpon geographicum.*

2. Виды с низким обилием, встречающиеся в широком диапазоне высот – *Carbonea vorticosa*, *Immersaria athroocarpa, Lecanora intricata*.

3. Виды, специфических местообитаний – периодически затопляемых (*Aspicilia aquatica, Bacidina inundata*) или нитрофицируемых птицами (*Rhizoplaca chrysoleuca, Rh. melanophthalma*, *Physcia caesia*).

4. Виды, преобладающие в нижней полосе высокогорий, 1700-2400 м над ур. м., например, *Lasallia pennsylvanica, Protoparmelia badia, Umbilicaria deusta.*

5. Виды, преобладающие в верхней полосе высокогорий, выше 2300 м над ур. м. – *Brodoa oroarctica, Calvitimela aglaea, C. armeniaca, Ophioparma ventosa, Rhizocarpon effiguratum, Rh. pusillum, Sporastatia polyspora, S. testudinea.*

Первые две группы видов создают «фон» лишайникового покрова, виды третьей группы в своем распространении более связаны со специфическими условиями, нежели с высотой. У видов четвертой и пятой групп в изученном диапазоне высот проходит граница распространения, то есть именно они реагируют на высотно-климатический градиент и их проективное покрытие закономерно изменяется с высотой. Следовательно, можно ожидать изменений в высотном распределении этих видов и в их проективном покрытии при изменении климата. Так как при потеплении ареалы видов в горах смещаются вверх (например, Fischlin et al., 2007; Gottfried et al.,

2012; Corlett and Westcott, 2013), при дальнейшем повышении температуры виды пятой группы могут сократить зону обитания и впоследствии исчезнуть с территории Парка и Алтая в целом.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке экспедиционного фонда Российской академии наук. Авторы благодарят Е.К. Мустафина, Р.Н. Крыкбаеву, Е.М. Юрченкова за всестороннее содействие работе экспедиции, а также сотрудников Катон-Карагайского государственного национального природного парка за помощь при проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология СССР, Т. XLI – Восточный Казахстан, часть I – геологическое описание. 1967. Ред. В.П. Нехорошев. –М.: Недра. 471 С.
2. Давыдов Е.А. 2006. *Umbilicaria altaiensis* Wei et Jiang – новый вид лишайника для России, Монголии и Грузии. Ботанический журнал. Т. 91. № 8. С. 1260-1268.
3. Давыдов Е.А., Титов А.Н., Замора С.П. 2007. Дополнения к видовому составу лишайников Алтайской горной страны. II. Turczaninowia. Т. 10. №1. С. 60-67.
4. Долгих С.А. 2011. Анализ данных состояния климатических условий на территории КАСЕ за последние 40 лет. Отчет по проекту Программы развития ООН «Сохранение и устойчивое использование биоразнообразия казахстанской части Алтай-Саянского экорегиона». Астана. 22 С.
5. Инсаров Г.Э. 2002. Лишайники в условиях глобального изменения климата. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 18. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 109-141.
6. Инсаров Г.Э. 2010. Мониторинг лишайников в горных заповедниках в контексте глобальных изменений. В кн.: Изменение климата и непрерывное сохранение биоразнообразия в Алтае-Саянском экорегионе. Материалы международного совещания. Усть-Кокса – Барнаул. С. 117-127.
7. Катон-Карагайский государственный национальный природный парк. 2008. Р.Н. Крыкбаева, сост. Усть-Каменогорск. 102 С.
8. Огарь Н. 2010. Оценка уязвимости особо охраняемых территорий КАССЕ при изменении климата. Алматы. 85 С.
9. Aizen V.B. 2011. Altai-Sayan glaciers. In: Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers (Sigh V.P. (ed.)). Springer Publisher. P. 38-39.
10. Corlett, R.T. and D.A. Westcott. 2013: Will plant movements keep up with climate change? Trends in Ecology & Evolution, V.28, № 8. P. 482-488.
11. Davydov E.A., Himelbrant D.E., Stepanchikova I.S. 2011. Contribution to the study of Umbilicariaceae (lichenized Ascomycota) in Russia. II. Kamchatka Peninsula. Herzogia 24 (2). P. 229-241.

12. Davydov E.A., Konoreva L.A., Andreev M.P., Zhdanov I.S., Dobrysh A.A. 2012. Additions to the lichen biota of Altai mountains. IV. Turczaninowia. V. 15. No 3. P. 37-50.
13. Desmet P., Dolgikh S., Egoh B., Knowls T., Payet K., Ogar N., Rouget M., Theron J.-L. 2011. An Assessment of The Protected Area Network's Vulnerability to Climate Change Impacts in the Kazakhstan Part of the Altai-Sayan Ecoregion with Recommendations for a Protected Area Adaptation Strategy. Report for the United Nations Development Program (UNDP), Conservation and Sustainable Use of Biodiversity in Kazakhstani Sector of Altai-Sayan Ecoregion (UNDP Project 00052843). Astana, Kazakhstan. June 2011. 53 P.
14. Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Gäggeler H.W., Schwikowski M. 2009. Temperature response in the Altai region lags solar forcing. Geophysical Research Letters. V. 36. L01808, doi:10.1029/2008GL035930.
15. Fischlin A., Midgley G.F., Price J.T., Leemans R., Gopal B., Turley C., Rounsevell M.D.A., Dube O.P., Tarazona J., Velichko A.A. 2007. Ecosystems, their properties, goods, and services. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge. P. 211-272.
16. Gottfried M., Pauli H., Futschik A., Akhalkatsi M., Barancok P., Benito Alonso J.L., Coldea G., Dick J., Erschbamer B., Fernández Calzado M.R., Kazakis G., Krajci J., Larsson P., Mallaun M., Michelsen O., Moiseev D., Moiseev P., Molau U., Merzouki A., Nagy L., Nakhutsrishvili G., Pedersen B., Pelino G., Puscas M., Rossi G., Stanisci A., Theurillat J.-P., Thomaselli M., Villar L., Vittoz P., Vogiatzakis I., Grabherr G. 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change. V. 2. P. 111-115. doi:10.1038/nclimate1329.
17. Insarov G., Insarova I. 2002. Long-term monitoring of the response of lichen communities to climate change in the Central Negev Highlands (Israel). Bibliotheca Lichenologica, V. 82. P. 209-220.
18. IPCC, 2007: Climate Change 2007, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 P.
19. Okamoto S., Fujita K., Narita H., Uetake J., Takeuchi N., Miyake T., Nakazawa F., Aizen V. B., Nikitin S.A., Nakawo M. 2011. Reevaluation of the reconstruction of summer temperatures from melt features in Belukha ice cores, Siberian Altai. Journal of Geophysical Research. Vol. 116. D02110. doi:10.1029/2010JD013977.
20. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. 2010. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: an assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model. Journal of Geophysical Research. V. 115. D16107. doi:10.1029/2009JD012976.

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕЛЬЕФА С РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ БОЛЬШАЯ ПОРОЖНЯЯ (ПЕЧОРО-ИЛЫЧСКИЙ ЗАПОВЕДНИК)

Н.С. Смирнов

Россия, 127258, Москва, ул. Глебовская, д.20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. smns-80@rambler.ru

Реферат. В статье описываются результаты анализа влияния рельефа на сообщества темнохвойных лесов нижнего течения реки Большая Порожняя (Печоро-Илычский заповедник). Анализ проведен как для растительности всего массива в целом, так и для сообществ разных секций по отдельности. По результатам проведенного анализа были выявлены наиболее значимые факторы рельефа и определено их влияние на различные секции пихто-ельников с кедром в рамках рассматриваемой территории.

Показано, что описываемая факторами рельефа вариация растительности составляет около 10%, остальные 90% вариации видового состава растительности определяются иными факторами среды (такими как пожары, рубки и пр.). Это свидетельствует о том, что прямое воздействие рельефа на темнохвойные леса минимально и не может описать значимой части изменчивости растительности.

Ключевые слова. Средняя тайга, Печоро-Илычский заповедник, рельеф, растительность, взаимосвязь, морфометрические величины.

INTERRELATIONSHIP OF RELIEF AND VEGETATION OF CONIFEROUS FORESTS IN LOWER COURSE OF RIVER BOLSHAYA POROZHNYAYA (PECHORA-ILYCH RESERVE)

N.S. Smirnov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20b, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia, smns-80@rambler.ru

Abstract. The paper describes results of the analysis of relief influence on coniferous forest communities of the lower course of the river Bolshaya Porozhnyaya (Pechora-Ilych Reserve). Analysis is carried out for the vegetation of the whole massive, as well as for communities of

different sections. The analysis yielded the most significant relief factors. Their influence on different sections of fir-spruce forests with cedar has been quantified. It is shown that variation of vegetation described by relief factors constitute about 10%, while the remaining 90% of variation in species composition of vegetation is determined by other environmental factors (such as fires, logging, etc.). This suggests that direct impact of relief on coniferous forests is minimal and cannot describe substantial part of variability in vegetation.

Key words. Middle taiga, Pechora-Ilych Reserve, relief, vegetation, relationship, morphometric values.

Введение

Печоро-Илычский заповедник − крупный, хорошо сохранившийся массив средне- и северотаежных лесов Европейской части России (Корчагин, 1940; Коренные..., 2006; Смирнова и др., 2007). Исследования на таких территориях позволяют понять закономерности взаимоотношений растительности с окружающей средой в ее слабо преобразованном состоянии.

Целью работы: анализ влияния факторов рельефа на растительные сообщества пихто-ельников с кедром нижнего течения реки Большая Порожняя.

Объекты и методы

На основе анализа литературных данных и картографических материалов был выбран модельный массив в Большепорожном ботанико-географическом районе Печоро-Илычского заповедника (Лавренко и др., 1995), в бассейне реки Большая Порожняя (приток реки Печоры). Выбранный массив располагается в пределах 61-62° с.ш. и 56-58° в.д., в зоне средней тайги. Перепад высот в точках наблюдения составляет 347м, высота меняется от 256 до 603м при среднем 378±106м.

В модельном массиве сделано 548 геоботанических описаний на квадратных площадках размером 100м^2 по регулярной сетке. Балловые оценки покрытия-обилия проведены по методике Браун-

Бланке (Оценка..., 2000). При выделении ярусов использована шкала онтогенетических состояний растений (Смирнова и др., 2001). Эпифитные моховидные и лишайники не изучались. Латинские названия сосудистых растений приведены по С.К. Черепанову (Черепанов, 1995), мхов – по М.С. Игнатову и Е.А. Игнатовой (Игнатов, Игнатова, 2003, 2004). Использована типология пихтоельников с кедром, описанная ранее (Смирнов, 2010, 2012).

В работе использована система морфометрических величин (МВ) предложенная П.А. Шарым (Shary, 1995), за исключением разностной и средней кривизны поверхности. Описание смысла каждой и алгоритмов расчета приведены в статьях (Shary at all, 2002; Шарая, Шарый, 2011). Значения морфометрических величин рассчитаны с использованием программы «Гис-Эко» (Шарый, 2004). Помимо МВ в анализе использовался также интегральный индекс влажности *TI* (Beven, Kirkby, 1979), определенный как $\ln(1+MCA/GA)$, где *MCA* есть площадь сбора А в $м^2$, а *GA* − крутизна склонов в градусах.

Оценка взаимосвязи между видовым составом растительности и значениями МВ проводилась с помощью канонического анализа соответствия (Canonical Correspondence Analysis − CCA), предложенного Тер-Брааком (Ter Braak, 1986). По результатам проведенного анализа построены диаграммы ординации в трех осях, на которых дополнительно проведены векторы физических градиентов, имеющих значимую степень корреляции с основными осями. Длина и направление этих векторов отражают степень корреляции факторов с осями. Неслучайность полученных результатов была проверена с помощью метода Монте-Карло. Расчет проводился в программе PC-Ord, версия 5.0.

Результаты

Анализ проведен на двух уровнях: для всего массива в целом и для сообществ, относящихся к различным секциям (рис. 1). Как видно из приведенного рисунка, на верхних частях склона преобладают сообщества крупнопапоротниковой и высокотравной секций. В средней и нижней – сфагновой и зеленомошной.

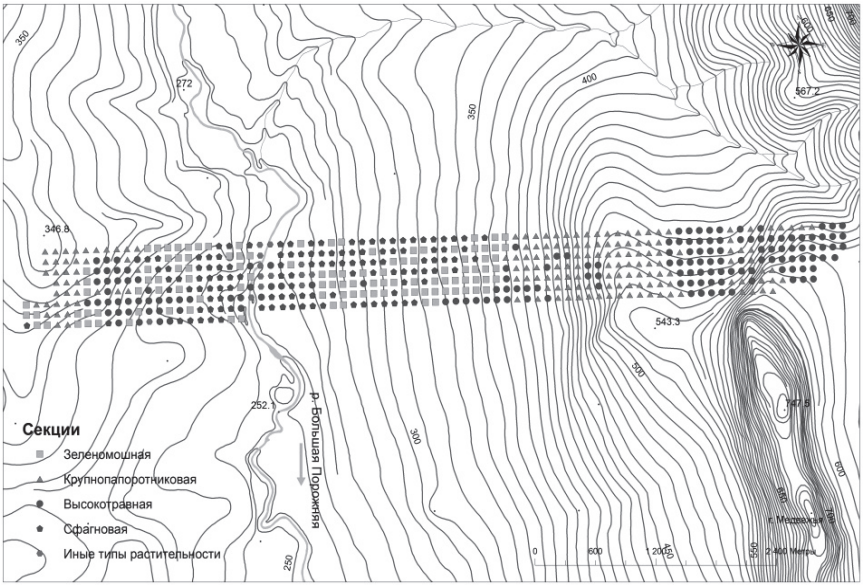

Рис. 1. *Расположение на экологических профилях площадок, где проводились геоботанические описания.*

Анализ показал, что взаимосвязь между растительностью и факторами рельефа низка. Изменчивость, описываемая осями CCA, составляет 7,8% вариации растительности всего массива в целом, 10,7% вариации растительного состава для зеленомошной секции, 11% − для крупнопапоротниковой секции, 12,2% − для высокотравной секции и 10,8% − для сфагновой секции. При этом они достаточно надежно описывают выявленную долю изменчивости (табл. 1).

Высокие коэффициенты корреляции свидетельствуют о том, что они достоверно описывают выявленную часть изменчивости. Очевидно, что принятых во внимание факторов среды недостаточно для описания всей изменчивости видового состава пихто-ельников с кедром, но эти факторы позволяют в существенной мере описать выявленную часть вариации.

Таблица 1.

Коэффициенты корреляции Пирсона между растительностью и факторами рельефа.

	Модельный массив	Зеленомошная секция	Крупнопапоротниковая секция	Высокотравная секция	Сфагновая секция
1 ось	0,888	0,900	0,904	0,905	0,871
2 ось	0,670	0,892	0,725	0,839	0,827
3 ось	0,731	0,846	0,825	0,861	0,809

Модельный массив в целом

По результатам анализа (рис. 2) выявлено, что 1 ось положительно коррелирует с высотной зональностью Z (r = 0,937) и крутизной склона GA(r = 0,629), отрицательно – с интегральным индексом влажности Tl (r = −0,616). Положительная корреляция 2 оси связана с северной компонентой экспозиции склона cosA0 (r = 0,552), площадью водосбора MCA (r = 0,548) и интегральным индексом влажности Tl (r = 0,551); 3 ось положительно коррелирует с восточной компонентой экспозиции sinA0 (r = 0,836).

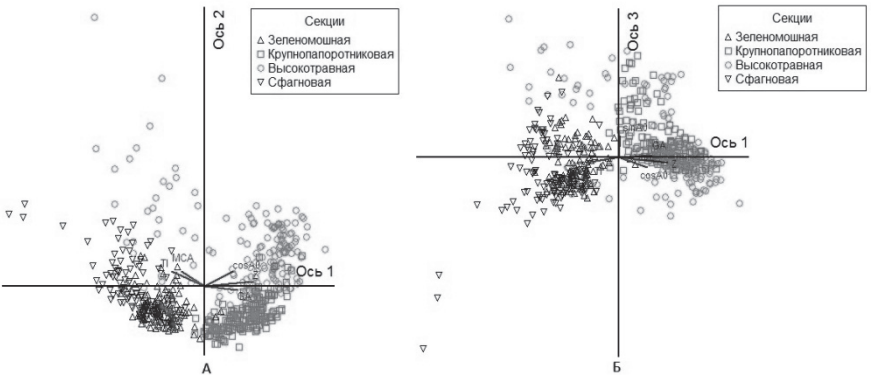

Рис. 2. *Распределение описаний растительности с векторами геоморфометрических величин в 1 и 2 (А) и в 1 и 3 (Б) осях ССА для массива в целом.*

Как видно из рисунка 2, в пространственном отношении для исследуемого массива темнохвойных лесов наибольшее значение имеют факторы высоты и крутизны склонов и, обусловливаемое ими, совместно с площадью водосбора, перераспределение влаги и вещества по склону, выражаемое интегральным индексом влажности.

По этим признакам сообщества четырех секций темнохвойных лесов разделены на две большие группы, приуроченные к разным типам местоположений. К более крутым участкам с большими отметками высоты и низкими значениями увлажнения приурочены сообщества крупнопапоротниковой и большей части высокотравной секции. К более влажным участкам в низинах, с большой площадью сбора, приурочены сообщества зеленомошной, сфагновой и небольшая часть сообществ высокотравной секции.

Взаимосвязь рельефа и сообществ, относящихся к различным секциям

Для выявления изменений во взаимосвязи растительности и факторов рельефа на разных стадиях развития растительности был проведен анализ методом CCA в рамках каждой секции отдельно.

Зеленомошная секция

В ходе анализа взаимосвязи растительности зеленомошной секции и рельефа (рис. 3) было выявлено, что первая ось положительно коррелирует с высотой Z (r = 0,667) и с показателем килевых форм рельефа k_{min} (r = 0,536). Отрицательная корреляция у первой оси наблюдается с показателем несферичности M (r = −0,593). Вторая ось положительно коррелирует с восточной компонентой экспозиции склона sinA0 (r = 0,846) и отрицательно − с северной компонентой экспозиции склона cosA0 (r = −0,471). С третьей осью CCA положительно коррелирует высота Z (r = 0,593).

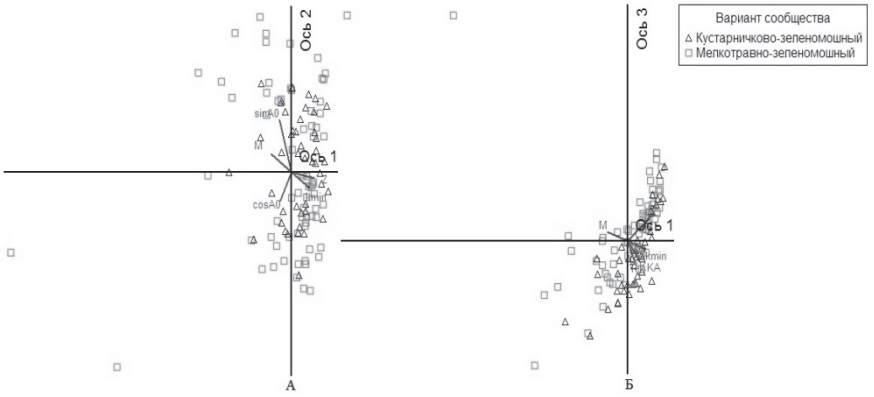

Рис. 3. *Распределение растительности зеленомошной секции с векторами геоморфометрических величин в 1 и 2 (А) и в 1 и 3 (Б) осях ССА.*

При рассмотрении результатов анализа видно, что зеленомошная секция имеет относительно низкое значение корреляции с высотой. Также внимание привлекает большое значение корреляции с восточной компонентой экспозиции склона. Также видно, что сообщества, относящиеся к разным вариантам, не составили четких групп, что может говорить об отсутствии приуроченности вариантов зеленомошной секции к тем или иным условиям рельефа. А сообщества подсекций?

Крупнопапоротниковая секция

Проведенный анализ взаимосвязи растительности крупнопапоротниковой секции и рельефа (рис. 4) показал, что первая ось положительно коррелирует с высотой Z (r = 0,888), северной компонентой экспозиции склона cosA0 (r = 0,856) и крутизной склона GA(r = 0,473). Значимых корреляций факторов со второй и третьей осями выявлено не было.

При рассмотрении результатов анализа видно, что наиболее значимы факторы высоты н.у.м. и северной компоненты экспозиции склона. При этом оба этих фактора примерно равны по своей значимости.

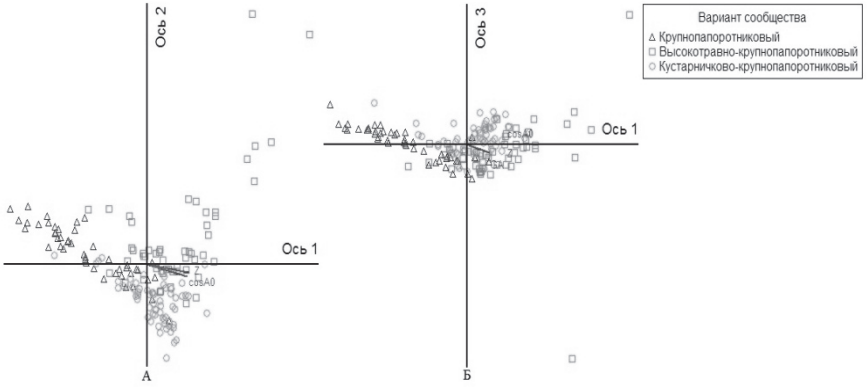

Рис. 4. *Распределение растительности крупнопапоротниковой секции с векторами геоморфометрических величин в 1 и 2 (А) и в 1 и 3 (Б) осях CCA.*

В отличие от зеленомошной секции сообщества каждого варианта крупнопапоротниковой секции имеют приуроченность к определенному сочетанию факторов рельефа. На приведенном рисунке видно, что крупнопапоротниковый вариант отрицательно коррелирует с высотой н.у.м., крутизной склона и с северной компонентой экспозиции склона. Другие два варианта крупнопапоротниковой секции расположены на более высоких участках с большим влиянием северной компоненты экспозиции склона. При этом, высокотравно-крупнопапоротниковый вариант встречается на более крутых участках, а кустарничково-крупанопапоротниковый на менее крутых участках склона.

Высокотравная секция

В результате проведенного анализа (рис. 5) было выявлено, что первая ось CCA положительно коррелирует с высотой Z (r = 0,857) и крутизной склона GA(r = 0,503). Отрицательная корреляция первой оси была выявлена с площадью водосбора MCA (r = −0,550) и интегральным индексом влажности Tl (r = −0,680). Вторая ось CCA отрицательно коррелирует с северной компонентой экспозиции склона cosA0 (r = −0,648), с площадью водосбора MCA (r = −0,507) и интегральным индексом влажности Tl (r = −0,523). Третья ось положительно коррелирует с площадью водосбора MCA (r = 0,511).

При рассмотрении результатов анализа видно, что наибольшая корреляция наблюдается с высотой н.у.м. В отличие от крупнопапоротниковой и зеленомошной секций в высокотравной сильно влияние интегрального индекса влажности и площади водосбора.

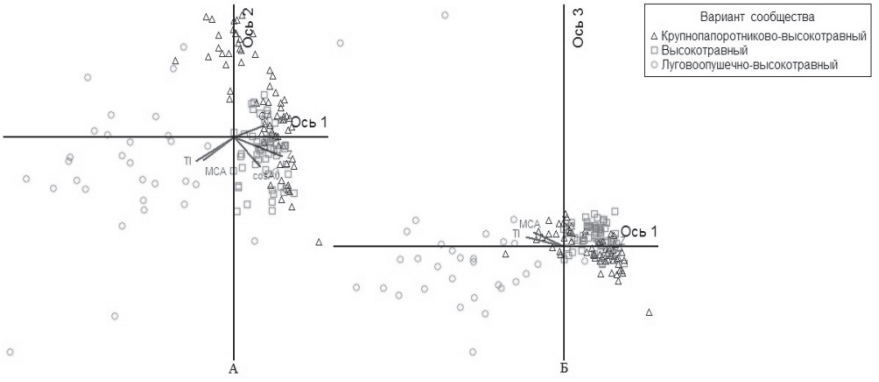

Рис. 5. *Распределение растительности высокотравной секции с векторами геоморфометрических величин в 1 и 2 (А) и в 1 и 3 (Б) осях CCA.*

В высокотравной секции, также как в крупнопапоротниковой видно, что каждый вариант имеет свой набор доминирующих факторов рельефа. К более влажным участкам в низинах приурочен луговоопушечно-высокотравный вариант. Другие два варианта расположенные на более высоких и крутых участках различаются по отношению к северной компоненте экспозиции склона. Крупнопапоротниково-высокотравный вариант приурочен к участкам с менее сильным ее влиянием, чем высокотравный вариант.

Сфагновая секция

В результате проведенного анализа (рис. 6) было выявлено, что первая ось CCA положительно коррелирует с высотой Z (r = 0,905) и крутизной склона GA (r = 0,783). Положительная корреляция второй оси наблюдается с восточной компонентой экспозиции склона sinA0 (r = 0,854). Третья ось положительно коррелирует с площадью водосбора MCA (r = 0,575).

В сфагновой секции наиболее сильная корреляция выявлена с высотой н.у.м. Также значима корреляция с факторами крутизны и восточной компоненты экспозиции склона.

В данной секции, также как и в высокотравной и крупнопапоротниковой, наблюдается приуроченность вариантов к определенным наборам факторов. Травяно-сфагновый, высокотравно-сфагновый и олиготрофнотравяно-сфагновый варианты приурочены к участкам с более низкими значениями высоты н.у.м. Среди них высокотравно-сфагновый и олиготрофнотравяно-сфагновый приурочены к участкам с меньшими значениями крутизны склона. К самым выположенным участкам рельефа приурочены сообщества олиготрофнотравяно-сфагнового варианта.

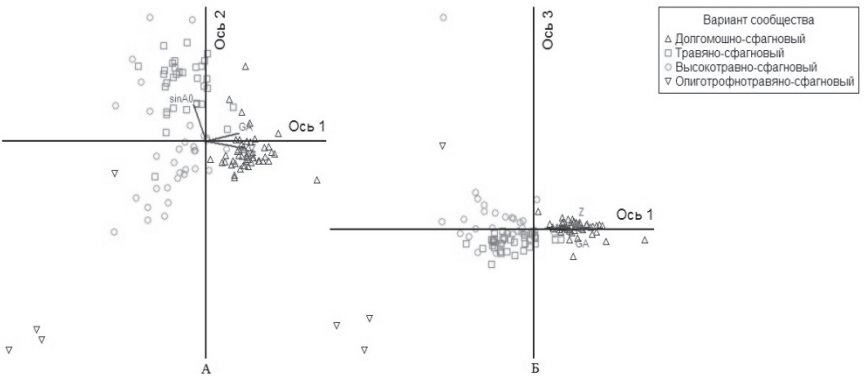

Рис. 6. *Распределение растительности сфагновой секции с векторами геоморфометрических величин в 1 и 2 (А) и в 1 и 3 (Б) осях ССА.*

Как видно из вышеизложенного, наиболее значимыми МВ для растительности являются высота и крутизна склона. Высокие корреляции с ними отмечены как для всего массива в целом, так и для отдельных секций (за исключением зеленомошной). Кроме них большое значение имеют экспозиция склонов, интегральный индекс влажности и площадь водосбора.

У сообществ зеленомошной и сфагновой секций, приуроченных к нижним и средним частям рельефа отмечена корреляция с восточной компонентой экспозиции склона. Это говорит о том, что показанный ранее на примере сравнения растительности разных

берегов р. Б.Порожней (Смирнов, 2012) перенос воздушных масс с запада на восток имеет наибольшее влияние на растительность данных секций, а растительность высокотравной и крупнопапоротниковой секций относительно независимы от этого фактора.

Корреляция с северной компонентой экспозиции склона отмечена как на уровне массива, так и на уровне секций, за исключением сфагновой секции. Это может свидетельствовать о влиянии показанного ранее (Смирнов, 2012) переноса воздушных масс с севера на юг на все секции, кроме сфагновой.

При рассмотрении взаимосвязи факторов рельефа и растительности сообществ разных секций видно, что во всех секциях, кроме зеленомошной, каждому варианту свойственен свой набор факторов рельефа. Такого рода распределение может свидетельствовать о достаточно долго идущих сукцессионных изменениях, вызвавших дифференциацию растительности соответственно местообитаниям. При этом сообщества зеленомошной секции находятся на ранних или средних этапах этой дифференциации. Это согласуется с проведенными ранее исследованиями (Восточноевропейские..., 2004; Смирнова и др., 2007), показавшими, что эти леса относятся к ранним или средним этапам сукцессии.

Заключение

Проведенное исследование показало, что описываемая факторами рельефа вариация растительности составляет около 10%, остальные 90% вариации видового состава растительности определяются иными факторами среды (такими как пожары, рубки и пр.). Это свидетельствует о том, что прямое воздействие рельефа на темнохвойные леса минимально и не может описать значимой части изменчивости растительности. Таким образом, одним из дальнейших направлений исследований становится поиск иных факторов среды, имеющих значимое влияние на растительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. 2004. –М.: Наука. Кн. 1. 479 с. Кн. 2. 575 с.

2. Игнатов М.С., Игнатова Е.А. 2003, 2004. Флора мхов средней части Европейской России. М.: Товарищество научных изданий КМК. Т. 1. (2003). С. 1-608. Т. 2. (2004). С. 611-960.
3. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. 2006. – С.-Пб.: Наука, 337 С.
4. Корчагин А.А. 1940. Растительность северной половины Печоро-Илычского заповедника. Тр. Печоро-Илычского заповед. –М.: Вып. 2. 416 С.
5. Лавренко А.Н., Улле З.Г., Сердитов Н.П. 1995. Флора Печоро-Илычского биосферного заповедника. –С.-Пб.: Наука. 256 С.
6. Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках европейской России. 2000. –М.: Научный мир. 185 С.
7. Смирнов Н.С. 2010. Основные типы темнохвойных лесов бассейна р. Б. Порожняя (Печоро-Илычский заповедник). Изв. Самарского НЦ РАН. Т.12 (33), № 1 (3). С. 892-896.
8. Смирнов Н.С. 2012. Типологическое и видовое разнообразие темнохвойных лесов нижнего течения р. Б. Порожняя (приток р. Печора, Печоро-Илычский заповедник). Экология. (В печати).
9. Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г. 2001. Использование демографических методов для оценки и прогноза сукцессионных процессов в лесных ценозах. Бюлл. МОИП. Сер. Биологическая. Т. 106, № 5. С. 26-34.
10. Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э. 2007. Биоразнообразие и сукцессионный статус старовозрастных темнохвойных лесов южной части Печоро-Илычского заповедника. Тр. Печоро-Илычского заповедника. Т. 15. С. 38-52.
11. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. 1995. –С.-Пб.: Мир и семья. 990 С.
12. Шарая Л.С., Шарый П.А. 2011. Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии. Экология. № 1. С. 3-10.
13. Шарый П.А. 2004. Аналитическая ГИС Эко. Сайт http://www.esti-map.ru/
14. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin. 1979. V.24. P.43-69.
15. Shary P.A. 1995. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. Mathematical Geology. V.27, № 3. P. 373-390.
16. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. Geoderma. V. 107, №. 1-2. P. 1-32.
17. Ter Braak C.J.F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. Ecology. Vol. 67. P. 1167-1179.

О ФОРМИРОВАНИИ ВТОРИЧНОГО АРЕАЛА АМЕРИКАНСКОЙ БЕЛОЙ БАБОЧКИ (*HYPHANTRIA CUNEA* DRURY, ARCTIIDAE, LEPIDOPTERA) В РОССИИ И СОСЕДНИХ СТРАНАХ В XXI ВЕКЕ

В.В. Ясюкевич[1)]*, *С.Н. Титкина*[1)], *И.О. Попов*[1)], *Е.А. Давидович*[2)], *Н.В. Ясюкевич*[3)]

[1)] ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН». 107258 Москва, Глебовская ул., 20Б. *v1959@yandex.ru

[2)] ЦНСХБ Россельхозакадемии. Россия, 107139 Москва, Орликов пер., 3Б.

[3)] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия, 127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49.

Реферат. Факторами, определяющими ареал американской белой бабочки (АББ) *Hyphantria cunea*, являются теплообеспеченность, особенности фотопериодической реакции и наличие кормовых растений в подходящих биоценозах. В качестве климатических предикторов для моделирования ареала выбрана сумма активных температур 2000°С при пороге развития 10°С. Показано, что за период 1981 − 2010 гг. по сравнению с периодом 1951 − 1980гг. потенциальный (климатический) ареал АББ расширится к северу, по большей части, на 1° по широте, а в северо-западной части ареала – на 2-3°. В будущем, при изменении климата на территории России, соответствующем глобальному потеплению на 1,5°С, существенное расширение ареала в северном направлении может иметь место на западе, на стыке границ России, Белоруссии и стран Балтии, а также в Западной Сибири и Дальнем востоке (до 5° по широте). В соответствии со сценарием RCP4.5 ареал АББ будет повсеместно расширятся в северном и восточном направлении. Может появиться изолированный от основной части ареала участок в районе Алданского нагорья. Непригодными для заселения к концу XXI века останутся высокогорные районы Таджикистана и Киргизии, а также южная часть Сибири от стыка границ России, Казахстана и Китая до 114° в.д. Сокращение ареала не прогнозируется. При реализации сценария RCP8.5 закономерности изменения ареала те же, что и при RCP4.5. Различия в том, что его расширение к северу и востоку в первом случае будет более масштабным. К концу XXI века изолированный участок на Алданском нагорье сольется с основной частью ареала. Появятся

климатически пригодные для заселения участки на Камчатке и в районе Эльгинского плоскогорья. Изменения климата в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 будут влиять на формирование ареала АББ в начале XXI века одинаково. Различия между последствиями при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 начнут сказываться примерно с 2040 годов. Реализация климатического ареала АББ к концу XXI века в полной мере в силу биоценотических ограничений представляется маловероятной.

Ключевые слова. Американская белая бабочка, вторичный ареал, изменение климата, климатические предикторы, модельный ареал, климатический сценарий.

ABOUT FORMATION OF A SECONDARY RANGE OF THE FALL WEBWORM (*HYPHANTRIA CUNEA* DRURY, ARCTIIDAE, LEPIDOPTERA) IN RUSSIA AND ADJACENT COUNTRIES IN XXI CENTURY

V.V. Yasjukevich[1)], S.N. Titkina[1)], I.O. Popov[1)], E.A. Davidovich[2)], N.V. Yasjukevich[3)]*

[1)]Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, *v1959@yandex.ru

[2)]CNSHB of Russian Academy of Agrarian Sciences, 3B, Orlikov per., 107139 Moscow, Russia

[3)]The Russian state agrarian university − MSHA K.A. Timirjazeva's name, 49, Timirjazevskaja str., 127550 Moscow, Russia

Abstract. Availability of heat, special features of photoperiodic reaction and availability of fodder plants in appropriate ecosystems are factors determining a range of the fall webworm (FW), *Hyphantria cunea*. Sum total of active temperatures of 2000°C with development threshold of 10°C was employed as climatic predictor in the range modeling. It is shown that in 1981 − 2010 vs. 1951 − 1980 potential (climatic) range of FW expanded northward mainly by 1° of latitude; while in the northwestern part of the range it expanded by 2-3° of latitude. In future, under climate change in Russia corresponding to the global warming by 1,5°C, the range can have substantial northward expansion in the western part, where state borders of Russia, Belarus and Ukraine meet, and in Western Siberia and Far East (by up to 5° of latitude). The FW range will

demonstrate overall northward and eastward expansions under RCP4.5 scenario. A new part of the range isolated from its major part may appear in the Aldan upland. High uplands of Tajikistan and Kyrgyzstan, and southern part of Siberia, from the point where state borders of Russia, Kazakhstan and China meet to 114 E, will remain unsuitable for FW. Reductions of the range are not projected. RCP8.5 scenario yields the range changes similar to those projected with RCP4.5; however, its northward expansion will be more pronounced in the former case. The isolated part of the range in the Aldan upland will merge with its main part at the end of the 21st century. Areas suitable for infestation with respect to there climatic features will appear in Kamchatka peninsula and in the Elgin upland. RCP4.5 and RCP8.5 scenarios will affect the FW range similarly at the beginning of the 21st century. Differences in the outcomes of the scenarios will become pronounced starting from 2040s. Full realization of FW climatic range by the end of the 21st century appears highly improbable due to ecosystem factors' limitations.

Key words. Fall webworm, secondary range, climate change, climatic predictors, modeled ranges, climatic scenario.

Введение

Первичный ареал американской белой бабочки расположен на Североамериканском континенте от Тихого до Атлантического побережья, а в широтном направлении − от южной границы хвойных лесов Канады (проходящей между 54° и 58° с.ш.) до государственной границы США и Мексики. В 1940г. отмечена в Европе, а в 1945г. − в Японии, где быстро стала наносить существенный вред плодоводству, шелководству, декоративному и полезащитному лесоразведению, и была включена в перечень карантинных объектов (история формирования вторичного ареала рассматривается в специальном разделе).

Целью настоящей статьи являются: обобщение данных по географическому распространению АББ в пределах вторичного ареала, ее биологических особенностях и модельной оценке возможности распространения при наблюдаемом и предполагаемом на протяжении XXI века изменении климата.

Методические вопросы, связанные с использованием климатической базы и моделированием ареалов, подробно рассмотрены в монографии С.М. Семенова и др., 2006.

Результаты и обсуждение

История формирования вторичного ареала

В Европе американская белая бабочка (далее − АББ) (рис. 1) была впервые обнаружена венгерским энтомологом Жигмондом Велезом на острове Чепель, близ Будапешта в 1940г., за что и получила свое европейское название − Americai féhér szovolepke. К 1948г. она заселила всю территорию Венгрии и в 1947 − 1951 гг. проникла в Чехословакию, Югославию, Румынию, Австрию. Затем была отмечена в Болгарии, Греции, Франции (Чураев, 1962; Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой, 1985).

На территории СССР впервые была обнаружена в приграничных с Венгрией районах Закарпатской области Украины в 1952г., где заселила равнинную часть, не преодолев горные районы. Повторно АББ проникла в СССР из Румынии в Молдавию в 1966г., а затем в Одесскую область Украины (Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой, 1985).

В последние 10-15 лет площадь, заселенная АББ на Украине, нарастает в Полтавской, Черновицкой, Херсонской, Винницкой, Днепропетровской, Киевской, Ивано-Франковской и Хмельницкой областях. Площади стабильны в Донецкой, Закарпатской, Луганской, Харьковской, Черкасской областях и Крыму. Области, где вредитель расселялся интенсивно, а теперь появилась тенденция к снижению − Запорожская, Кировоградская, Одесская, Николаевская (Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой, 1985; Кривошеев, 2009).

Заметим, что, аналогичным образом Карпаты выступили природным барьером на пути распространения на восток и для колорадского жука, масштабное расселение которого по территории СССР пошло позже через Польшу и Прибалтику (Ясюкевич и др., 2007).

Затем очаги размножения выявлялись в середине 1970 гг. в Краснодарском и Ставропольском краях, в 1982г. в Ростовской области, далее АББ обосновалась в Чеченской Республике, Кабардино-Балкарии, Дагестане, Ростовской, Белгородской, Воронежской, Астраханской и Волгоградской областях (Ижевский, 2002; Шамилов, 2008; Гниненко и др., 2011). В Карачаево-Черкесской Республике АББ впервые обнаружена в 1980г. (Быковский, 1998 а,б). В первой половине 1980 гг. заселила Грузию и Азербайджан (Газиев и др., 1999; Ижевский, 2002; Лоладзе и др.,

2003). К концу XX века ареал АББ, по данным «Агроатласа…» (Афонин и др., 2006) представляется следующим образом (рис. 2).

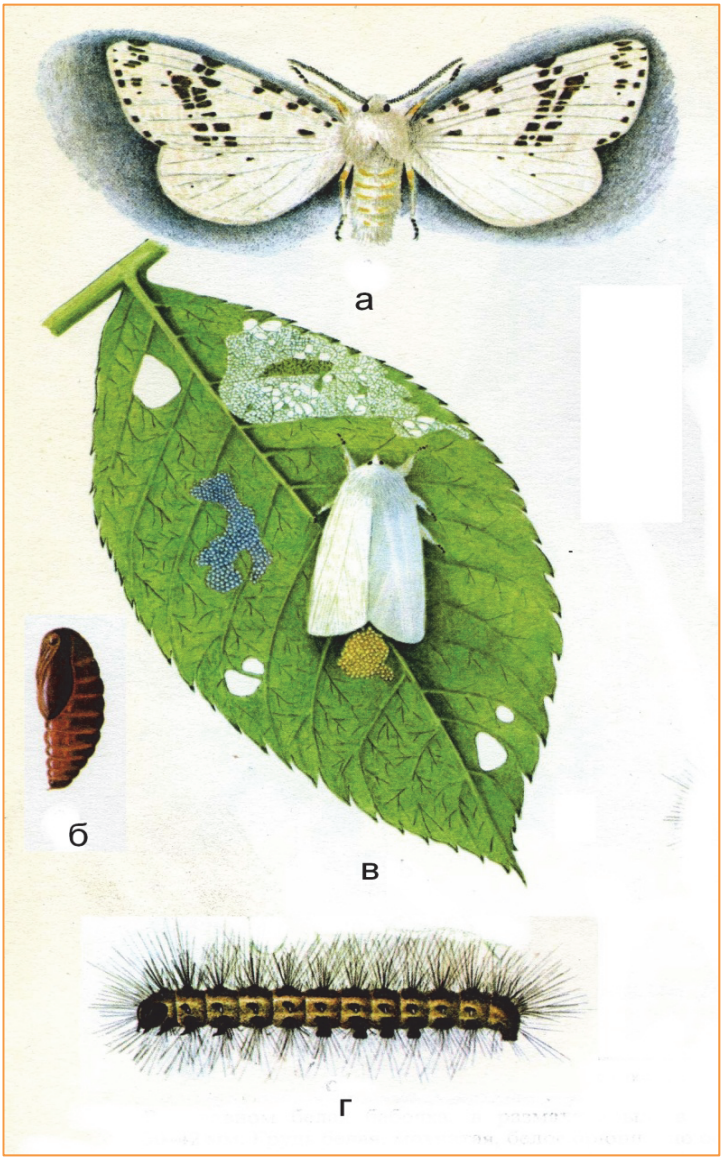

Рис. 1. *Американская белая бабочка (Hyphantria cunea Drury): а – самец, б – куколка, в – самка с яйцекладкой, г – гусеница.*

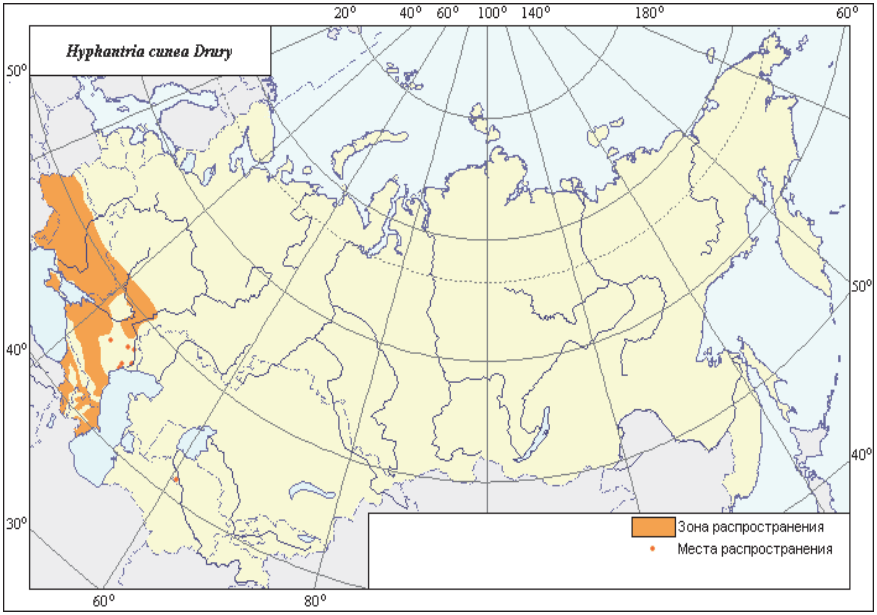

Рис. 2. *Ареал американской белой бабочки (Афонин и др., 2006).*

На этом рисунке в азиатской части бывшего СССР показана только одна точка. Действительно, в Средней Азии АББ впервые выявлена в 1989г. в Ургенче (Узбекистан). Затем АББ широко распространилась в Узбекистане, Туркмении, Киргизии (Резайи, 2006; Морковина, Милько, 2006; Гниненко, Кавоси, 2011). В Казахстане впервые выявлена в Алма-Атинской области в 2003г. В 2006г. площадь очагов в этой республике составила 1383 га и продолжает увеличиваться. (Исин и др., 2008, Орозумбеков, 2011). Таким образом, эту карту можно считать несколько устаревшей.

Впервые АББ была обнаружена в Иране в 2002г. в провинции Гилян, куда проникла из Азербайджана. В 2005-2007 гг. − в провинциях Мазандаран и Ардебиль; в 2010г. − в провинции Голестан на границе с Туркменией (Резайи, 2006; Гниненко, Кавоси, 2011).

Сведения о нахождении АББ на Дальнем Востоке несколько противоречивы. По одним данным, этот вид уже обосновался в Приморском крае (Кузнецов, 2005; Кузнецов, Стороженко, 2010; Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов…, 2010).

Другие авторы утверждают, что АББ на Дальнем востоке пока не обнаружена (Шамилов, 2011; Гниненко, Шамилов, 2011).

В Японии АББ впервые отмечена в 1945г. в Токио, а к настоящему времени заселила остров Хонсю от 41° до 32° с.ш., а также Корейский полуостров, восточную часть Китая (Gomi, 1999; 2007).

На небольшие расстояния АББ расселяется путем активного перелета имаго. Средняя скорость ее продвижения в восточноевропейских странах первоначально составляла 30-40 км в год, а в 1970 гг. достигала уже 200 км в год. Гусеницы и куколки с различными материалами, тарой и т.д. могут перевозиться на большие расстояния. Именно так АББ была завезена из Америки в Европу и Японию (Чураев, 1962; Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой, 1985; Ижевский, 2002; Gomi, 1999; 2007).

После проникновения в новые места обитания вспышки численности американской белой бабочки происходили не позднее, чем через 1-2 года после заселения. Так продолжалось по всей Европе, и, только после 30-40 лет существования на новых территория вспышки этого фитофага переставали быть непрерывными, и стали приобретать черты, свойственные вспышкам аборигенных видов. Продвижение АББ на восток продолжалось. В Иране, например, в настоящее время происходит тоже, что в середине XX века происходило в Европе – после её проникновения в леса провинций Гилян, Мазандаран и Ардебиль, вспышки охватывают все древостои, в которых имеются пригодные для питания её гусениц породы, и эти очаги имеют хронический характер. Совершенно аналогично происходило и заселение этим фитофагом территории Японии, Кореи и Китая. На территории Китая вспышки массового размножения американской белой бабочки еще продолжаются по ациклическому, типичному для раннего периода освоения новых территорий адвентивными видами насекомых сценарию (Гниненко, 2011).

АББ во вторичном ареале быстро включается в круг жертв или хозяев автохтонных хищников и паразитов. Это свидетельствует о наличии в природе мощного потенциального механизма сдерживания численности этого нового адвентивного вредителя. Для примера: у колорадского жука такой механизм отсутствует

(Ижевский и др., 1999). Это позволило профессору С.С. Ижевскому высказать мысль о целесообразности вывода АББ из списка карантинных объектов на территории России (Ижевский, 2002).

Прогноз дальнейшего расширения ареала АББ по разным источникам следующий. По мнению И.А. Чураева (1962), она может продвинуться к северу по линии Ленинград 59°56′ − Вологда 59°13′ − Пермь 58°01′ − Курган 55°28′ − Каракалинск 49°24′ − Зайсан 47°28′ с.ш. Согласно «Инструкции по борьбе с американской белой бабочкой» (1985) ее распространение ограничивается линией Вильнюс 54°41′ − Смоленск 54°46′ − Нижний Новгород 56°19′ − Ижевск 56°49′ − Екатеринбург 56°49′ − Новосибирск 55°0′ − Хабаровск 48°30′ с.ш.

Однако, по мнению А.Х. Саулич (1994), северным пределом распространения АББ является 47° с.ш. Это связывается с биологическими особенностями американской популяции, насекомые из которой были завезены в Европу (низкий порог фотопериодической реакции и большое количество тепла, требующегося для развития одного поколения, а также чувствительность к фотопериодическим сигналам гусениц младших и средних возрастов). Дальнейшее расширение ареала возможно при повторном завозе АББ из северных частей первичного ареала, ФПР которых обеспечивает наступление диапаузы при моновольтинном развитии.

В настоящее время динамика очагов массового размножения АББ на территории России выглядит следующим образом (рис. 3). Хорошо заметно, что с 2006г. последовало резкое возрастание площадей насаждений, пораженных АББ (по данным Шамилов, 2001; Гниненко, Шамилов, 2011). Это, конечно, не сравнить с площадями лесов, ежегодно повреждаемых непарным шелкопрядом и монашенкой (Титкина и др., 2013, см. настоящий сборник), но вред, наносимый АББ плодоводству, шелководству, декоративному и полезащитному лесоразведению, как уже говорилось, весьма существенен. Кроме того, проникая в поисках места для окукливания в упаковочные материалы, АББ может наносить ущерб перевозимым товарам. Так, окукливаясь в упаковке облицовочного кирпича, она портит его внешний вид, что приводит к отбраковке 20-50% материала (Фокин, 2008).

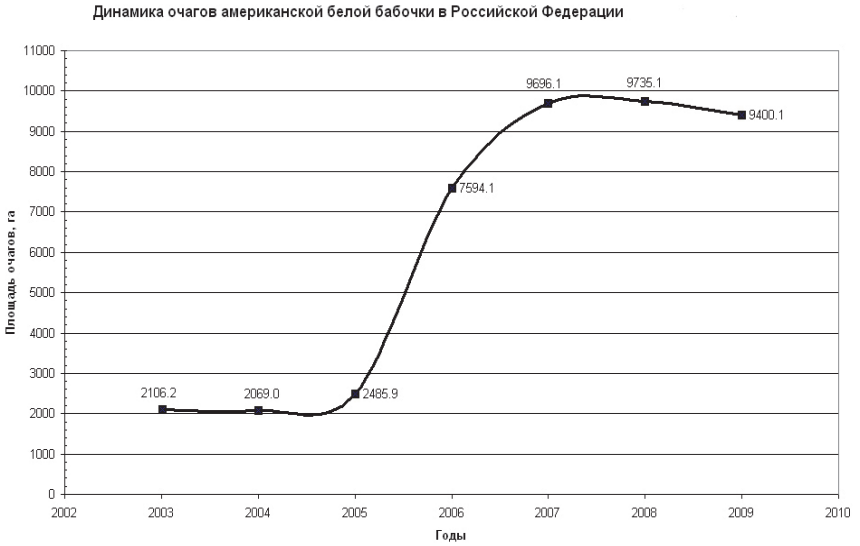

Рис. 3. *Динамика очагов АББ на территории Российской Федерации (по данным Шамилов, 2011; Гниненко, Шамилов, 2011).*

Экологические особенности американской белой бабочки

В развитии АББ насчитывается 7 личиночных возрастов. Гусеницы 1- 6 возрастов держатся вместе, сплетая паутинные гнезда, порой огромного размера, гусеницы 7 возраста ведут одиночный образ жизни. Зимует куколка в состоянии диапаузы. Бабочки не питаются. Вредит садовым, парковым, городским, полезащитным насаждениям. Чисто лесные ценозы не заселяет (Чураев, 1962).

АББ − многоядный вредитель. В Северной Америке повреждает 120 видов растений, а в странах Европы − 234 вида, из них более 30 видов относятся к плодово-ягодным растениям, около 100 видов − к древесным и кустарниковым породам и около 100 − к травянистым растениям. Подробно список повреждаемых в Европе растений приводится в монографии И.А. Чураева (1962). Не вдаваясь в излишние подробности, здесь укажем, что эти растения можно разделить на три группы:

1. Наиболее предпочитаемые, часто повреждаемые растения − шелковица, клен ясенелистный, яблоня, слива, черешня, груша, вишня, грецкий орех, айва, бузина, ясень.

2. Растения, которые повреждаются реже, но обеспечивают полный цикл развития АББ. В эту группу входят многие лиственные древесные и кустарниковые породы.

3. Растения, которые повреждаются только гусеницами старших возрастов и не обеспечивающие полный цикл развития. Это травянистые и хвойные растения.

Самым предпочитаемым растением из первой группы является шелковица (рис. 4). При питании на этом растении обеспечивается наибольшая выживаемость гусениц, вес бабочек и их плодовитость, наименьшая длительность развития. В эксперименте, при наличии выбора между рядом древесных пород, 67% яйцекладок приходилось на шелковицу, остальное на сливу, яблоню, грушу, грецкий орех и черешню. На акацию, платан, айлант и дуб бабочки яйца не откладывали (Чураев, 1962). Такая особенность АББ делает шелководство в местах ее распространения невозможным. Гусеницы полностью оголяют деревья, а борьба с ними невозможна, так как обработка инсектицидами исключает использование листвы для выкормки тутового шелкопряда.

Указанные выше биологические особенности нашли отражение в тривиальных названиях АББ в разных странах. Так, в США и Канаде ее называют fall webworm (осенний паутинный червь), в Германии и Австрии − Waisser Bärenspinner, Weberbär, Weberspinner (белая медведица, медведица-прядильщица, паутинный шелкопряд), в Румынии − Omyda parosa dudului (волосатая гусеница шелковицы), в Чехии − Přástevnik americky (прядильщик американский), в Югославии − Dudovac (тутовница), во Франции − Ecaille fileuse (медведица-прядильщица).

В пределах первичного ареала число поколений − от одного на юге Канады до 4 в штате Луизиана (Мешкова, Давиденко, 2007). В Японии на широте 41-36° с.ш. развивается в 2 поколениях, а южнее, 36-32° с.ш., − в 3 (Gomi, 1999, 2007). На территории бывшего СССР повсеместно развивается в 2 поколениях (Чураев, 1962; Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой, 1985 и др., см. также библиографию к этой статье). Видимо, это связано с тем, что на территорию СССР были завезены бабочки из популяций средних широт США.

Рис. 4. *Шелковица черная Morus nigra.*

Механизм этого следующий: при теплообеспеченности, достаточной для развития двух поколений, первое развивается без диапаузы в условиях длинного дня, а второе, при коротком дне в конце лета − начале осени диапаузирует и в таком состоянии перезимовывает. Севернее, где по условиям теплообеспеченности возможно развитие только одного поколения, оно развивается также в условиях длинного дня и дает начало второму поколению, которое не завершает развития и вымерзает. Однако в работе Ю.Э. Клечковского (2005) отмечается, что на Украине иногда часть куколок первого поколения уходит в диапаузу. Аналогичные данные получила и А.Х. Саулич (1994) в эксперименте, проведенном в Белгородской области. Возможно, что это свидетельствует о начале адаптации АББ к холодному климату (модификация фотопериодической реакции) и создает предпосылки к продвижению ее на север.

Факторами, определяющими формирование ареала АББ, помимо наличия кормовых растений и подходящих ценозов, являются теплообеспеченность и особенности фотопериодической реакции (далее ФПР).

Диапауза АББ индуцируется ФПР длиннодневного типа. Чувствительными к фотопериодическим сигналам являются гусеницы младших и средних возрастов, а пакет стимулирующей фотопериодической информации составляет 15-17 дней (Hidaka, 1977, цитата по Саулич, 1994, 1999). Однако, другие авторы считают фоточувствительными гусениц старших возрастов или I и II (Saringer, 1961; Jasic, Macko, 1961, цитата по Саулич, 1994, 1999). Оценки величины критического фотопериода (КФП) также различны. По экспериментальным данным А.Х. Саулич (Саулич, 1994, 1999), на Кубани (г.Славянск-на-Кубани, 45°15′) $КФР_{90}$ составляет 15 ч. В.А. Быковский (1999) установил, что в Карачаево-Черкессии $КФП_{75}$ составляет 15 ч., при длине дня 13-14 ч. диапаузируют все особи, а при 16 ч. диапауза не наступает.

У моновольтинной популяции АББ из Онтарио (51°26′) КФП − 16,5 ч. (Hidaka, 1977, цитата по Саулич, 1994, 1999). В Японии $КФП_{50}$ при 25°С от 13 ч. 45 м. до 13 ч. 53 м. для бивольтинных популяций, от 14 ч. 15 м. до 14 ч. 38 м. для тривольтинных (Gomi, 1999, 2007).

Оценки теплообеспеченности, по данным разных авторов, весьма неоднородны. А.Х. Саулич (1994) в своем исследовании исходит из того, что сумма эффективных температур (далее СЭТ)

для развития одного поколения находится в пределах от 800 до 1000°С (порог развития 10°С) (Ito et al., 1968; Deseö et al., 1986, цитата по Саулич, 1994, 1999). Сделан вывод, что в Краснодарском крае (Славянск-на-Кубани) возможно стабильное существование бивольтинной популяции АББ (СЭТ 2200-2300°С). В Белгородской области (Борисовка) по условиям теплообеспеченности возможно развитие одного поколения (СЭТ 1000-1100°С), куколки которого, однако, не диапаузируют, а для развития второго теплообеспеченности недостаточно. Температурные условия Ленинградской области (Старый Петергоф) заведомо не пригодны для существования АББ (СЭТ 550°С) (Саулич, 1994).

По данным В.А. Быковского (1998 а, б), для развития двух поколений АББ достаточно СЭТ 1238,2°С при пороге развития 10°С. В работе Ю.Э. Клечковского (2005) приводятся следующие значения СЭТ для двух поколений 1290°С при пороге 8,5°С, а САТ 2590°С. Однако, в приводимой там же таблице указан порог развития 10°С.

В монографии И.А. Чураева (1962) для развития двух поколений указывается значение СЭТ 1390°С, а в «Инструкции по борьбе с американской белой бабочкой» (1985) − 1420°С. За порог развития в обеих публикациях принято 9°С.

Моделирование ареала АББ

Проанализировав приведенные выше источники, мы приняли решение выбрать следующие климатические предикторы для моделирования АББ: СЭТ для развития двух поколений 2000°С, порог развития 10°С. Ввести биоценотические ограничения, как в работе С.Н. Титкиной и др. (2013), описывающей распространение лесных вредителей непарного шелкопряда и монашенки − наличие или отсутствие леса − не представляется возможным, так как АББ не заселяет лесные массивы, а картой, отражающей городские, парковые, садовые, полезащитные или иные подобные насаждения, служащие местообитанием АББ, мы не располагаем. Таким образом, на приведенных ниже картах показан сплошной модельный ареал, обусловленный фактором достаточной теплообеспеченности для развития АББ в двух поколениях. В действительности, с учетом биоценотических условий обитания АББ, ареал в этих пределах будет мозаичным.

На рисунке 5 представлен модельный ареал АББ, рассчитанный исходя из суммы ***эффективных*** температур 2000°С при пороге

развития 10°С и его изменение за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг.

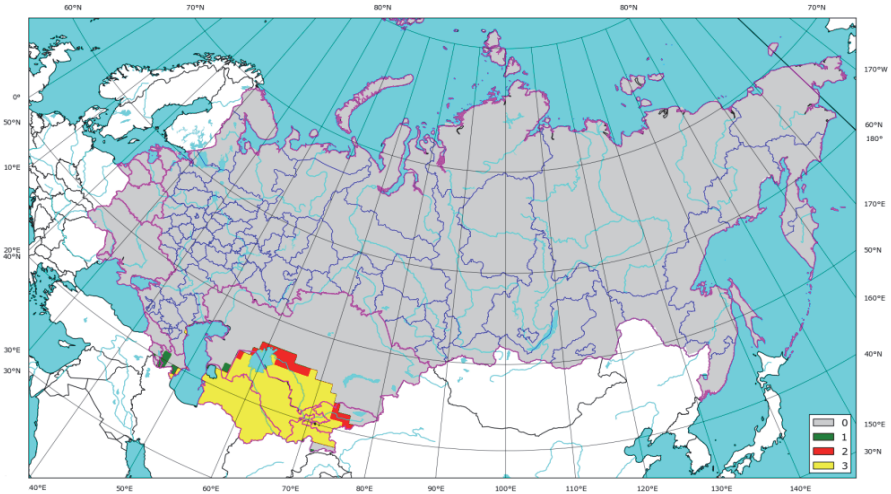

Рис. 5. *Модельный ареал АББ, рассчитанный исходя из суммы эффективных температур 2000°С при пороге развития 10°С и его изменение за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг. Обозначения: 0 − территория в ареал не входит; 1 − сокращение ареала; 2 − расширение ареала; 3 − территория входила в ареал в оба периода.*

Согласно этому рисунку, АББ существовать на территории Европейской части бывшего СССР, кроме отдельных районов Закавказья, не может, что противоречит многочисленным данным о ее распространении, рассмотренным выше. Возможная причина этого − терминологическая путаница. Вероятно, авторы не делают различий между суммой эффективных и активных температур (подробнее об этих понятиях − см. монографию С.М. Семенова и др., 2006). Они опирались на данные различных агроклиматических справочников, где приводятся именно активные температуры (см., например, Агроклиматический атлас мира (1972), интерактивный «Агроатлас…» (Афонин и др., 2006)). Видимо, наблюдая за развитием АББ, эти авторы отмечали сумму температур, накопленную к тому или иному его этапу. Попытки определить порог развития и сумму температур экспериментально не

предпринимались. Это можно сделать, выращивая насекомых (не только АББ) при нескольких постоянных температурах, а затем получить искомые константы расчетным путем (Чернышев, 1996). На следующем этапе работы мы построили ареал, исходя из суммы ***активных*** температур 2000°С (рис. 6).

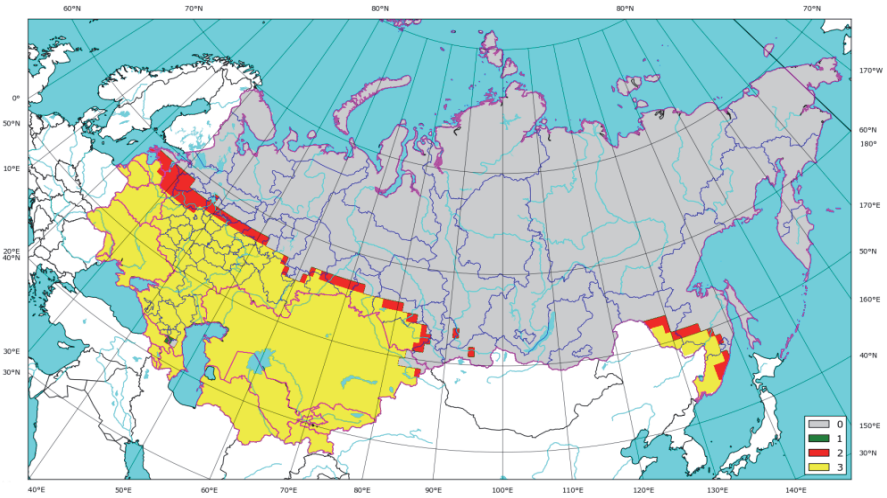

Рис. 6. *Модельный ареал АББ, рассчитанный исходя из суммы активных температур 2000°С при пороге развития 10°С и его изменение за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг. Обозначения как на рис. 5.*

Представленный на этом рисунке ареал выглядит более реалистичным, соответствующим как фактическим, так и прогностическим (Чураев, 1962; Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой, 1985) данным о распространении АББ. За период 1981-2010 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. граница потенциального ареала АББ сместится на север, по большей части, на 1° широты, а на территории Тверской, Псковской и Новгородской областей на 2-3°. На Дальнем Востоке для потенциальной акклиматизации АББ пригодны территории Приморского края, Еврейской автономной области, южная часть Хабаровского края и Амурской области.

Оценка возможного распространения АББ в будущем первоначально проводилась на основе климатической модели,

разработанной в ИГКЭ (Семенов и др., 2013, см. настоящий сборник). В этой работе изменения климата на территории России при глобальном уровне потепления 1,5°С даются в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг. Это приблизительно соответствует превышению доиндустриального уровня на 2°С (рис. 7).

Рис. 7. *Модельный климатообусловленный ареал АББ: изменения при глобальном уровне потепления 1,5°С по сравнению с периодом 1981-2000 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Как следует из этого рисунка, существенное расширение ареала в северном направлении может иметь место на западе, на стыке границ России, Белоруссии и стран Балтии, а также в Западной Сибири и Дальнем востоке (до 5° по широте).

Следующая часть раздела посвящена оценкам распространения АББ по моделям, рассчитанным Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) по параметрам будущего климата, полученным осреднением результатов вычислений по ансамблю из 31 МОЦАО (Моделей Общей Циркуляции Атмосферы

Рис. 8а.

Рис. 8б.

Рис. 8 а, б. *Изменение ареала АББ в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2028-2047 гг. (переход глобального интеграла через 2°С). Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 8в.

Рис. 8г.

Рис. 8 в, г. *Изменение ареала АББ в соответствии со сценарием умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

и Океана), которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project − Phase 5) и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему Земли семейства RCP (Representative Concentration Pathways): сценарий умеренного воздействия RCP4.5 и сценарий экстремального воздействия RCP8.5. Эти сценарии подробно рассмотрены в разделе 3 Второго оценочного доклада…, 2014. Оценки получены для следующих временных периодов в сравнении с базовым периодом 1981-2000 гг. (s1):

- ✓ s2 – 2011-2030 гг.
- ✓ s3 – 2034-2053 гг. для RCP4.5 или 2028-2047 гг. для RCP8.5 (переход глобального интеграла через 2°C)
- ✓ s4 – 2041-2060 гг.
- ✓ s5 – 2080-2099 гг.

На рис. 8 показаны оценки изменения ареала АББ по сценарию умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему RCP4.5 для различных периодов, указанных выше.

Как следует из этого рисунка, ареал АББ будет повсеместно расширятся в северном и восточном направлении, появится изолированный от основной части ареала участок в районе Алданского нагорья. Непригодными для заселения к концу XXI века останутся высокогорные районы Таджикистана и Киргизии, а также южная часть Сибири от стыка границ России, Казахстана и Китая до 114° с.ш. Сокращение ареала не прогнозируется.

На рис. 9 показаны оценки изменения ареала АББ по сценарию экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5.

Закономерности изменения ареала те же, что и на рисунке 8. Различия в том, что его расширение к северу и востоку будет более масштабным. К концу века изолированный участок на Алданском нагорье сольется с основной частью ареала, и появятся климатически пригодные для заселения участки на Камчатке и в районе Эльгинского плоскогорья.

Отметим, что на рис. 8 и на рис. 9 позиции а) и б) практически не отличаются. Это означает, что климатическое воздействие в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 в периоды 2011-2030 гг. и 2028-2047 гг. и 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С) для RCP4.5 и RCP8.5 соответственно будет влиять на формирование ареала АББ одинаково. Наоборот, позиции в) и г) (периоды 2041-2060 гг. и 2080-2099 гг.) на этих рисунках существенно различны. Таким образом, расхождение по степени климатического воздействия между сценариями RCP4.5 и RCP8.5 начнет сказываться с 40-х годов XXI века.

Реализация климатического потенциала расширения ареала АББ в полной мере представляется нам маловероятной. Этот вид не поселяется в естественных лесных массивах и не может развиваться на хвойных породах. А значительная часть потенциального расширения ареала приходится как раз на хвойные леса. Климатообусловленная смена фитоценозов в силу очевидных причин происходит гораздо медленнее, чем способны распространяться насекомые. Для сравнения укажем, что непарный шелкопряд и шелкопряд-монашенка, а также иксодовые клещи и кровососущие комары (Попов и др., 2013; Титкина и др., 2013, см настоящий сборник) будут осваивать заведомо пригодные для них биотопы, ставшие доступными вследствие изменения климата.

Заключение

Факторами, определяющими формирование ареала АББ, являются теплообеспеченность, особенности фотопериодической реакции и наличие кормовых растений в подходящих ценозах. В качестве климатических предикторов для моделирования ареала выбрана сумма активных температур 2000°С при пороге развития 10°С. Показано, что за период 1981-2010 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг. граница потенциального ареала АББ сместится на север, по большей части, на 1° широты, а в северо-западной части ареала (Тверская, Псковская и Новгородская области) − на 2-3°. По прогнозу изменения климата на территории России при глобальном уровне потепления 1,5°С существенное расширение ареала в северном направлении может иметь место на западе, на стыке границ России, Белоруссии и стран Балтии, а также в Западной Сибири и Дальнем востоке (до 5° по широте).

Рис. 9а.

Рис. 9б.

Рис. 9 а, б. *Изменение ареала АББ в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: а) для периода 2011-2030 гг., б) для периода 2034-2053 гг. (переход глобального интеграла через 2°С), Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

Рис. 9в.

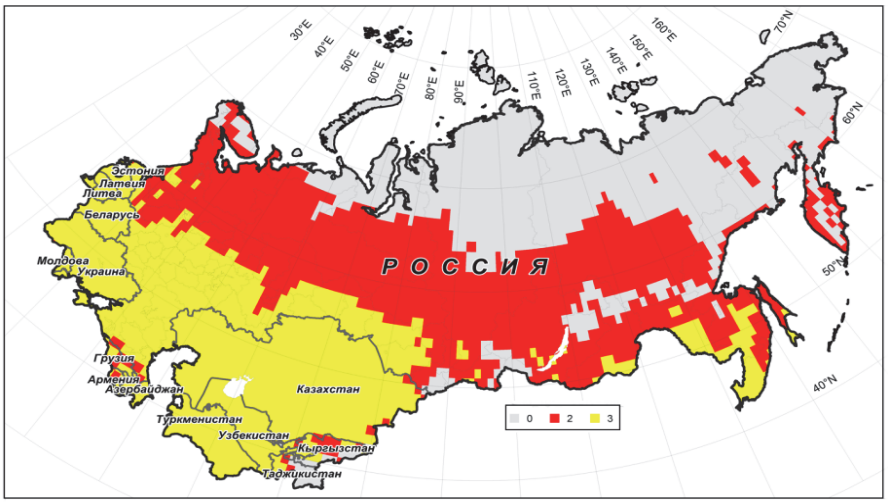

Рис. 9г.

Рис. 9 в, г. *Изменение ареала АББ в соответствии со сценарием экстремального антропогенного воздействия на климатическую систему RCP8.5: в) для периода 2041-2060 гг., г) для периода 2080-2099 гг. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено. Обозначения: как на рис. 1, позиция 1 отсутствует, так как сокращения ареала не выявлено.*

В соответствии со сценарием RCP4.5, ареал АББ будет повсеместно расширятся в северном и восточном направлении, появится изолированный от основной части участок в районе Алданского нагорья. Непригодными для заселения к концу XXI века останутся высокогорные районы Таджикистана и Киргизии, а также южная часть Сибири от стыка границ России, Казахстана и Китая до 114° с.ш. Сокращение ареала не прогнозируется. По сценарию RCP8.5 закономерности изменения ареала те же, что и по сценарию RCP4.5. Различия в том, что его расширение к северу и востоку будет более масштабным. К концу века изолированный участок на Алданском нагорье сольется с основной частью ареала, и появятся климатически пригодные для заселения участки на Камчатке и в районе Эльгинского плоскогорья. Изменения климата в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5 будут влиять на формирование ареала АББ в начале XXI века одинаково. Расхождение по степени климатического воздействия между этими сценариями начнет сказываться с 2040 годов.

Реализация климатического потенциала расширения ареала АББ к концу XXI века в полной мере в силу биоценотических ограничений представляется маловероятной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический атлас мира. 1972. Под ред. И.А. Гольцберг. –Л.: Гидрометеоиздат. 184 С.
2. Афонин А.Н.; Гринн С.Л.; Дзюбенко Н.И.; Фролов А.Н. 2006. Интерактивный Атлас полезных растений, их вредителей и экологических факторов России и сопредельных государств [Интернет-версия 1.0]. Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербургский Государственный Университет, Факультет Географии. http://www.agroatlas.ru.
3. Быковский В.А. 1998а. Особенности развития американской белой бабочки. Агро XXI. № 7. С. 20.
4. Быковский В.А. 1998б. Особенности развития американской белой бабочки. Защита и карантин растений. № 8. С. 35.
5. Быковский В.А. 1999. Особенности развития американской белой бабочки на Северном Кавказе и факторы, регулирующие ее численность. Автореферат на соискание уч. ст. канд. биол. наук. –М.: 29 С.
6. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. –М.: Росгидромет, 2014. (в печати).
7. Газиев М.Б., Мустафаева Т.М., Гянджалиев Г.А. 1999. Американская белая бабочка в Азербайджане. Защита и карантин растений. № 9. С. 33-34.

8. Гниненко Ю.И. 2011. Массовые размножения инвазивных насекомых в лесу. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 196 –С.-Пб.: СПб ГЛТА. С.209-216.
9. Гниненко Ю.И., Шамилов А.С. 2011. Американская белая бабочка Hyphantria cunea Drury − вредитель леса в России. Защита лесов юга России от вредных насекомых и болезней. Пушкино: ВНИИЛМ. С. 22−24.
10. Гниненко Ю.И., Щуров В.И., Раков А.Г. 2011. Некоторые новые инвазивные виды дендрофильных насекомых в Краснодарском крае. Защита лесов юга России от вредных насекомых и болезней. Пушкино: ВНИИЛМ. С.25-37.
11. Ижевский С.С. 2002. О возможности вывода американской белой бабочки из числа карантинных объектов. Защита и карантин растений. № 12. С. 14-17.
12. Ижевский С.С., Миронова М.К., Хорхордин Е.Г. 1999. Преодоление «пестицидного синдрома», спровоцированного появлением адвентивного насекомого-фитофага. Экология. № 1. С. 36-41.
13. Исин М.М., Шанимов Х.И., Копжасаров Б.К. 2008. Американская белая бабочка в Казахстане. Защита и карантин растений. № 9. С. 39.
14. Инструкция по борьбе с американской белой бабочкой. 1985. –М.: Агропромиздат. 16. С.
15. Клечковский Ю.Э. 2005. Прогнозирование и развитие локальных популяций американской белой бабочки. Актуальные проблемы защиты картофеля, плодовых и овощных культур от болезней, вредителей и сорняков. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика НАН Беларуси Н.А. Дорожкина. Минск. С. 162-167.
16. Кривошеев С.П. 2009. Американская белая бабочка на Украине. Защита и карантин растений. № 5. С. 36-38.
17. Кузнецов В.Н. 2005. Инвазии насекомых в наземные экосистемы Дальнего Востока России. Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. Владивосток: Дальнаука. С. 91-97.
18. Кузнецов В.Н., Стороженко С.Ю. 2010. Инвазии насекомых в наземные экосистемы Дальнего Востока России. Российский Журнал Биологических Инвазий. № 1. С. 12-18.
19. Лоладзе З.П., Парцвания М.Ш., Лобжанидзе Т.Д. 2003. Американская белая бабочка в Грузии. Защита и карантин растений. № 1. С. 30
20. Мешкова В.Л., Давиденко Е.В. 2007. Возможности разведения американской белой бабочки (Hyphantria cunea Drury) для тестирования энтомопатогенных вирусов. Информ. бюл. ВПРС/МОББ. № 38. С. 168-170.
21. Морковина А.Б., Милько Д.А. 2006. В Киргизии обнаружена американская белая бабочка. Защита и карантин растений. № 9. С. 26-27.
22. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов на землях лесного фонда Российской Федерации за 2009 год. 2010. Пущино: ФГУ «Российский центр защиты леса». 179 С.
23. Орозумбеков А.А. 2011. Перспективы и проблемы защиты леса в Центральной Азии. Болезни и вредители в лесах России: век XXI. Материалы Всероссийской конференции с международным участием и V ежегодных чтений памяти О.А.Катаева. Екатеринбург, 20-25 сентября 2011 г. Красноярск. С. 21-23.

24. Попов И.О., Титкина С.Н., Семенов С.М., Ясюкевич В.В. 2013. Модельные оценки распространения переносчиков некоторых болезней человека в XXI веке в России и соседних странах. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. –М.: ИГКЭ. (В печати).
25. Резайи В. 2006. Некоторые особенности американской белой бабочки в Иране. Защита леса от вредителей и болезней. Пушкино: ВНИИЛМ. С. 196-198.
26. Саулич А.Х. 1994. Значение абиотических факторов при формировании вторичных ареалов адвентивных видов насекомых. Энтомологическое обозрение. Т. 73, № 3. С. 591-605.
27. Саулич А.Х. 1999. Экспериментальный анализ сезонного развития насекомых и возможности их расселения. –С.-Пб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та. 248 С.
28. Саулич А.Х., Волкович Т.А. 2004. Экология фотопериодизма насекомых. –С.-Пб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та 276 С.
29. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. –М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.
30. Семенов С.М., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Попов И.О., Титкина С.Н. 2013. Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –М.: ИГКЭ. Т. 25. (В печати).
31. Титкина С.Н., Попов И.О., Семенов С.М., Ясюкевич В.В.. 2013. Изменение распространения в России и соседних странах непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки (Lymantria dispar L. и Lymantria monacha L., Lymantriidae, Lepidoptera) под влиянием наблюдаемого и ожидаемого в XXI веке изменения климата. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. –М.: ИГКЭ. (В печати).
32. Фокин А.В. 2008. Американская белая бабочка как вредитель…кирпича. Защита и карантин растений. № 9. С. 41.
33. Чернышев В.Б. 1996. Экология насекомых. –М.: Изд-во МГУ. 304 С.
34. Чураев И.А. 1962. Американская белая бабочка. –М.: Сельхозиздат.103 С.
35. Шамилов А.С. 2008. Американская белая бабочка в Дагестане. Защита и карантин растений. № 8. С. 29.
36. Шамилов А.С. 2011. Американская белая бабочка и система защитных мероприятий в очагах ее массового размножения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. –М.: ФГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ВНИИЛМ). 22 С.
37. Ясюкевич В.В., Попова Е.Н., Гельвер Е.С., Ривкин Л.Е. 2007. Влияние климатических факторов на формирование ареала колорадского жука (Leptinotarsa decemlineata Say). Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. –С.-Пб.: Гидрометеоиздат. Т. 21. С. 348-379.
38. Gomi T. 1999. Seasonal adaptation and expansion of distribution in the fall webworm Hyphantria cunea in Japan. Biol. invasions of ecosystems by pests and beneficial organisms. Tsukuba P. 88-97.
39. Gomi T. 2007. Seasonal adaptation of the fall webworm Hyphantria cunea following its invasion of Japan. Ecological research. V. 22, №6. P. 855-861.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ПРОДОЛЖАЮЩЕГОСЯ ИЗДАНИЯ

«ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ» (ПЭММЭ)

Редколлегия: академик РАН Ю.А. Израэль (председатель),
д.ф.-м.н., проф. С.М. Семенов (зам. председателя, редактор),
д.б.н., проф. В.А. Абакумов, к.б. н. Г.Э. Инсаров,
д.б.н. В.В. Ясюкевич (ответственный секретарь).

Адрес: РФ, 107258 Москва ул. Глебовская, д. 20Б.
Институт глобального климата и экологии, Редколлегия ПЭММЭ.
Тел.: +7 499 1691103, факс: +7 499 1600831, e-mail: v1959@yandex.ru

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Издается с 1978 года. Является продолжающимся изданием Института глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН.

В издании публикуются работы о явлениях и процессах регионального и глобального масштабов, связанных с антропогенным влиянием на климат и континентальные экосистемы, изменении климата и его последствиях, о методах их изучения с помощью мониторинга и моделирования.

К рассмотрению принимаются экспериментальные и теоретические статьи по указанной тематике на русском и английском языках. Ориентировочный объем рукописи – до 1 авторского листа (40 тыс. знаков). Представленные в ПЭММЭ статьи рецензируются. При необходимости Редколлегия приглашает авторов выступить с сообщением по теме статьи на научном семинаре в ИГКЭ. Редколлегия просит авторов не представлять в ПЭММЕ статьи, напечатанные или направляемые для публикации в другие издания. Представляемые тексты должны соответствовать тематике издания, быть написаны удовлетворительно с литературной точки зрения и оформлены в соответствии с правилами. Редколлегия принимает окончательное решение по поводу публикации статьи в

соответствии с результатами рецензирования, а также учитывая качество литературной и технической подготовки текста.

Оформленные по правилам рукописи направляйте по адресу в электронном виде (распечатка не требуется): Виктор Викторович Ясюкевич, v1959@yandex.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Формат статьи

(Авторам рекомендуется консультироваться по последнему тому ПЭММЕ. Статьи рекомендуется оформлять по приводимому образцу, в особых случаях автор может получить консультацию в редакции).

АНТРОПОГЕННЫЕ ЭМИССИИ ОКИСЛОВ СЕРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РОСТ РАСТЕНИЙ

А.Б. Иванов[1)], В.Г. Петров [2)]

[1)] Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, ivanov@glasnet.ru

[2)] Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., д. 29, Институт географии РАН, petrov@glasnet.ru

Реферат. Кратко излагаются основные результаты работы. Какие-либо библиографические ссылки не допускаются.

Ключевые слова. Не более 10 слов или словосочетаний из 2-х слов.

ANTHROPOGENIC EMISSIONS OF SULPHUR OXIDES AND THEIR INFLUENCE ON PLANT GROWTH

A.B. Ivanov[1)], V.G. Petrov[2)]

[1)] Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, ivanov@glasnet.ru

[2)] Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia, petrov@glasnet.ru

Abstract. Дается перевод реферата на английский язык.

Keywords. Перевод ключевых слов на английский язык.

(Дальнейший текст (начинается с новой страницы) – только на русском языке или же только на английском языке)

Введение

Этот раздел должен содержать: – место предлагаемой статьи среди других работ по этой или близкой тематике, – краткую историю вопроса; – формулировку целей представленной статьи.

Методы и материалы

Этот раздел должен содержать: – описание экспериментальных или теоретических методов, используемых авторами в работе; – материалов лабораторных или полевых исследований, данных сетевых наблюдений или иных материалов, используемых в работе, или же информации, заимствованной из литературных научных источников. Все методы и материалы, не являющиеся оригинальными авторскими, необходимо приводить со ссылками.

Результаты

В этом разделе дается описание полученных в работе результатов, в том числе, в виде таблиц и рисунков.

Дискуссия

В этом разделе результаты, полученные авторами, сравниваются с опубликованными результатами других авторов (или более ранними результатами тех же авторов), констатируются сходство или же различия, новизна и неожиданность полученных авторами результатов. Указывается перспектива дальнейших исследований по затронутой проблеме.

(По желанию авторов, разделы «Результаты» и «Дискуссия» могут быть обединены)

Заключение

Обобщающая часть статьи, может входить как часть в раздел «Дискуссия».

По желанию авторов, вместо «Заключения» результаты работы могут быть обобщены в виде «Выводов» (по пунктам).

Благодарность

Этот раздел не является обязательным. В нем выражаются благодарности частным лицам и организациям за поддержку и помощь, оказанные авторам при проведении исследования и/или подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Содержит список цитированной литературы (см. ниже).

2. Технические требования к рукописи.

Статья может быть написана на русском или английском языках. Объем не должен превышать 1 печатный лист (40 тыс. знаков). Статья должна быть представлена в виде файла для Word/Windows (версия 6 или старшие) и может содержать не только текст, но и рисунки, таблицы, подрисуночные подписи. Исключение могут составлять рисунки, выполненные четко от руки тушью на белой бумаге и фотографии (если нет возможности сканирования). При сканировании рисунков и фотографий – разрешение не менее 300 точек на дюйм. Текст должен быть набран гарнитурой «Times», размер шрифта не менее 12, с полуторным межстрочным интервалом. Поля страниц рукописи должны быть не менее: левое – 2,5 см, верхнее и нижнее – не менее 2,0 см, правое – 1,0 см. Автор должен показать в рукописи соподчиненность заголовков, заголовки и подзаголовки одного уровня по всему тексту должны быть набраны идентично, например:

ЛИШАЙНИКИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Введение

Глобальные изменения климата
Исследования вдоль высотного градиента.

Заголовки и подзаголовки отделяются от основного текста сверху и снизу одним межстрочным интервалом.

Текст статьи набирается в формате А4, с полуторным межстрочным интервалом, на одной стороне листа (см. выше).

Приложения не допускаются.

Составление списка литературы. Печатается с новой страницы. Сначала приводятся источники, названия которых написаны кириллицей, а затем – латинскими буквами. Внутри этих частей списка литературы соблюдается лексикографический порядок по авторам, а при их полном совпадении – по году издания. При полном совпадении авторов и года издания при годе вводится дополнительный индекс (1997а, 1997б; 2006a, 2006b для русскоязычных и иностранных источников). Источники не нумеруются.

Примеры:

статья в сборнике

Аржанова В.С., Елпатьевский П.В., Кравцова В.М. 1987. Геохимическая дендрохронология фоновых и импактных эколого-геохимических условий. В кн.: Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 4. –Л.: Гидрометеоиздат, С. 327-341.

статья в журнале

Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. 1988. Содержание металлов в листьях дуба монгольского в условиях аэротехногенного воздействия. Лесоведение, № 5, с. 45-52.

монография

Лархер В. 1976. Экология растений. –М.: Мир, 384 с.

источник без авторов (например, доклад, обзор и пр. без авторов)

Canada's Greenhouse Gas Emisission: Estimates for 1990. 1992. Rep. Environ. Protec. Series 5/AP/4. Ottawa, 78 p.

Climate Change 2001. 2001a. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Houghton J. T., et al., editors). Cambridge University Press, Wrong year for SAR WG2. 881 p.

Цитирование: В тексте статьи литературные источники приводятся по фамилии автора и году издания, например, один автор – (Иванов, 1995), два автора – (Иванов, Петров, 1998), более двух авторов – (Thompson et al., 1997). Цитирование по номерам не допускается.

Если авторов нет: (Canada's Greenhouse Gas Emisission..., 1992), т.е. указывается начальная часть названия источника, обозначающая смысловое целое, и год издания. Это укороченное название должно быть одинаковым во всем тексте статьи.

Оформление таблиц: – печатаются через 1 машинописный интервал (размер шрифта не менее 10), каждая на отдельной странице, которая помещается в тексте статьи сразу после страницы, где таблица первый раз упоминается; – все таблицы должны быть пронумерованы и иметь название. Материал таблиц, по возможности, должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. В таблице возможны сноски.

Например:

Табл. 1. Время восхода Солнца в Москве (ч)[1)]

[1)] Время указано по Гринвичу

Рисунки и фотографии: не включаются в текст статьи. Каждый рисунок предоставляется в виде отдельного файла (расширение xls, jpg, tif, bmp, с **разрешением не менее 300 точек на дюйм**), из названия которого ясно, какой это рисунок. В неясных случаях указывается верх и низ. Подписи к ним предоставляются отдельным файлом (см. ниже). Рисунки должны содержать возможный минимум надписей, но при этом они должны быть понятны без обращения к тексту. Имеющиеся на рисунках детали при необходимости обозначаются арабскими цифрами или строчными буквами, которые расшифровываются в подрисуночной подписи. Рисунки можно представлять как в черно-белом, так и цветном исполнении. Импортированные в Word рисунки не принимаются.

Фото: (если нет возможности сканирования) подписываются на обратной стороне (не продавливая!) с указанием верха и низа. Если

фотографии не несут на лицевой стороне каких-либо пометок, они представляются в 2-х экземплярах нескрепленными и не наклеенными на бумагу. Если есть необходимость указать какие-либо детали на фото, это делается на 3-м экземпляре. Если фотографий много, желательно представить макет их расположения на листе.

Карты и картосхемы желательно приводить с координатной сеткой, масштабной линейкой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. Если используются какие-либо условные обозначения и/или цвета, необходимо привести легенду. Условные обозначения и/или градации цвета должны быть ясно различимы. В углу крупномасштабной карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты. Остальные требования – как к другим рисункам.

Подрисуночные подписи: все подрисуночные подписи приводятся отдельным файлом. Указываются ФИО авторов и названия статьи, даются подрисуночные подписи в порядке возрастания номеров рисунков. Например:

Подрисуночные подписи к статье А.Б. Иванова «Изменения климата в России».

Рис. 1. Климатическая карта России
Рис. 2. Распределение осадков по их интенсивности.

Порядковый номер рисунка или таблицы желательно вынести на левое поле той страницы рукописи, где этот рисунок или таблица впервые упоминается (вблизи места первого упоминания: Рис. 1 или Табл. 1.)

Видовые и родовые биологические названия на латыни должны даваться курсивом. Пример: *Solenopsis invicta* Buren.

3. Сопроводительные документы

К статье должно быть приложено письмо автора (авторов) с просьбой о публикации, в котором необходимо указать:

- фамилию, имя, отчество (полностью) автора (авторов),

- почтовый адрес (служебный и/или домашний), телефон, факс, e-mail, если авторов несколько, указать, с кем из них редколлегия должна вести переписку.

Наличие акта экспертизы не является обязательным, однако редколлегия оставляет за собой право в отдельных случаях запросить акт экспертизы дополнительно.

Статьи должны быть подписаны всеми авторами. Если авторы живут в разных городах, каждый из них должен прислать в редакцию титульный лист статьи со своей подписью.

4. Прохождение статей

Редколлегия оставляет за собой право отклонять статьи, не соответствующие тематике издания, написанные неудовлетворительно с научной и/или литературной точки зрения, а также оформленные с отступлением от настоящих правил.

При соблюдении этих требований статья направляется на рецензию одному из ведущих специалистов в данной области. Затем статья с текстом рецензии направляется автору для ознакомления и переработки (если это необходимо). Автор возвращает переработанный вариант статьи, сопроводив его письмом – ответом рецензенту. Редколлегия рассматривает переработанный вариант статьи, рецензию и ответ автора рецензенту и принимает решение о публикации рукописи в сборнике или (по необходимости) о ее дальнейшей переработке. Редколлегия просит авторов производить переработку своих статей в максимально сжатые сроки, чтобы успеть к подписанию тома в печать.

За справками обращаться к секретарю по адресу редакции или по телефону: +7 499 169-11-03 (служебный), +7 499 618-78-51 (домашний); v1959@yandex.ru Ясюкевич Виктор Викторович

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

ТОМ XXV

Научный редактор *В.В. Ясюкевич*

Технический редактор

Корректор *В.В. Ясюкевич*

Верстка *Г.В. Баринов*

Формат 60x90 1/16.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Печ. л. 30,5. Тираж 500 экз. Заказ № 13-272

Подписано в печать 18.11.2013

Отпечатано в ЗАО «Группа МОРЕ»

101000, Москва, Хохловский пер., д. 7-9, стр. 3