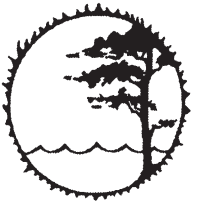
ISSN 0207—2564

ИГКЭ
IGCE



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 XXII

MOSCOW IGCE 2009

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том XXII

МОСКВА ИГКЭ 2009

УДК 551.510.42

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: (8 499) 1600831 Тел.: (8 499) 1691103

Все статьи данного издания рецензируются.

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) 1600831 Phone: (7 499) 1691103

All papers of this book are peer-reviewed.

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 изменения климата. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований, а также математические модели процессов.

Для климатологов и экологов широкого профиля.

The issues of monitoring and assessment of nature system 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 and environmentalists.

© Институт глобального климата
и экологии Росгидромета
и РАН, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Ю. А. Израэль, Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова. Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата 7

А. В. Дзюба. Статистический диагноз и возможные причины современных изменений приземной температуры воздуха в атлантико-евразийской части приполярной зоны 27

С. М. Семенов. Модельные оценки влияния изменений свойств поглощения и рассеяния лучистой энергии атмосферой на равновесную среднюю температуру земной поверхности 48

Е. А. Черенкова, Т. Б. Титкова. Изменение увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в условиях глобального потепления . 64

А. Н. Золотокрылин, Т. Б. Титкова. Климатический фактор динамики растительности засушливых земель Европейской территории России 79

М. Д. Корзухин, Ю. Л. Цельникер. Анализ распространения и чистой первичной продукции четырёх лесных пород деревьев в России с помощью экофизиологической модели 92

Е. Н. Попова, И. О. Попов. Вредные саранчовые на юге России и климатические факторы, влияющие на их размножение и распространение 124

В. В. Ясюкевич. Б. А. Ревич. Изменение климата на территории России и здоровье населения 147

В. В. Ясюкевич. Кровососущие комары как переносчики климатозависимых заболеваний 170

В. В. Ясюкевич, Е. В. Казакова, И. О. Попов. Возможное влияние изменения климата на распространение клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* (*Parasitiformes, Ixodidae*) на территории России 198

В. А. Грабар, Т. М. Дмитриева, М. Л. Гитарский. К оценке атмосферной эмиссии диоксида углерода от международных авиаперевозок из России 207

О. В. Тайлаков, А. Н. Кормин, В. О. Тайлаков, М. Л. Гитарский. Эмиссия метана при добыче угля в России 216

С. Н. Котельников, В. А. Миляев, В. В. Саханова. Положительные аномалии концентрации приземного озона в атмосфере некоторых фоновых районов 227

А. Г. Костяной, О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина. Комплексный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения морей России 235

И. Н. Бахмет. Оценка влияния нефтепродуктов на сердечный ритм мидий 267

CONTENTS

Yu. A. Izrael, G. V. Gruza, E. Ya. Rankova. Limits of predictability and strategic forecast of climate change 7

A. V. Dzuba. Statistical diagnosis and possible drivers of recent changes in surface air temperature in the Atlantic-Eurasia part of the polar zone 27

S. M. Semenov. Model estimates of the effects of changes in absorption and dispersion radiative properties of the atmosphere on equilibrium temperature of the Earth's surface 48

E. A. Cherenkova, T. B. Titkova. Changes in the moistening of sub-boreal plain landscapes in Russia under global warming 64

A. N. Zolotokrylin, T. B. Titkova. Climatic factor of vegetation dynamics in dry lands of the European part of Russia 79

M. D. Korzukhin, Yu. L. Tcelniker. Analysis of distribution and net primary production of the four forest tree species in Russia with an ecophysiological model 92

E. N. Popova, I. O. Popov. Harmful locusts of south Russia and climatic factors affecting their reproduction and distribution 124

V. V. Yasukevich, B. A. Revich. Climate change in Russia and human health 147

V. V. Yasukevich. Sanguivorous mosquitoes as vectors of climate-dependent diseases 170

V. V. Yasukevich, E. V. Kazakova, I. O. Popov. Possible influence of a changing climate on the distribution of ticks *Ixodes ricinus* and *Ixodes persulcatus* (*Parasitiformes, Ixodidae*) in Russia 198

V. A. Grabar, T. M. Dmitrieva, M. L. Gytarsky. On the estimation of atmospheric emissions of carbon dioxide from international flights operated from Russian territory 207

O. V. Tailakov, A. N. Kormin, V. O. Tailakov, M. L. Gytarsky. Methane emissions from coal mining in Russia 216

S. N. Kotelnikov, V. A. Milyaev, V. V. Sakhanova. Positive anomalies of graund-level ozone concentrations in the atmosphere of some background regions 227

A. G. Kostianoy, O. Yu. Lavrova, M. I. Mityagina. Integrated satellite monitoring of oil pollution in the Russian seas 235

I. N. Bakhmet. Estimation of oil products' effects on the mussel cardiac rhythm 267

ПРЕДЕЛ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ И СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

***Ю. А. Израэль, Г. В. Груза*[1)], *Э. Я. Ранькова*[2)]**

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д.20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, [1)]gruza@newmail.ru, [2)]rankova@online.ru

Реферат. Климат трактуется как совокупность состояний климатической системы в целом (или ее части) за некоторый промежуток времени. Приводится краткая справка о климатических изменениях приповерхностной температуры для Земного шара и территории России, согласно которой наблюдаемые изменения указывают на глобальное потепление, наиболее четко выраженное после семидесятых годов XX века. Показано, что климатические модели удовлетворительно воспроизводят поля многолетних средних, сезонный ход и тенденции изменений некоторых метеопараметров в XX столетии, тогда как межгодовая изменчивость (после исключения тренда) практически не отражает наблюдаемых изменений. Рассматриваются два подхода к построению стратегического прогноза климатических изменений на территории России в ближайшие десятилетия: регрессия с учетом ожидаемых изменений концентрации CO_2 и статистическая коррекция сценарных модельных прогнозов. Предлагается вариант вероятностного стратегического прогноза температуры воздуха на тридцатилетний период 2006 – 2035 гг. для территории России.

Ключевые слова. Климат, изменения климата, стратегический прогноз, климатическая модель, предсказуемость, температура у поверхности, глобальное потепление, сценарный прогноз.

LIMITS OF PREDICTABILITY AND STRATEGIC FORECAST OF CLIMATE CHANGE

***Yu. A. Izrael, G. V. Gruza*[1)], *E. Ya. Rankova*[2)]**

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20b, Glebovskaja str., 107258 Moscow, Russia, [1)]gruza@newmail.ru, [2)]rankova@online.ru

Abstract. 'Climate' is defined as a set of states of the climate system as a whole (or its part) for a given time period. A brief summary of observed climatic changes in surface temperature for the Globe and Russia is presented. It shows that observed climate changes indicate the global warming that has become the most pronounced since 1970s. It is also shown that modern climate models reproduce well spatial fields of mul-

tiyear mean values of some meteorological parameters, their seasonal course, and long-term trends for the 20th century, whereas the inter-annual variability of detrended data practically has not been explained by models. Two approaches to constructing the strategic forecast of climate changes for the nearest decades for Russia are proposed: the use of regression relationships between changes in climate and changes in CO_2-concentrations, and statistical correction of the model outputs. A version of probabilistic strategic forecast of surface temperature for Russia for the next thirty years 2006–2035 is presented.

Keywords. Climate, climate change, strategic forecast, climate model, predictability, surface temperature, global warming, projection.

Введение

Вопрос о современных изменениях климата серьезно волнует человечество в течение последних десятилетий. Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) выпустила первое заявление об угрозе глобальному климату в 1976 г., а в 1979 г. учредила Всемирную Климатическую Программу (ВКП), которая стала основой международной деятельности в области климата. Деятельность ВКП, в частности, была направлена на улучшение мониторинга климатической системы и разработку методов для оценки влияния изменений климата на природу и человека.

В 1992 г. принята «Рамочная Конвенция по Изменению Климата» (РКИК) ООН. Для научного обеспечения деятельности по РКИК усилиями ВМО/ЮНЕП была создана Межправительственная Группа Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК, на английском языке – IPCC), основной задачей которой является наиболее полная и объективная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата и роли антропогенных факторов. К настоящему времени МГЭИК подготовлены и опубликованы четыре научных отчета (1990, 1995, 2001 и 2007 гг.), в которых приводятся, в частности, основные данные о наблюдаемом климате и его изменениях, о моделях климата и о степени соответствия результатов моделирования данным наблюдений. Эти отчеты опубликованы и доступны (некоторые на русском языке) на Интернет-сайте МГЭИК http://www.ipcc.ch.

Попытка борьбы с глобальным потеплением осуществляется в настоящее время в рамках Киотского протокола, срок действия которого истекает в 2012 году. Активно обсуждаются вопросы противодействия глобальному потеплению после Киотского протокола.

В 2005 г. Росгидромет опубликовал «Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России» (доступен на сайте Росгидромета http://www.meteorf.ru). В этом издании очень кратко

изложены современные представления о наблюдаемых и ожидаемых изменениях климата на территории России. Основное внимание уделено оценке влияния климата и его изменений на окружающую среду и деятельность человека. Показано, что последствия изменений климата могут оказаться весьма существенными, и к ним необходимо вести серьезную подготовку.

В 2008 г. опубликована серия из трех статей сотрудников ГГО под общим названием «Климат России в XXI веке» (Мелешко и др. 2008а, 2008б; Говоркова и др., 2008). Название, на наш взгляд, выбрано неудачно. Более уместным, по-видимому, было бы говорить об «ожидаемых изменениях климата» или хотя бы о «прогнозе климата», так как все выводы в этих статьях базируются на результатах климатического моделирования, а даже самые сложные современные климатические модели недостаточно совершенны. Кроме того, есть факторы формирования климата, о поведении которых нам пока ничего не известно (например, предстоящие извержения вулканов или новые технологии производства энергии).

В настоящей статье предлагается несколько иной подход к составлению стратегического прогноза изменений климата.

Определение климата и изменений климата

Применительно к задаче анализа климата и климатической изменчивости по данным наблюдений в условиях меняющегося климата авторы придерживаются определения термина «КЛИМАТ» как совокупности состояний «ПОГОДЫ» (Груза, Ранькова, 2003; 2004).

Погода определяется как физическое состояние атмосферы в заданной точке земного шара в заданный момент времени. Характеристиками состояния атмосферы являются погодные переменные или элементы погоды, такие как температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, влажность, осадки, а также явления типа: туман, иней, град и другие. Климат есть «совокупность погод» и представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание погодных переменных за выбранный период времени в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости и др. Все эти дескриптивные статистики называются климатическими переменными.

В этом определении подчеркивается как географический (область пространства), так и исторический (период времени) характер климата. В качестве стандартного периода для оценивания климатических переменных, характеризующих текущий или современный климат, по рекомендации ВМО используется период в три десятилетия. В настоящее время официально принят период с 1961 г. по 1990 г.

Для научных целей могут использоваться и другие периоды, оговариваемые в тексте.

В современных исследованиях термин «Климат» используется также вместо термина «Глобальный Климат», который характеризуется набором состояний Глобальной Климатической Системы в течение заданного интервала времени (под климатической системой понимается часть природной среды, включающая пять основных взаимодействующих друг с другом компонентов: атмосферу, гидросферу, криосферу, деятельный слой суши и биосферу).

Изменение состояния климатической системы происходит под влиянием внутренней динамики и взаимодействия ее компонентов, а также внешних воздействий, таких как: извержения вулканов, изменения потока солнечного излучения и орбитальных параметров Земли, антропогенные возмущения. К последним относятся, например, изменения химического состава атмосферы в результате деятельности человека, изменения землепользования и т.п.

Таким образом, ***климат*** определяется совокупностью состояний климатической системы в целом (глобальный климат) или ее части (климат региона, страны, города) за некоторый промежуток времени (климат XX века, климат XXI века, климаты прошлого). Для описания климата используются статистические характеристики метеорологических величин и явлений – средние величины, экстремальные величины, повторяемость, продолжительность и интенсивность экстремальных явлений и другие.

Полезно напомнить определения климата, сформулированные А.С. Мониным: «В наиболее лаконичном и общем виде такое определение можно высказать в семи словах: *распределение вероятностей на фазовом пространстве климатической системы.* Но чтобы оно было понятным не только людям в белых одеждах, но и всем людям в самых пестрых одеждах, эти слова необходимо детально расшифровать. Одним из шагов к расшифровке может стать следующая, более многословная, перефразировка нашего определения: климат – это статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой за достаточно длительные промежутки времени» (Монин, Берестов, 2005).

Есть еще и третья формулировка, вряд ли предназначенная для круга читателей настоящей статьи: «Климат – это нетривиальная инвариантная вероятностная мера, сосредоточенная на странном аттракторе климатической системы» (Монин, Сонечкин, 2005).

Второе из этих определений более всего соответствует нашему пониманию и практике использования термина «климат», но неясно, что значит «достаточно длительные промежутки времени», а понятия «аттрактор» и «ансамбль» относятся скорее к математической модели, чем к реальному объекту.

Изменения климата от одного периода к другому могут оцениваться как разность климатических переменных, характеризующих климаты конечного и начального периодов, или как тенденции изменений климатических переменных внутри всего рассматриваемого интервала времени. Тенденции обычно рассчитываются как линейная аппроксимация временного ряда исследуемой климатической переменной (синоним – линейный тренд) и характеризуют среднюю скорость ее однонаправленных изменений на заданном интервале времени. Как правило, аппроксимация выполняется методом наименьших квадратов.

Для оценки климатических изменений температуры у поверхности Земли используются результаты регулярных измерений температуры воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью (на мировой сети метеорологических станций) и температуры поверхности воды морей и океанов. Пространственное осреднение выполняется обычно по значениям не самих температур, а их аномалий, то есть отклонений от средних за выбранный базовый период (называемых также «нормами»).

Метеорологические наблюдения в России начаты более 250 лет тому назад. Однако для надежных оценок изменений климата имеются данные с начала 90-х годов XIX века для западной части территории России, а для страны в целом – лишь с 1936–1939 гг.

Анализ современных изменений климата на территории РФ выполнен в настоящей работе по данным инструментальных наблюдений (температура приземного воздуха и количество атмосферных осадков) на 455 станциях России, других стран СНГ и Балтии (каталог станций можно найти на сайте ИГКЭ http://climatechange.su), накопленных за период с 1886 г. по настоящее время в процессе мониторинга климата России.

Современные климатические изменения приповерхностной температуры Земного шара и на территории России

Наблюдаемое в настоящее время изменение климата можно охарактеризовать как «продолжающееся глобальное потепление».

Глобальное потепление в XX веке было не вполне однородным. Выделяются три интервала: потепление 1910–1945 гг., слабое похолодание 1946–1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 г. Отметим, что первое потепление сразу же было замечено российскими учёными и получило название «потепление Арктики» – уместно вспомнить активное освоение Северного морского пути, знаменитую зимовку Папанинцев, эпопею Челюскинцев. Отметим также, что именно с семидесятых годов XX века возросло количество исследований, посвященных проблеме колебаний и изменений климата, как естественных, так и связанных с антропогенным влиянием. И именно в 1970-х годах становится очевидной необходимость непрерывного слежения за текущим состоянием климата.

На рис. 1 приведен ход температуры приземного воздуха, осредненной по территории России, и глобально осредненной приповерхностной температуры Земного шара. Можно видеть, что территория России существенно более чувствительна к глобальному потеплению, чем Земной шар в целом: размах аномалий среднегодовых температур РФ достигает 3–4°С, в то время как в среднем для Земного шара он лишь несколько превосходит 1°С. Самым теплым для территории России оказался 2007 год, когда средняя годовая температура превысила «норму» на величину 2,10°С – значение, максимальное за период с 1886 г. Предыдущие максимумы зафиксированы в 1995 и 2005 гг., когда превышения «нормы» 1961–1990 гг. составили 2,07°С и 1,54°С, соответственно. Для Земного шара в целом самым теплым был 1998 год, а на следующих семи местах – все семь лет начавшегося столетия.

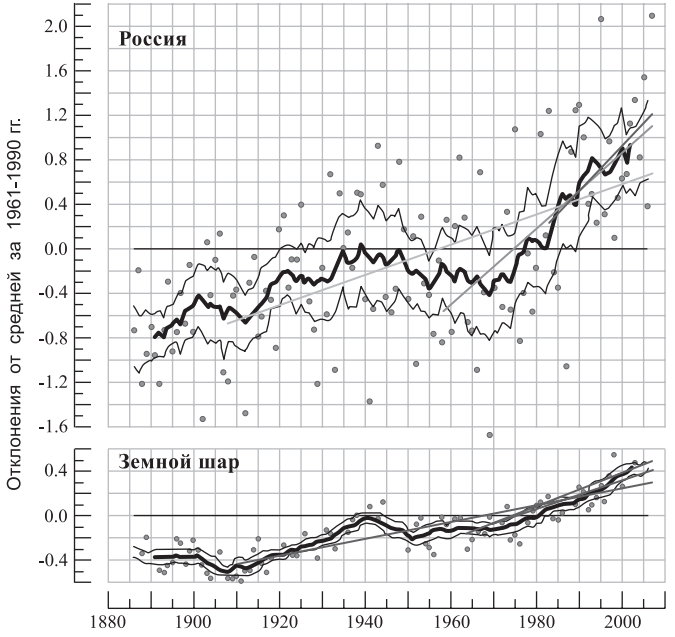


Рис. 1. Изменения температуры приземного воздуха, осредненной по территории России (сверху, данные ИГКЭ), и глобально осредненной приповерхностной температуры Земного шара (внизу, данные Brohan et al., 2006) за 1886-2007 гг. Точками показаны среднегодовые значения аномалий. Жирная кривая соответствует ходу 11-летних скользящих средних. Тонкими линиями отмечены границы 95% доверительных интервалов и линейные тренды, приведенные за последние 25, 50 и 100 лет, что соответствует периодам: 1983-2007, 1958-2007 и 1908-2007 гг.

Средняя скорость потепления (коэффициент линейного тренда) за 1976–2007 гг. для территории России составила 0,48°С/10 лет. Наиболее интенсивным повышение среднегодовых температур в этот период было на Европейской территории России (0,53°С/10 лет), в Средней Сибири и в Прибайкалье и Забайкалье (0,52°С/10 лет). Сезонные оценки региональных трендов позволяют определенно отметить тенденцию к потеплению в Восточной Сибири (кроме зимы), в Приамурье и Приморье (осенью) и в Прибайкалье и Забайкалье (в теплый период года). В остальных случаях, включая сезон зимы во всех регионах, однонаправленные тенденции в изменении соответствующих регионально осредненных температур ответственны за малую долю суммарной изменчивости (вклад в дисперсию ниже 20% и даже 10%). Единственная из региональных оценок указывает на тенденцию к похолоданию – для зимних температур в регионе Восточной Сибири. Однако, вклад этого тренда в дисперсию слишком мал для суждения о реальных тенденциях изменения температуры в этом регионе и их устойчивости. Подробное обсуждение географических и сезонных особенностей современных климатических изменений приповерхностной температуры на территории России можно найти, например, в (Груза, Ранькова, 2004; Груза и др., 2007).

Реальность современного глобального потепления и его причины

Реальность современного глобального потепления подтверждается многими фактами. Главные из них: рост глобальной приповерхностной температуры сопровождается ростом среднего (глобального) уровня океана и обнаруженным уменьшением площади снежного покрова на суше Северного полушария (IPCC, 2007). Интенсивность глобального потепления оказывается весьма значительной, и научное объяснение этого явления стало актуальной практической задачей для человечества, так как последствия ожидаемых изменений климата могут оказаться весьма серьёзными.

Основным средством исследования закономерностей формирования климата и его изменений являются физико-математические модели. Для осуществления моделирования климата с помощью таких моделей требуется самая мощная вычислительная техника. Необходимы также данные об изменении естественных (солнечное излучение, вулканы и др.) и антропогенных (эмиссии парниковых газов при сжигании органического топлива, выбросы озонообразующих веществ, землепользование и др.) факторов. В настоящее время для моделирования климата в ведущих метеорологических центрах мира используются, в соответствии с международными научными программами, два-три десятка наиболее продвинутых моделей. Одна

из таких моделей создана в Институте вычислительной математики РАН под руководством акад. В. П. Дымникова. Некоторые результаты моделирования климата, полученные с помощью этой модели Е. М. Володиным (Дианский, Володин, 2002), использованы в настоящей работе.

Результаты моделирования климата XIX–XX вв. используются для оценки качества воспроизведения моделями реального наблюдаемого климата (этот вопрос рассматривается ниже), а также для оценки роли различных факторов в изменении климата (данные о факторах в этом случае вводятся в модель по результатам наблюдений). В частности, по этим результатам удалось получить убедительное доказательство антропогенного происхождения современных изменений климата, по крайней мере, во второй половине XX века. Важнейшим фактором оказался рост концентрации углекислого газа в результате сжигания органического топлива; на втором месте, хотя и с меньшим вкладом, – изменения в землепользовании (IPCC, 2007).

Глобальная концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась с 280 ppm в доиндустриальную эпоху до 379 ppm в 2005 г. (для сравнения: естественный диапазон значений этой величины в последние 650 тыс. лет, определенный по кернам льда, составляет 180-300 ppm). Годовые темпы роста концентрации углекислого газа за десятилетие 1995–2005 гг. (1,9 ppm / год) выше, чем в целом за период непрерывных прямых атмосферных измерений 1960–2005 гг. (1,4 ppm / год).

В (IPCC, 2007) описаны многочисленные сопоставления результатов моделирования изменений приповерхностной температуры в XX веке как с учетом всех факторов формирования климата, естественных и антропогенных, так и с исключением фактора антропогенного роста концентрации парниковых газов. Эти сопоставления, выполненные, для крупных регионов Земного шара, показали, что без учета антропогенного фактора невозможно объяснить повсеместный рост температуры, наблюдаемый во второй половине XX века. Доказательства антропогенной природы этого увеличения (вследствие антропогенного роста концентрации парниковых газов в результате сжигания органического топлива) особенно убедительны для периода после 1976 года.

Пример такого эксперимента воспроизведен на рис. 2 для глобальной приповерхностной температуры. Здесь показаны временные ряды (с 1900 г.) глобально осредненных температур: наблюдавшихся, «модельных» по данным индивидуальных прогонов и «модельных», осредненных по мультимодельному ансамблю. Вертикальные серые линии на рисунке указывают годы самых крупных извержений вулканов. Моделирования, завершившиеся рань-

ше 2005 года, продлены до 2005 г. по нескольким первым годам эксперимента SRES A1B. На этом рисунке, кроме уже упомянутого вывода о ведущей роли фактора антропогенного роста концентрации парниковых газов в глобальном потеплении в конце XX века, четко видно, что *модели практически не воспроизводят ни потепление 1910 – 1945, ни слабое похолодание 1946 – 1975 годов*. Причины этого, более раннего, потепления и сменившего его похолодания требуют, таким образом, дополнительного объяснения.

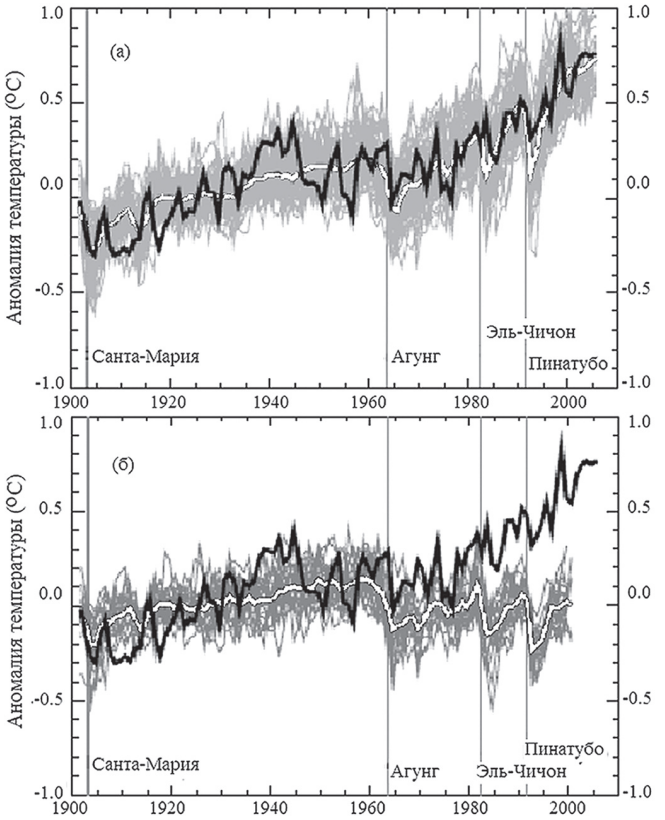


Рис. 2. Результаты моделирования изменений глобальной приповерхностной температуры Земного шара в 20-м веке с использованием моделей, учитывающих: (*а*) все воздействующие факторы, естественные и антропогенные (14 моделей, 58 прогонов) (*б*) только естественные факторы (5 моделей, 19 прогонов). Аномалии рассчитаны относительно периода 1901–1950 гг. Черная кривая соответствует наблюдениям, тонкие линии – результатам индивидуальных прогонов, светлая кривая – осреднению по мультимодельному ансамблю. Вертикальные серые линии указывают годы самых крупных извержений вулканов (цитируется по IPCC, 2007).

Вероятностные прогнозы погоды и климата

Научный прогноз погоды и изменений климата при современном состоянии знаний и доступных данных наблюдений может быть только вероятностным. Это связано как с наличием хаотической составляющей в поведении изучаемой системы, так и с неточностью применяемых уравнений и их параметризаций, а также с неполнотой информации о начальных и граничных условиях. Последнее является неустранимой причиной существования предела предсказуемости погоды, который теоретически составляет примерно 3 недели, а на практике не превосходит 10 дней (речь идет о ***предсказуемости 1-го рода***, то есть о возможности прогнозирования расписания предстоящего поведения индивидуальных гидрометеорологических объектов)

Для нелинейной системы, вообще говоря, практически невозможно предсказать конкретный ход ее развития, так как реальные начальные условия никогда не могут быть заданы с абсолютной точностью, а наличие так называемых точек бифуркации (ветвления) приводит к тому, что даже малые возмущения могут сильно повернуть направление эволюции.

Выдающийся ученый Эдвард Лоренц (Lorenz, 1963; 1996) образно сформулировал этот вывод следующим образом: в некоторых случаях взмаха крыльев бабочки достаточно для того, чтобы изменить направление потоков воздуха в атмосфере и вызвать обвальный процесс, напоминающий сход лавины с гор, что готов начаться от малейшего звука. Название «эффект бабочки» и сам этот образ оказались настолько привлекательными, что нашли свое вполне законное место в литературе и даже в кино.

Однако за пределом предсказуемости 1-го рода, согласно *гипотезе* Э. Лоренца, может существовать так называемая ***предсказуемость 2-го рода***, предполагающая, что статистические свойства процессов, такие как средние, дисперсии и другие статистики метеорологических величин, а также функции распределения повторяемости, интенсивности и продолжительности гидрометеорологических явлений или экстремальных ситуаций, могут правильно воспроизводиться физико-математическими моделями.

Таким образом, предел предсказуемости 1-го рода определяется чувствительностью модели к начальным условиям, а предсказуемости 2-го рода – ее чувствительностью к граничным и внешним условиям (пример последних – солнечное излучение).

Анализ использования климатических моделей позволяет надеяться на справедливость *гипотезы* о существовании предсказуемости 2-го рода. Справедливость такой концепции означала бы возможность оценки вероятностей гидрометеорологических явле-

ний, которые не наблюдались в действительности (например, экстремальных явлений и процессов). Что касается прогноза изменений климата, то есть прогноза изменений вероятностных свойств и статистической структуры климатической системы, то для его осуществления необходимо иметь еще и прогноз изменения климатообразующих факторов как естественного, так и антропогенного происхождения.

О способности моделей воспроизводить некоторые характеристики изменений климата

Обнаружение изменений климата по данным наблюдений сводится обычно к поиску тенденций или трендов во временных рядах той или иной климатической переменной. Соответственно, говоря о способности моделей к воспроизведению изменений климата, мы вправе требовать от климатической модели, чтобы с ее помощью для любых характеристик физических процессов в климатической системе адекватно воспроизводились поля климатических средних («норм») и дисперсий за различные периоды, их сезонные изменения, а также долговременные тенденции (тренды) соответствующих временных рядов. Приведем здесь лишь два примера: воспроизведение изменений среднегодовой глобальной приповерхностной температуры и воспроизведение индекса зональной циркуляции геострофического ветра в умеренных широтах Северного полушария.

На рис. 3 слева изображены временные ряды среднегодовой глобальной приповерхностной температуры за 1970-2000 гг. по данным наблюдений и по результатам климатического моделирования (17 моделей, указанных в легенде). Справа показаны те же ряды, но после исключения из них линейного тренда. Можно видеть, что все модели воспроизводят тенденцию к потеплению (отклик на рост CO_2), но средний уровень температуры и, тем более, межгодовые колебания большей частью моделей воспроизводятся со значительной ошибкой. Модельные оценки среднего уровня температуры преимущественно ниже наблюдаемого. Присутствие тренда обеспечивает положительную корреляцию модельных рядов с наблюдавшимися (коэффициент корреляции варьирует в диапазоне от 0,475 до 0,870), но после исключения тренда средняя корреляция падает с 0,679 до 0,207; для некоторых моделей корреляция становится отрицательной.

Качество воспроизведения индекса зональной циркуляции в умеренных широтах Северного полушария иллюстрируется на рис.4. На нем представлены сезонный ход многолетних средних и многолетние изменения индекса (в годовом осреднении). Обе оценки приведены по данным модели INM CM3.0 (модель ИВМ РАН) и по данным реанализа (NCEP/NCAR). Четко прослеживается весьма хорошее соответс-

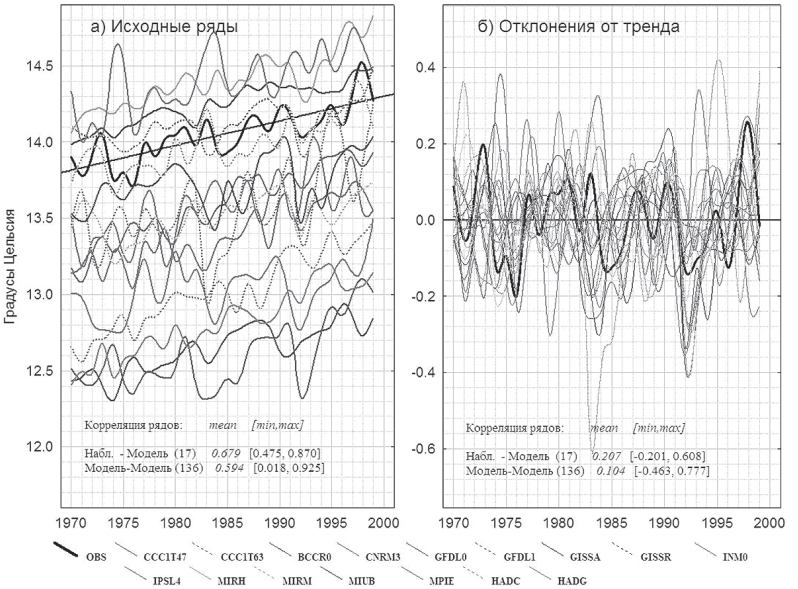


Рис. 3. Временные ряды глобальной приповерхностной температуры за 1970-2000 гг. по данным наблюдений (черная жирная кривая, данные HadCRUT3) и по результатам климатического моделирования (17 моделей, указанных в легенде): слева – исходные ряды; справа – отклонения от линейного тренда за 1970-2000 гг. В каждом моделировании использованы результаты одного прогона. В нижней части рисунка приведены значения коэффициентов парной корреляции между рядами: среднее (*mean*) и диапазон значений [*min,max*].

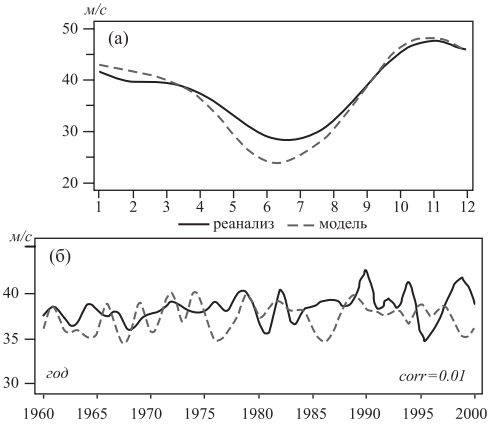


Рис.4. Сезонный ход многолетних средних (*а*) и многолетние изменения (*б*) индекса зональной циркуляции геострофического ветра в умеренных широтах Северного полушария: сплошная кривая – по данным реанализов NCEP/NCAR; пунктирная кривая – по данным модели I*NM CM3.0* (ИВМ РАН)

твие модели и реанализов в оценках средних (и по форме, и по порядку величин). Однако амплитуда годового хода в модели завышена (за счет более глубокого минимума в теплое время года), и минимум примерно на месяц опережает наблюдаемый по реанализам (в июне вместо июля). Что касается межгодовых изменений индекса, то корреляция соответствующих рядов практически отсутствует: в годовом осреднении она равна 0,01, а в отдельные месяцы не превышает 0,3 (здесь не приведены).

В целом, как показывает анализ результатов моделирования климата XX века, современные климатические модели воспроизводят основные статистические закономерности климатических изменений, а также те их изменения, которые являются откликом на изменения внешних факторов (рост эмиссии и концентрации парниковых газов и др.). Другими словами, структура полей средних величин и сезонных изменений, тренды для отдельных характеристик воспроизводятся климатическими моделями более или менее удовлетворительно, тогда как межгодовая изменчивость (после исключения тренда) и, по всей видимости, межмесячная изменчивость (после исключения сезонного хода) практически не отражают наблюдаемых изменений. Существенно, что это относится не только к сравнению моделей с наблюдениями, но и к сравнению моделей между собой!

Таким образом, есть основания предполагать существование в климатических моделях феномена предела предсказуемости первого рода, следствием которого является невозможность точного воспроизведения межмесячной и межгодовой изменчивости.

Сценарные прогнозы изменений климата

В настоящее время не существует надежного научного метода прогноза изменения климатообразующих факторов (естественного и антропогенного происхождения) с заблаговременностью 10 – 100 лет. Причина заключается в том, что некоторые факторы пока непредсказуемы и недостаточно изучены (например, вулканы или светимость солнца) или зависят от политических решений (например, развитие энергетики и энергопотребления, что влияет на парниковый эффект). Поэтому приходится разрабатывать сценарии изменения антропогенных воздействий на климатическую систему и климатообразующие факторы и моделировать отклик климатической системы на соответствующие изменения. Оценку полученных таким образом изменений климата приходится использовать как «условный» или «сценарный» прогноз (иногда используют термин «проекция», следуя английскому термину «projection», что не соответствует русскоязычной терминологии). Сценарные прогнозы по своей природе име-

ют вероятностный характер: они отражают только вероятностные свойства и статистическую структуру климатической системы, но не расписание процессов во времени.

Результаты моделирования анализируются как по многократным прогонам каждой модели (одномодельные ансамбли), так и по многократным прогонам многих моделей (многомодельные ансамбли, или «суперансамбли»).

На сегодняшний день нет достаточных оснований всецело доверять мультимодельной стратегии в долгосрочном (более 10 лет) прогнозировании изменений климата. Межмодельный разброс оценок существенный, различия чувствительности (изменений равновесной глобальной приповехностной температуры при удвоении концентрации углекислого газа) рассмотренных моделей слишком велик (от 2,0 до 4,5°С!), и это затрудняет объективный выбор моделей для включения в мультимодельный ансамбль.

Представляется более разумным выбрать модель (или несколько моделей), исходя из оценок успешности в воспроизведении климата на материале прошлого. (Ансамблевый подход приветствуется, но применительно к серии прогонов одной модели). При этом *процесс верификации модели должен быть отделен от процесса калибровки и должен быть выполнен, как принято в статистике, на независимом материале*.

Стратегический прогноз

Для стратегического прогноза климата на несколько ближайших десятилетий (для определенности – на 30 лет) в качестве одного из возможных подходов представляется целесообразным использовать ***регрессионный прогноз*** с концентрацией парниковых газов (CO_2) в качестве предиктора. Для построения регрессии предлагается использовать период после 1970 г., когда роль антропогенного роста CO_2 в увеличении приповерхностной температуры, по всей видимости, была определяющей. Значения предиктора в течение периода прогноза задаются выбранным сценарием.

На рис. 5 данный подход реализован применительно к прогнозу изменений пространственно осредненной температуры (в отклонениях от средней за 1961–1990 гг.) для территории России и Земного шара от 1971–2007 гг. к 2008-2037 гг.

На верхнем фрагменте рисунка приведены изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей: до 2007 – по данным наблюдений, далее – в соответствии со сценариями МГЭИК (SRES, 2000). Сценарий 20С3М (климат XX века) соответствует реальному (наблюдаемому) изменению концентрации CO_2 в 1901–2000 гг.; остальные сценарии относятся к периоду 2000 – 2100 гг. В сценарии В1 концен-

трация достигает 550 ppm к 2100 году, после чего стабилизируется; в A1B – уровень стабилизации составляет 720 ppm (также в 2100 г.); в сценарии A2 концентрация CO_2 после 2000 года растет при отсутствии мер по стабилизации; в сценарии "committed" концентрация CO_2 остаётся постоянной на уровне 2000 г.

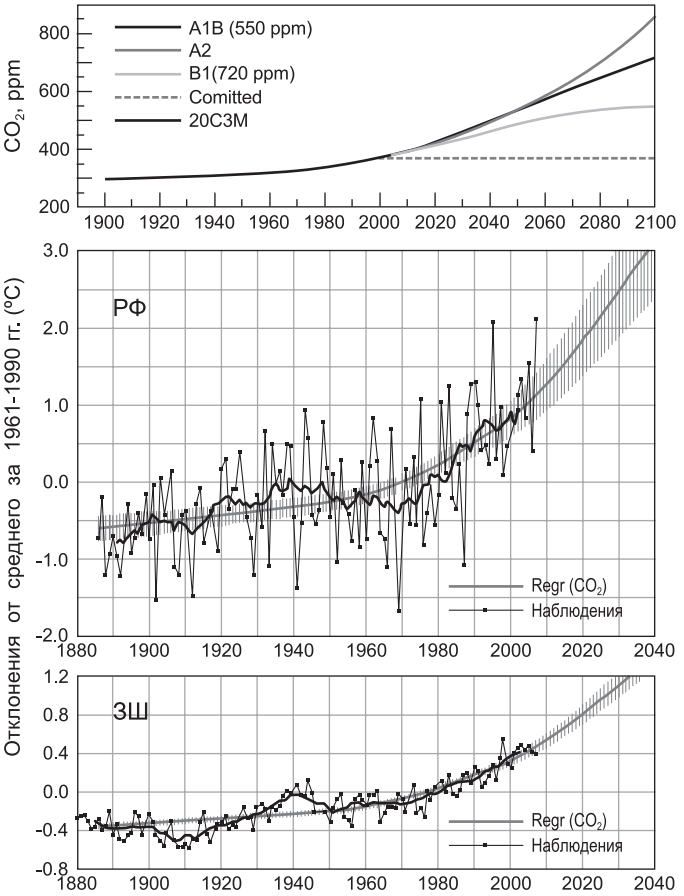


Рис. 5. *Вверху*: Изменения концентрации парниковых газов и аэрозолей (в единицах эквивалентной концентрации CO_2) в сценарных экспериментах по моделированию климата.

В середине и внизу: Регрессионный прогноз ожидаемых изменений пространственно осредненной температуры на 2008-2037 гг. (в отклонениях от средней за 1961–1990 гг.) для территории России и Земного шара, прогнозируемого и исходного, соответственно. Ожидаемое изменение температуры рассчитывается как разность между их средними, то есть между проекциями середин указанных периодов на ось OY.

Поскольку в ближайшем 30-летии (период прогноза) различия между сценариями эмиссии CO_2 несущественны (все они указывают на рост концентрации до ~485 ppm), результат должен мало зависеть от выбранного сценария. В данном случае результаты приведены для сценария SRES A1B. Регрессии оценены по данным наблюдений за 1971-2007 гг. Прогноз включает оценку ожидаемого среднего значения и ее 95%-ого доверительного интервала при предписанном (сценарием SRES A1B) изменении концентрации CO_2 на 2008–2037 гг.

В соответствии с такой предварительной оценкой, можно ожидать через 30 лет (от 1978–2007 к 2008-2037 гг.) повышения глобальной температуры на ~0,71±0,06°С, а в среднем для территории РФ – на ~1,4±0,3°С . Относительно базового периода 1961-1990 гг. это потепление означает, соответственно, 0,94±0,11 и 2,0±0,5°С. Приведенные оценки относятся к средним 30-летним температурам, то есть к «климатическим нормам», или к серединам указанных 30-летий.

Не исключается также возможность ***«статистической коррекции» модельных прогнозов***, если удается найти «независимый материал» для испытаний и информативные предикторы. Ниже предлагается вариант такого прогноза, основанный на устойчивости ошибок моделирования во времени – по крайней мере, для современных моделей и температурных характеристик конца XX столетия на территории России такая устойчивость установлена. Пусть средние за 1976–2005 гг. представляют «современный климат», а средние за 2006–2035 гг. – «прогнозируемый климат». Предполагается при этом, что доступны модельные оценки обоих климатов – текущего и предстоящего. Следовательно, доступны и модельные оценки ожидаемых изменений климата (разумеется, в рамках возможностей современных моделей и при условии осуществления выбранного сценария изменений факторов).

Задачу прогноза в этом случае можно трактовать как задачу разработки поправок к «базовым» нормам (современный «климат») для использования их за пределами базового периода (в условиях «будущего климата»). Для выработки необходимых поправок достаточно, имея данные модельного эксперимента за оба периода (базовый период и период использования «устаревших» норм), рассчитать прогноз изменений норм, то есть их разность.

Оценки таких поправок, полученные по данным климатической модели ИВМ РАН (Володин, Дианский, 2006) представлены на рис. 6 для норм среднегодовой температуры, годовых минимумов и годовых максимумов температуры на территории России. Эти оценки дают определенное представление о масштабе возможных ошибок, связанных с применением норм конца XX столетия в условиях климата начала XXI столетия в разных регионах России.

Так, более однородная картина отмечается для среднегодовой температуры, для которой можно ожидать (в соответствии с полу-

ченными оценками) повышения «норм» на 1-2°С на всей территории России (к востоку теплеет больше). Более сложной выглядит картина ожидаемых изменений годовых экстремумов, особенно годовых минимумов. На севере Восточной Сибири экстремально холодные зимы могут стать еще более суровыми, в то время, как в европейской части России в северных и северо-западных районах, и особенно в Краснодарском крае, можно ожидать их весьма существенного смягчения

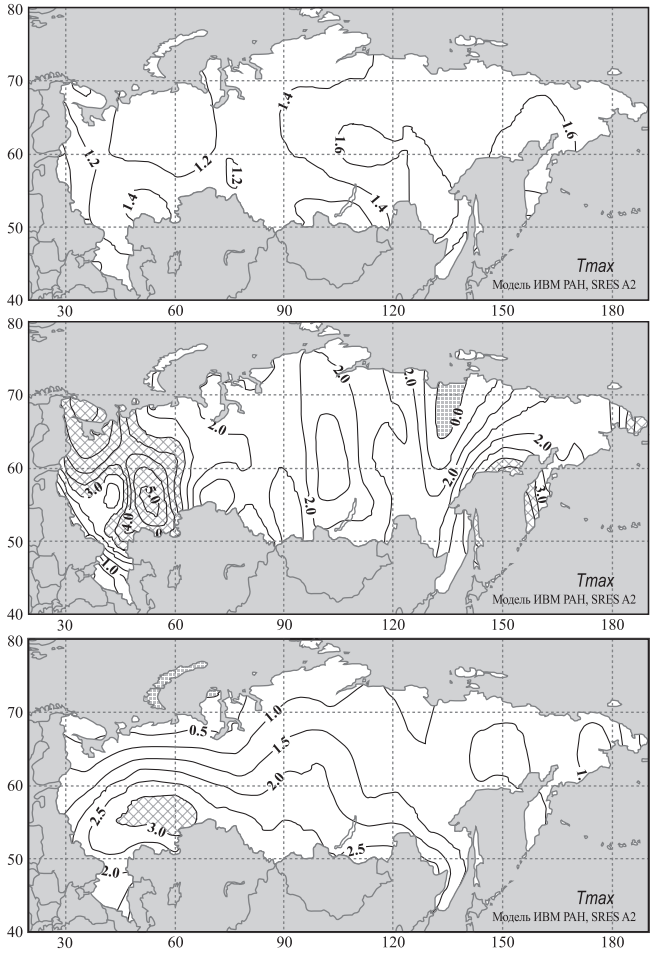


Рис. 6: Модельный «прогноз» изменений норм температуры от 1976–2005 к 2006–2035 гг. при условии осуществления сценария SRES A2: вверху – среднегодовая температура; в центре – годовые минимумы; внизу – годовые максимумы. Области ожидаемого понижения температуры зачернены. Сеточной штриховкой выделены области ожидаемого интенсивного потепления (более, чем на 3°С).

(потепление на 4–5 градусов). Что касается годовых максимумов, то для их изменений намечается, в соответствии с этим «прогнозом», определенная зональная направленность и, в частности, в центральной полосе европейской части России (южнее Москвы) возможно усиление жарких периодов. Четко прослеживается закономерность: ожидаемое потепление минимумов гораздо более интенсивное, чем максимумов (достаточно сравнить площади, выделенные сеточной штриховкой, для T_{min} и T_{max})

Напомним, что представленный на рис. 6 «прогноз» изменений норм температуры от 1976–2005 к 2006–2035 гг. (при условии осуществления сценария SRES A2) можно трактовать как рекомендуемые поправки к нормам среднегодовой температуры и годовых экстремумов 1976–2005 гг. для использования их в качестве норм следующего 30-летия.

Интересно проследить дополнительно, как изменится в следующем 30-летии вероятность высоких температур на территории РФ (рис. 7). На верхнем фрагменте приведены модельные оценки 95%-го процентиля годовых максимумов температуры, то есть температура, выше которой максимальная (за год) температура, как следует из результатов моделирования, бывает в среднем в 5% случаев (лет), или один раз в 20 лет. Такая максимальная температура меняется на территории РФ, судя по приведенным оценкам, в интервале от 20°С на Чукотке до 40°С на территории Северного Кавказа. В следующем 30-летии (2006–2035 гг.), в соответствии с используемым сценарным прогнозом, повторяемость таких экстремумов должна остаться на прежнем 5%-ом уровне лишь в узкой полосе на крайнем севере европейской территории (зачерненная область на рис.7, внизу). В то же время на обширной южной части Европейской территории России и Западной Сибири, где значения 95%-ых экстремумов выше 34°С (температура теплового удара), следует ожидать осуществления лет с такими максимальными температурами с вероятностью 20 – 30% (и даже 40%) – см. на рис. 7 область, выделенную сеточной штриховкой, в обоих полях. Другими словами, если при современном климате столь жаркие условия осуществляются в 5% лет, то через 30 лет на этой территории ***(при условии осуществления сценария SRES A2)*** их повторяемость может оказаться в интервале от 20% до более 30% (и даже 40%!), то есть в 4–6 раз чаще.

Заключение

В целом, как показывает анализ результатов моделирования климата XX века, современные климатические модели воспроизводят основные статистические закономерности климатических изменений, а также те их изменения, которые являются откликом на изменения внешних факторов (рост эмиссии и концентрации парниковых газов и

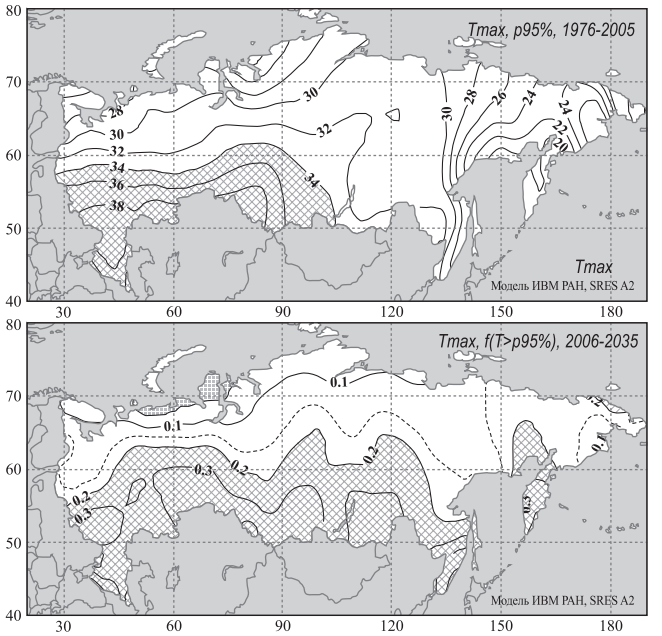


Рис. 7. Оценки значений 95%-процентилей годовых максимумов температуры на территории РФ в 1976-2005 гг. (сверху) и ожидаемой вероятности осуществления экстремумов выше этих значений в 2006–2035 гг. (внизу) по данным модели ИВМ РАН ***при условии осуществления сценария SRES A2***. Зачернена область, в которой увеличения повторяемости рассматриваемых экстремумов не ожидается. Сеточная штриховка на верхнем рисунке соответствует областям, где значения 95%-ых экстремумов выше 34°С, а на нижнем – региону ожидаемого 4-хкратного (и более) увеличения их повторяемости.

другие). При этом они не воспроизводят межгодовую (после исключения тренда) изменчивость и межмесячную (после исключения сезонного хода) изменчивость. Таким образом, есть основания предполагать существование в климатических моделях феномена предела предсказуемости первого рода, следствием которого является невозможность точного воспроизведения межмесячной и межгодовой изменчивости.

Существуют определенные принципиальные ограничения возможности прогнозирования климата, и потребителям таких прогнозов необходимо учитывать рекомендации по их использованию на практике.

В частности, потребитель должен осознать, что нет оснований рассматривать моделируемые процессы как прогноз на каждый конкретный год, и что модельным прогнозом климата можно пользоваться лишь как климатическим справочником, трактуя прогностические значения как соответствующие статистические характеристики за

некоторый достаточно продолжительный период. Например, предложенный выше прогноз климата на тридцатилетие 2006-2035 гг. может рассматриваться в качестве объективного *вероятностного прогноза* на 2015–2016 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Володин Е. М., Дианский Н. А. 2006. Моделирование изменений климата в XX-XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. Изв. АН. Физика атмосферы и океана. том 42, № 3. С. 1-16.

Говоркова В. А., Катцов В. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Школьник И. М. 2008. Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 для расчетов будущих изменений климата России. Метеорология и гидрология. № 8. С. 5-19.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2003. Колебания и изменения климата на территории России. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 39, № 2. С. 1-20.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2004. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. Метеорология и гидрология. № 4. С. 50-66

Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. 2007. Климатические изменения температуры воздуха на территории России по данным инструментальных наблюдений. Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». № 3. С. 41-48.

Дианский Н. А., Володин Е. М. 2002. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 38, №6, С. 824-840.

Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В. 2008а. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета. Метеорология и гидрология. № 6. С. 5-19.

Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Спорышев П. В., Школьник И. М., Шнееров Б. Е. 2008б. 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. 5-19.

Монин А. С., Берестов А. А. 2005. Новое о климате. Вестник Российской Академии Наук. Т. 75, № 2. С. 126-138

Монин А. С., Сонечкин Д. М. 2005. Колебания климата. М.: Наука. 191 С.

IPCC. 2007. Climate Change 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 and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.

Brohan P. et al. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. J. Geophys. Res. 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.Brohan et al.

Lorenz E. N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. J. Atmos. Sci. V. 20. P. 130-141.

Lorenz E. N., 1996. Predictability – A problem partly solved. Proc. Seminar on Predictability, Shinfield Park, Reading, ECMWWF, UK. P. 1-18.

SRES. 2000. Emission Scenarios. Summary for Policymakers. IPCC Special Report of Working Group III. – WMO/UNEP. 20 P.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ДИАГНОЗ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АТЛАНТИКО-ЕВРАЗИЙСКОЙ ЧАСТИ ПРИПОЛЯРНОЙ ЗОНЫ

А.В. Дзюба

Россия, 119991 Москва ГСП-1, ул. Губкина, 3, Институт водных проблем Российской академии наук, avdz@mail.ru

Реферат. Потепление в течение последних 105 лет не может считаться установленным фактом в отношении климата западной части приполярной зоны Северного полушария. Линейный тренд приземной температуры воздуха в этом регионе в вековом масштабе не является статистически значимым. Основные черты эволюции температуры в прошедшем столетии удовлетворительно отражает кусочно-линейная аппроксимация. Показана устойчивость такого характера процесса с учетом возможного роста концентрации парниковых газов в атмосфере в северной части полярной зоны. Описан возможный процесс реализации дальней корреляционной связи низкочастотных колебаний барического поля в Северной Атлантике и параметров климата на северо-западе атлантико-евразийского региона через аддитивную функцию Североатлантического колебания (САК). Колебательный характер процесса может объясняться отрицательной обратной связью в системе океан-атмосфера в Северной Атлантике.

Ключевые слова. Климат, долговременные изменения, тренд, годовая аномалия приземной температуры воздуха, статистика.

STATISTICAL DIAGNOSIS AND POSSIBLE DRIVERS OF RECENT CHANGES IN SURFACE AIR TEMPERATURE IN THE ATLANTIC-EURASIA PART OF THE POLAR ZONE

A. V. Dzuba

Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, 3, Gubkina str., 11991 Moscow, Russia, avdz@mail.ru

Abstract. Warming over last 105 years cannot be qualified as a robust finding in regard to climate of the western part of the Northern Hemisphere polar region. The linear trend in surface air temperature of this region is not statistically significant on a century time scale. A piecewise linear approximation satisfactorily describes the main patterns of temperature evolution. It is shown that such character of the process

will persist under possible rise of greenhouse gases' concentrations in the northern part of the polar zone. A process leading to long-distance correlations of low-frequency oscillations of atmospheric pressure in the Northern Atlantics and climate parameters of north-western part of the Atlantic-Eurasia region is explained through the additive function of the North-Atlantic Oscillation (NAO). Oscillatory character of the process can be explained through the negative feedback in the 'ocean-atmosphere' system in the north of Atlantic region.

Keywords. Climate, long-term changes, trends, annual anomaly, air surface temperature, statistics.

Введение

В последние годы климатический режим полярных регионов привлекает все большее внимание в рамках крупных национальных и международных проектов. Являясь частью глобальной климатической системы, климат приполярной зоны на протяжении последних десятилетий испытывает очевидные изменения. Обоснованно считается, что современные и будущие изменения температурного режима приполярной зоны, определяющие эволюцию криосферы, могут быть, а частично уже являются, климатически, экологически и экономически значимыми в глобальном масштабе. Однако вопрос пространственной однородности и статистической значимости наблюдаемых изменений, а также степень их связи с концентрацией парниковых газов в атмосфере, в том числе с ее антропогенной составляющей, окончательно не решен. Регионализация диагноза многолетних изменений основных климатических параметров не достаточна, особенно, в отношении полярных зон. Возрастающий интерес к современным и будущим изменениям климата стимулировал достижение заметных успехов, как в статистическом описании характеристик климата с помощью стохастических моделей, так и в описании динамики процессов взаимодействия внутри климатической системы с помощью численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Серьезными ограничителями при использовании стохастического подхода являются слишком быстро достигаемый предел предсказуемости (часто один шаг по времени) и его эвентуальность, заключающаяся в необходимости принятия гипотезы о стационарном в широком или узком смысле характере изменений климата и отсутствия долгопериодных направленных воздействий на процессы внутри климатической системы извне, что детально показано в наших работах (Голицын и др., 1990; Дзюба, Клиге, 1982; Дзюба и др., 1984, 1990; Дзюба, Панин, 1993, 2007; Панин, Дзюба, 2006). К настоящему времени большинство исследователей приходят к выводу о реальности влияния наблюдаемого роста концентрации парниковых газов в атмосфере

на современный климат (Climate Change 2001, 2001; Climate Change 2007, 2007; Израэль и др., 2007 и др.). Однако вопрос о значимости вклада роста концентрации инертных газов (в том числе его антропогенной составляющей) в естественную эволюцию климата полярных регионов на различных масштабах времени к настоящему времени единственного решения не имеет (Семенов и др., 2007; Climate Change 2007, 2007). Эффективные численные модели, участвующие в международных программах сравнения AMIP и CMIP (Володин и др., 2004; Дымников и др., 2004; Мохов и др., 2002; Meehl, 2000), описывающие антропогенное воздействие и интерактивную составляющую климатических изменений, не дают результатов адекватных данным наблюдений на временном интервале порядка длительности инструментальных наблюдений (Кондратьев, 2004; Climate Change 2007, 2007). Фундаментальная проблема чувствительности климатической системы к малым внешним воздействиям и их отбора для учета в моделях остается открытой. Так, учет таких процессов, как межгодовые изменения солнечной постоянной или вулканической активности требует дополнительных теоретических и эмпирических обоснований (Дзюба, Панин, 2007 и др.). До настоящего времени не формализована зависимость климата приполярной зоны Северного полушария от таких природных феноменов как североатлантическое и северотихоокеанское колебания атмосферного давления. Целью настоящей работы является детализация статистического диагноза температурного режима западной части приполярной зоны за последние 104 года и описание возможного механизма его эволюции.

Возможные детерминанты климатических трендов в атлантико-евразийской части приполярной зоны

Вопрос о степени эргодичности климатической системы, впервые поставленный в (Lorenz, 1968), до настоящего времени ответа не имеет. Согласно современным теоретическим представлениям, основа которых заложена в (Монин, 1979, 1988; Lorenz, 1968, 1970), лабораторным опытам и наблюдениям в природе климатическую систему можно рассматривать как частично эргодичную или почти интранзитивную. Поэтому только в первом приближении состояние системы можно определить, указав значения ограниченного числа параметров. Основными параметрами состояния климатической системы, как системы термодинамической, являются температура, давление и удельный объем (плотность). Температурный режим у подстилающей поверхности является интегральным показателем радиационного баланса, обменных процессов между атмосферой и подстилающей поверхностью и горизонтальных потоков тепла вследствие атмосферной и океанической циркуляции.

На протяжении последнего столетия химический состав атмосферного воздуха испытывает возрастающее влияние антропогенной деятельности. Закись азота, метан и углекислый газ являются важнейшими термодинамическими примесями, изменения концентрации которых в воздухе могут являться климатообразующими.

С 1750 г. концентрация N_2O возросла на 18%. и составила в 2005 году 319 млрд$^{-1}$ (Climate Change 2007, 2007). До индустриального периода концентрация закиси азота увеличилась лишь примерно на 10 млрд$^{-1}$ за 11500 лет (по данным кернов льда). Около 40% роста содержания N_2O обусловлено хозяйственной деятельностью. В последние десятилетия концентрация закиси азота в атмосфере росла почти линейно со скоростью 0,8 млр$^{-1}$/год. Повышение содержания N_2O с начала индустриальной эпохи привело к росту радиационного воздействия на 0,16±0,2 Вт/м^2 (Climate Change 2007, 2007). Можно утверждать относительно прошедших десятилетий и предполагать относительно ближайших будущих десятилетий, что изменения количества закиси азота в атмосфере заметно не влияют на изменения температуры воздуха. Согласно расчетам (Кондратьев, 2004), лишь при удвоении концентрации N_2O, температура может повыситься на 0,5°С.

Концентрация метана в атмосфере за последние 250 лет возросла почти в 2,5 раза и составила в 2005 году 1774 млрд$^{-1}$ (Climate Change 2007, 2007),. В индустриальную эпоху скорость роста метана в атмосфере была самой высокой за последние 80 тыс. лет. В начале 1990-х годов скорость роста содержания метана стала снижаться, а с 1999 по 2005 была близка к нулю. Рост концентрации CH_4 за период с 1750 по 2005 год обусловил повышение радиационного воздействия примерно на 0,48±0,5 Вт/м^2. В приполярных районах Северного полушария наблюдается повышенный примерно на 2,7% фон содержания CH_4 по сравнению с глобальным (Израэль и др., 2007). Снижение скорости роста содержания метана в атмосфере, очевидно, означает, что в последние годы объем выбросов соответствует объему стока, в основном обусловленного окислением гидроксильной группой.

За последние 250 лет концентрация CO_2 в атмосфере возросла почти на 100 млн$^{-1}$ (Climate Change 2007, 2007) т.е. примерно на 30% и достигла в 2005 году 379 млн$^{-1}$, что является максимумом за последние 420 тыс. лет. Темпы роста CO_2 за последние 10 лет составили 1,9 млн$^{-1}$/год, что также беспрецедентно. Рост концентрации CO_2 обусловлен примерно на 60% сжиганием ископаемых видов топлива и на одну треть изменением подстилающей поверхности в результате землепользования. Единственным потребителем CO_2 на суше являются растения. Величины поглощения диоксида углерода биосферой и океаном имеют одинаковый порядок. Обмен с сушей и биомассой определяется соотношением поглощения CO_2 растениями и величи-

ной обратного потока вследствие гниения органики, гетеротрофного дыхания и пожаров. Эмпирические данные показывают, что рост концентрации CO_2 в атмосфере происходит повсеместно. Естественные эффекты (типа Эль-Ниньо) значимы, скорее всего, лишь на временных интервалах порядка нескольких лет (Израэль и др., 2007). Рост концентрации CO_2 в верхнем слое океана в последние десятилетия следует за ростом концентрации CO_2 в атмосфере (Climate Change 2007, 2007). Рост концентрации диоксида углерода в атмосфере с доиндустриальных времен стал причиной усиления радиационного воздействия примерно на $1{,}66 \pm 0{,}17$ Вт/м^2. Вклад роста содержания CO_2 превышает суммарное воздействие роста концентрации закиси азота и метана в 2,6 раза и значительно преобладает среди радиационных воздействий остальных атмосферных газов. Поэтому межгодовые изменения концентрации диоксида углерода в атмосфере в первом приближении могут рассматриваться как климатообразующий фактор, характеризующий изменения содержания инертных газов в атмосфере, по крайней мере, в течение периода инструментальных наблюдений. В отношении углекислого газа пограничный слой атмосферы достаточно хорошо перемешан. Превышение фона CO_2 в полярной зоне по сравнению с глобальным уровнем находится в интервале 1–3 млн$^{-1}$ для среднегодовых значений.

Адвекция тепла и влаги в подвижных средах климатической системы определяется векторами градиентов ее основных параметров, которые в глобальном масштабе имеют межширотный характер.

Конфигурация глобального поля атмосферного давления является одним из важнейших климатообразующих факторов. Современная классическая геофизическая гидродинамика и основанные на ней численные модели климата не дают удовлетворительного физического описания некоторых наблюдаемых фундаментальных для климата Земли закономерностей. К ним относится формирование и изменчивость ярко выраженных субполярных минимумов и субтропических максимумов атмосферного давления в нижней тропосфере и у поверхности Земли. В Северном полушарии указанные экстремумы наблюдаются в течение всего года в пределах 65–75° и 30–37° с.ш. соответственно. Градиенты температуры и давления конгруэнтны, начиная лишь с высоты 4,5–5 км и до нижней стратосферы (12–14 км). В нижней тропосфере и у поверхности в каждом полушарии имеется по три межзональных барических градиента: тропический направлен от субтропиков к экватору, северный или южный (в Южном полушарии) направлен от субтропиков к субполярной зоне и Арктический (Северный кольцевой режим) или Антарктический направлен от полярных зон к субполярным. Изменения давления между указанными широтными зонами происходят в противофазе. В наиболее выраженных зональных барических экстремумах (субтро-

пических и субполярных) выделяются центры действия атмосферы. В Северном полушарии это Азорский и Гонолульский максимумы атмосферного давления и Исландская и Алеутская депрессии. Соответственно рассматриваются североатлантическое и северотихоокеанское колебания. Центры действия атмосферы лишь условно привязаны к указанным географическим объектам. В реальности они смещаются на первые сотни километров (Лаппо и др., 2003; Бардин, Полонский, 2005; Полонский, 2001; Hilmer, 2000). Степень воздействия Североатлантического колебания атмосферного давления (САК или NAO), впервые описанного в (Walker, 1932), на эволюцию климата атлантико-евразийского региона давно и широко обсуждается, но до настоящего времени не формализована (Бардин, Полонский, 2005; Лаппо и др., 2003; Hilmer, 2000; Marshall et al., 2001; Rogers, 1997). Значения Арктического колебания и САК, воспроизводимые численными моделями не согласуются с данными наблюдений на 100-летнем интервале времени. Корреляция между ними мала, а для отдельных периодов отрицательна (Мохов и др., 2002; Josey, 2001), что свидетельствует о недостаточном понимании механизма генезиса крупномасштабных барических колебаний

Данные и методика.

Ряды многолетних изменений приземной температуры воздуха (ПТВ) в западной части приполярной зоны (65-75° с.ш., 60°з.д.–110° в.д.) с 1886 по 2004 гг. с дискретностью 1 год получены на основе массивов Джонса и др. (Jones et al., 1993, 1999, 2003), имеющихся на сайтах (www.cru.uea.ac.uk/cru/data/) и (http://www.ipcc-data.org/), путем осреднения месячных значений в узлах пятиградусной сетки. Широтные границы рассматриваемого района соответствуют среднемноголетней зоне субполярного минимума атмосферного давления в Северном полушарии, а меридиональные – последним теоретическим и экспедиционным результатам о границах зоны, на климат внутри которой существенно влияют североатлантические воздушные или водные массы (Алексеев и др., 2007). Многолетние ряды ПТВ представлены пространственно осредненными отклонениями (аномалиями) от среднего значения базового периода 1961-1990 гг. Использованный массив данных по узлам 5-градусной сетки признается в (Climate Change 2001, 2001; Climate Change 2007, 2007) наиболее полным и достоверным и рекомендуется для анализа климатических изменений. Ряды ПТВ для данного региона не являются оригинальными и использованы в 4-ом докладе IPCC (Climate Change 2007, 2007) и обстоятельной работе (Бышев и др., 2006).

Характеристики межгодовых изменений Североатлантического колебания (САК) атмосферного давления с 1886 по 2004 год были

получены по данным об атмосферном давлении на станциях Рейкьявик, Понта-Дельгада, Лиссабон и Гибралтар за этот же период с дискретностью 1 месяц. Данные по станциям размещены на сайте (www.cru.uea.ac.uk). В качестве центров действия атмосферы в Северной Атлантике были приняты станции Рейкьявик и Понта-Дельгада, т. к. между этой парой станций наблюдается максимальная разница давления, по сравнению с парами Рейкьявик- Лиссабон и Рейкьявик-Гибралтар. Выбор пары не мог повлиять на полученные результаты, т.к. многолетние изменения всех трех пар хорошо согласованы. По данным об атмосферном давлении на выбранной паре станций были вычислены значения трех временных рядов с месячной дискретностью характеризующих Североатлантическое колебание. Кроме собственно САК рассчитаны аномалии и нормированные значения аномалий (индекс САК). Многолетний ход полученных значений индекса САК согласуется с таковым опубликованным на сайте (www.ncar.com) и др. В настоящей работе, в отличие от известных нам публикаций, представлены и использованы для анализа временные ряды ненормированных значений атмосферного давления на станциях Исландии и Азорских островов, а также величины и аномалии САК. Это не влияет на качество проводимого анализа, но дает более адекватное представление об амплитуде межгодовых изменений одного из важнейших для Северного полушария климатообразующего фактора.

Эмпирические данные о многолетних межгодовых изменениях концентрации парниковых газов в атмосфере заимствованы с сайтов WMO (WMO, GLOBALVIEY-CO_2) и работ (Антоновский и др., 2004; Кондратьев, Крапивин, 2005; Израэль и др., 2007; WDCGG, 2005). Непосредственно анализировался ряд изменений среднегодовых осредненных глобально концентраций диоксида углерода с 1960 по 2005 гг.

Для получения статистических характеристик многолетних изменений исследуемых параметров использовалась традиционная методика. Вычислены первые и вторые моменты, получены центрированные ряды, вычислены центральные моменты 2-го порядка. Для полученных статистик были определены границы интервалов соответствующие коэффициенту доверия 0,05 (95% уровень значимости). Для количественной оценки направленных изменений (трендов) рассматриваемых характеристик применена разработанная в (Дзюба и др., 1990; Дзюба, Панин, 1993) методика аппроксимации временного хода кусочно-линейным трендом. Временные ряды разбивались на два, три и четыре временных отрезка всеми возможными вариантами. Затем по полной выборке и для каждого из отрезков оценивались параметры линейных трендов. Критерием выбора оптимального разбиения временного ряда на куски является минимум общей остаточной суммы квадратов (разницы между общей вариацией процесса и вариацией, обеспеченной трендом). Рассчитывался угловой коэф-

фициент линейного тренда, его стандартная ошибка, величина тренда (угловой коэффициент, умноженный на количество лет), F-статистики, оценивалась значимость тренда на 95% уровне по критерию Фишера. Также для каждого из выделенных временных отрезков сравнивались фактические значения ряда и значения, получаемые из уравнения прямой. По результатам сравнения вычислялся коэффициент детерминированности, нормированный от 0 до 1, характеризующий достоверность (полезность) аппроксимации. Проведена оценка достоверности аппроксимации исследуемых временных рядов линиями трендов до 6-го порядка. Проведен корреляционный и регрессионный анализ исследуемых процессов.

Таким образом, использованные в работе эмпирические данные и методика их анализа не являются оригинальными вне их совокупности и, поэтому, не могли негативно повлиять на полученные результаты.

Результаты статистического анализа.

Формально межгодовые изменения ПТВ в западной части приполярной зоны за последние 105 лет можно описать их средним, стандартным отклонением $0,6 \pm 0,08^{\circ}$C и коэффициентом линейного тренда $0,005^{\circ}$C/год (рис. 1а). Однако стандартная ошибка для коэффициента тренда равна 0,002. Величина тренда $0,52^{\circ}$C меньше уровня межгодовой изменчивости. Стандартная ошибка для оценки значений ряда с помощью линейной аппроксимации составляет $0,57^{\circ}$C, достоверность такой аппроксимации не превышает 6%, а ее статистическая значимость на 95% уровне отрицательна. Эти оценки свидетельствуют о крайне низкой полезности линейной аппроксимации векового хода ПТВ в западной части приполярной зоны ($y = 0,0047x - 9,0192$). Очевидная нелинейность многолетних изменений ПТВ предполагает для более адекватного ее описания использование либо трендов более высоких порядков, либо кусочных аппроксимаций. Описание векового хода ПТВ параболической функцией или трендом 2-го порядка (рис.1б) показывает соотношение скорости роста температуры в первой и во второй половине 20-го века. Качественную оценку этого соотношения дает вид графика. Выпуклый график параболической функции на рис. 1б означает, что вторая производная температуры по времени отрицательна и свидетельствует о том, что рост температуры в первой половине века происходил быстрее, чем во второй. Точность аппроксимации исходного ряда параболической функцией характеризуется значением коэффициента детерминированности 0,1. Следовательно, тренд 2-го порядка также не отражает основные закономерности температурного хода. Достоверность аппроксимации температурного режима полиномом 3-й степени (рис. 1а) составляет

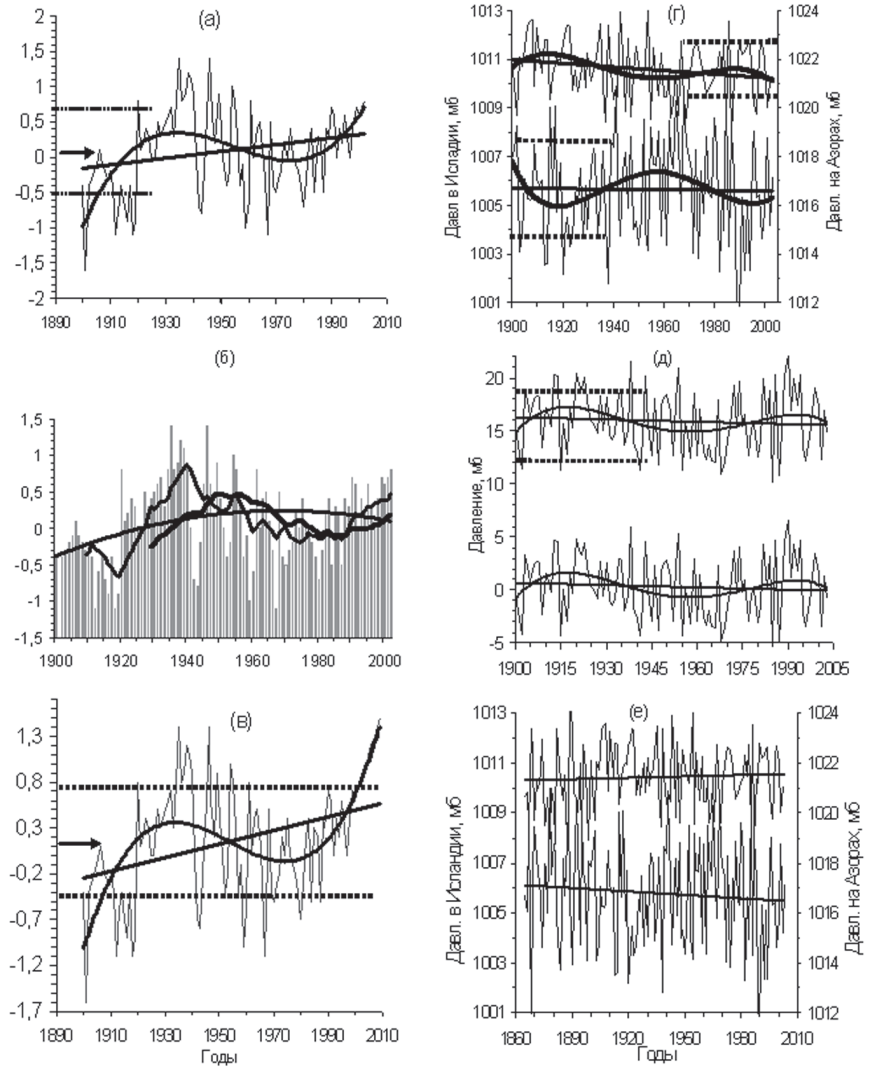


Рис. 1. Многолетние изменения аномалий приземной температуры воздуха (0С) в западной части приполярной зоны – а, б, в и северо-атлантического колебания атмосферного давления и его компонент (мбар) г – давление в Азорском максимуме и Исландском минимуме, д – значения САК (верхняя кривая) и аномалии САК, е – давление в Азорском максимуме и Исландском минимуме за более длительный интервал.

Прямые линии – линейный тренд; стрелки – среднее значение; ступенчатые линии на (б) – 10-ти и 30-ти летние скользящие средние; гладкие кривые линии на (а, в) – полиномы 3-го порядка, на (б) – параболическая аппроксимация, на (г, д) – полиномы 4-го порядка; пунктирные линии – СКО.

30% и отражает на качественном уровне основные черты его векового хода. Очевидно наличие трех интервалов направленных изменений ПТВ. Количественные оценки границ интервалов дает процедура кусочно-линейной аппроксимации (табл. 1). Расчеты показали, что наиболее статистически обеспечены 3 интервала направленных изменений температуры: потепления с 1901 по 1938 г., похолодания с 1939 по 1974 г. и потепления с 1975 г. до конца временного ряда. На этих отрезках времени линейные тренды статистически значимы и характеризуются значениями коэффициента 0,045, –0,018, 0,033°С\год (со стандартными ошибками 0,007, 0,01, 0,007°С), величиной 1,71, –0,65, 1,00°С\интервал. Стандартные ошибки оценки значений температуры для указанных отрезков ряда с помощью линейной аппроксимации равны 0,45, 0,59, 0,32°С, а достоверность аппроксимаций составляет 55, 10, 43% соответственно. Характерное (среднее) время однонаправленных изменений температуры составляет 34–35 лет. На указанных временных отрезках, примерно на 0,1°С за интервал, возрастало среднее значение и на 0,1°С за интервал уменьшалась межгодовая изменчивость, что находится в рамках 95% доверительного интервала определения этих статистик.

Автокоррелированность полной выборки (табл. 2) находится на уровне 0,5±0,1. Заметим, что ни последние 30 лет, ни последние 10 лет в западной приполярной зоне не были самыми теплыми за рассматриваемый период (рис.1б). Средние значения аномалий ПТВ за последние 30 и 10 лет составляют 0,2 и 0,4°С. За 105 летний период самым теплым тридцатилетием были 1920-1950 гг. (0,5°С), а самым холодным 1900-1930 гг. (–0,2°С). Самыми теплыми 10-ю годами были 1930-е годы (0,8°С), а самыми холодными 1909–1919 гг. (–0,6°С). 95% доверительный интервал для средних значений равен 0,1-0,15°С. Как видно из рис. 1в и табл. 1, устойчивость вышеприведенных статистик временного хода ПТВ в северо-западной части Евразии сохраняется как минимум до 2010 года даже при условии ежегодного прироста температуры на 0,1°С (самый крайний сценарий парникового эффекта).

Представленный на рис.2 ход концентрации двуокиси углерода аппроксимируется линейным трендом ($y = 1{,}4714x - 2573{,}9$) с достоверностью 98,8%. Стандартная ошибка параметра линейной регрессии 0,027, а стандартная ошибка среднегодовых значений концентрации CO_2 1,79млн$^{-1}$. Параболическая аппроксимация описывается уравнением: $y=0{,}0109x^2 - 41{,}716x + 40292$. Достоверность тренда 2-го порядка 0,998. Восходящий (вогнутый) график параболической функции свидетельствует об ускорении роста содержания диоксида углерода во второй половине рассматриваемого интервала по сравнению с первой. Ускорение составило примерно 0,2 млн$^{-1}$/год. Достоверность экспоненциальной ($y = 0{,}0791e^{0{,}0042x}$) и степенной ($y=8E\text{-}26x^{8{,}3832}$)

Таблица 1.

Результаты кусочно-линейной аппроксимации временного хода аномалий температуры воздуха в западной части приполярной зоны, °С и компонент САК, мбар.

Район, характ-ка, интервал	Количество лет	Среднее	Стандартное отклонение.	Коэф. лин. тренда \ год	Лин. тренд за интервал	Коэф. детерм. лин. тренда.	Статист. знач. лин. тренда	Оптим. порядок тренда	Коэф. детерм. опт. тренда
Зап.пол.зона (темп. возд.)		±0.1							
1900–2004	105	0.09	0.59	0.005	0.52	0.07	Нет	3	0.26
1901–1938	38	0.01	0.66	0.045	1.71	0.55	Да	1	0.55
1939–1974	36	0.10	0.58	–0.018	–0.65	0.10	Да	1	0.10
1975–2004	30	0.22	0.41	0.033	1.00	0.43	Да	1	0.43
1920–1950	30	0.47	0.57	–0.003	–0.09	0.02	Нет	2	0.13
1900–1930	30	–0.22	0.54	0.031	0.93	0.27	Да	1	0.27
1900–2010	111	0.2	0.61	0.007	0.77	0.14	Нет	3	0.4
Азоры (атм. давл.)		±0.2							
1900-2004	105	1021.6	1.16	–0.008	–0.8	0.004	Нет	5	0.08
1865-2004	140	1021.4	1.28	0.002	0.3	0.001	Нет	5	0.07
Исландия (атм. давл.)		±0.3							
1900-2004	105	1005.6	2.06	-0.001	–0.1	0.002	Нет	5	0.05
1865-2004	140	1005.8	2.09	-0.004	–0.6	0.003	Нет	5	0.05
САК (атм. давл.)		±0.5							
1900-2004	105	15.9	2.89	-0.007	–0.7	0.008	Нет	5	0.07
1865-2004	140	15.7	3.05	0.007	0.9	0.008	Нет	5	0.08

Таблица 2.

Выборочные коэффициенты взаимной и автокорреляции исследуемых временных рядов

Зап. пол. зона (темп. воздуха)	0,5	0,12	–0,15	0,03
САК (атм. давл)	0,12	0,2	–0,9	0,8
Исландия (атм. давл)	–0,15	–0,9	–0,1	–0,7
Азоры (атм. давл)	0,03	0,8	–0,7	0,1

аппроксимаций равна 0,99, а логарифмической (y=2919,9Ln(x) – 21825) 98,8%. Таким образом, оптимальным на вековом масштабе является линейное или параболическое приближение межгодовых изменений концентрации CO_2 в атмосфере. Другие, указанные выше параметризации также полезны. Регрессия ПТВ на содержание парниковых газов в атмосфере на 104-летнем интервале статистически незначима, а ее полезность близка к нулю. Достоверность указанной регрессии на интервалах с 1901 по 1938 и с 1974 по 2005 гг. (периоды потепления) не превышает 10%. Корреляция ПТВ полярной зоны (также как и ПТВ осредненной полусферно и глобально) и концентрации парниковых газов в интервале 1939–1974 гг. отрицательна. Факт очевидной неконгруэтности вековой эволюции ПТВ приполярной зоны и количества диоксида углерода в атмосфере требует детального комментария в отдельной работе. Можно предположить, что наблюдаемый в течение последних 104 лет рост концентрации инертных газов в атмосфере обусловил в северной приполярной зоне радиационное воздействие соответствующее описанным выше параметрам статистически незначимого линейного тренда ПТВ.

Статистический диагноз САК определяется статистиками временных рядов атмосферного давления в Исландском минимуме (далее Ис-

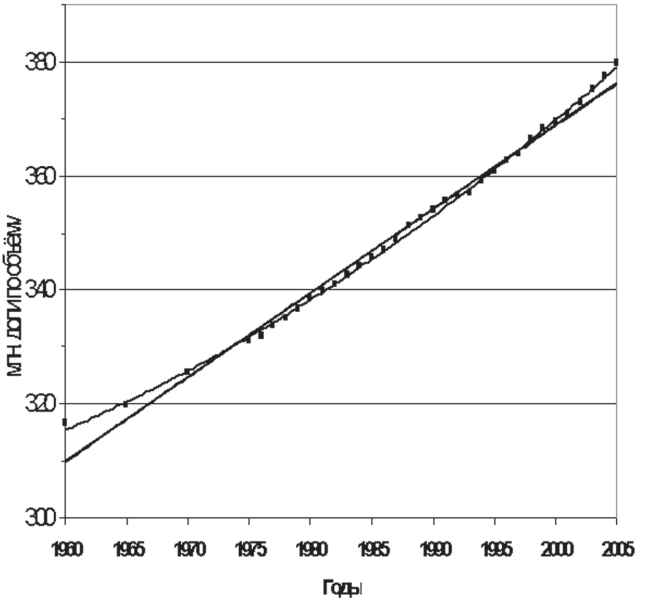


Рис. 2. Изменения глобально осредненных концентраций диоксида углерода в атмосфере. Черные маркеры – средние годовые значения, прямая линия – линейный тренд, кривая линия – параболическая функция.

ландия) и Азорском максимуме (далее Азоры). Прежде всего, необходимо отметить очевидную противофазность межгодовых изменений давления в рассматриваемых центрах действия (рис.1г, табл.2). О соразмерности их изменений свидетельствует значение коэффициента корреляции (табл.2) между ними равное −0,7(±0,1), и полезность линейной регрессии около 40% со стандартной ошибкой 1 мб. Соответственно межгодовые изменения величины САК происходят в противофазе с давлением в Исландии и в фазе с давлением на Азорах (рис. 1д). Коэффициент корреляции между САК и этими центрами действия соответственно равен 0,9 и 0,8(±0,1), а риски связанные с регрессией не превышают 10 и 30% (достоверность регрессий 90 и 70%). Средние за 105 лет значения давления в Исландии, на Азорах и по ряду САК соответственно равны 1005,6(±0,3), 1021,6(±0,2) и 15,9(±0,5) мб, их стандартные межгодовые отклонения составляют 2,1, 1,2±0,1 и 2,9±0,2 мб. Математическое ожидание и дисперсия достаточно хорошо описывают вековые изменения параметров САК. Межгодовые изменения величины САК соразмерны с межгодовыми изменениями давления в Исландии и на Азорах в примерном соотношении 3:2. Линейные тренды по этим рядам и по ряду САК в интервале 1900-2005 гг. характеризуются коэффициентами −0,001,−0,008 и 0,007±0,1 мб/год, величинами −0,1, −0,8 и −0,9 мб/105 года и коэффициентами детерминации 0,001, 0,004 и 0,008. Линейные тренды аппроксимирующие межгодовые изменения атмосферного давления САК и его компонент статистически незначимы на всех возможных временных отрезках в рассматриваемом интервале. Автокоррелированность межгодовых изменений атмосферного давления компонент САК и величин самого колебания (табл. 2) практически отсутствует, составляя 0,2, −0,1, 0,1±0,1. Также незначимы и выборочные коэффициенты корреляции ПТВ приполярной зоны и параметров САК (табл. 2). Достоверность аппроксимации рядов эмпирических данных, характеризующих САК, полиномом 5 степени 5-8%. Устойчивость статистик САК проверялась их расчетом для рядов по Исландии, Азорским островам и САК для периода отличного от 104 летнего. Графики реализаций, длина которых увеличена на 33%, приведены на рис. 1е. Результаты расчетов, представленные в табл. 1, очевидны. Ни одна из статистических характеристик в Исландском минимуме, Азорском максимуме и САК при существенном увеличении длины выборок (1865–2005 гг.) значимо не меняется.

Таким образом, многолетние изменения температуры воздуха у подстилающей поверхности в западной части приполярной зоны и атмосферного давления в центрах североатлантического колебания на протяжении последних 105 лет не когерентны и не конгруэнтны. Однако этот вывод не опровергает гипотезу о существенной зависимости температурного режима западной приполярной зоны от САК.

Дискуссия о механизме воздействия САК на климат западной части приполярной зоны.

Оценки спектральной плотности для интересующих нас периодов вследствие ограниченности длины рядов исходных данных недостоверны. Однако, анализ числа появлений и частоты положительных и отрицательных аномалий атмосферного давления в североатлантических центрах действия атмосферы, определяющих САК, в периоды статистически значимых направленных изменений ПТВ в западной части приполярной зоны (табл. 3) свидетельствует о следующем. Частоты появления положительных и отрицательных аномалий атмосферного давления в течение указанных интервалов существенно различаются. В периоды потепления (1901–1938 гг. и с 1974 г. до конца ряда) повторяемость положительных аномалий давления в Исландском минимуме 0,4, а отрицательных 0,6. При этом в Азорском максимуме и в САК соотношение положительных и отрицательных аномалий обратное и, следовательно, наблюдается положительная фаза САК. В интервале 1939-1974 гг. соотношение аномалий разных знаков в компонентах САК противоположное и наблюдается отрицательная фаза САК. За 105-летний интервал с 1900 по 2004 год, также как и за период с 1865 по 2004 гг., повторяемость аномалий давления разного знака в североатлантических центрах действия атмосферы в пределах статистической погрешности одинакова (табл. 3). Заметим, что значимое соотношение повторяемости аномалий разного знака не противоречит выводу об отсутствие статистически значимого линейного тренда. Выявленная закономерность проявляется при сопоставлении временного хода ПТВ западной части приполярной зоны и аномалий САК (рис. 3а).

Регрессия ПТВ на САК полезного решения не имеет. Минимальный риск такой регрессии составляет 95% . В рассматриваемом случае помимо следствий из уравнения состояния атмосферы определяющую роль играет эффект западного переноса в приполярных широтах. С учетом этого физически обосновано сопоставление последовательной суммы аномалий САК с эволюцией ПТВ (рис. 3б). Качественная когерентность реализаций на рисунке 3б очевидна. Регрессия ПТВ на аддитивную функцию аномалий САК $SP_{(n)CAK}=\sum_{n}\Delta P_{(n)CAK}$ имеет вид:

$$\Delta T_{(n)} = 0{,}0291\times SP_{(n)CAK} - 0{,}6018,$$

где n – годы (n=1 соответствует 1900 году, n=105 соответствует 2004 году), $\Delta T_{(n)}$ – среднегодовые аномалии ПТВ западной части приполярной зоны, $\Delta P_{(n)CAK}$ – среднегодовые аномалии САК. Достоверность данной регрессии превышает 30% , стандартная ошибка коэффициента регрессии 004, регрессионная сумма квадратов 10,97, остаточная сумма квадратов 26,63. F- и t-статистики удовлетворяют критическим уровням F-распределения и обратного двустороннего распределе-

ния Стьюдента, что свидетельствует о неслучайности и статистической значимости данной регрессии с вероятностью 0,95. Стандартная ошибка для $\Delta T_{(n)}$ примерно на 15% меньше, чем при кусочно-линейной аппроксимации. Выборочный коэффициент корреляции значений ряда последовательных сумм ежегодных приращений величины САК и ПТВ 0,6±0,1. Таким образом, регрессия ПТВ на САК более чем в 4 раза полезнее линейной аппроксимации векового хода ПТВ, в 3 раза достовернее аппроксимации его трендом 2-го порядка и незначительно, но полезнее оптимальной аппроксимации полиномом 3-ей степени, отражающей его основные черты.

Таблица 3.

Число появлений и частота отрицательных и положительных аномалий компонент САК в периоды направленных изменений температуры

Интервал	Исландия		Азоры		САК	
	Отрицат.	Положит.	Отрицат.	Положит.	Отрицат.	Положит.
1901–1938	23(0.6)	15(0.4)	15(0.4)	23(0.6)	14(0.4)	24(0.6)
1939–1974	13(0.4)	23(0.6)	22(0.6)	14(0.4)	21(0.6)	15(0.4)
1975–2004	19(0.6)	11(0.4)	12(0.4)	18(0.6)	13(0.4)	17(0.6)
1900–2004	55(0.5)	50(0.5)	50(0.5)	55(0.5)	53(0.5)	52(0.5)
1865–2004	73(0.5)	67(0.5)	69(0.5)	71(0.5)	68(0.5)	72(0.5)

Можно уменьшить количество факторов определяющих САК, и, следовательно, в определенной степени ПТВ северо-западной части Евразии. Естественно полагать, что на климат западной части приполярной зоны определяющее влияние оказывает только один компонент САК – Исландский минимум атмосферного давления. Регрессия САК на атмосферное давление в Исландии имеет вид:

$$P_{(n)САК} = -1{,}33051 \times P_{(n)Исл.} + 1353{,}97,$$

где $P_{(n)САК}$ – разность давления в североатлантических центрах действия и $P_{(n)Исл.}$ – давление на станции Рейкьявик. Полезность данного решения 90%, стандартная ошибка 1мб, стандартная ошибка параметра регрессии 0,1. Графическое сопоставление векового хода и последовательной суммы аномалий давления в Исландии и ПТВ в приполярной зоне (рис.3в) показывает их качественную противофазность.

Устойчивость описанной дальней корреляционной связи подтверждается проверкой полученных результатов по рядам эмпирических данных за более длительный интервал времени, а также по независимым выборкам из четных и нечетных членов рассматриваемых рядов.

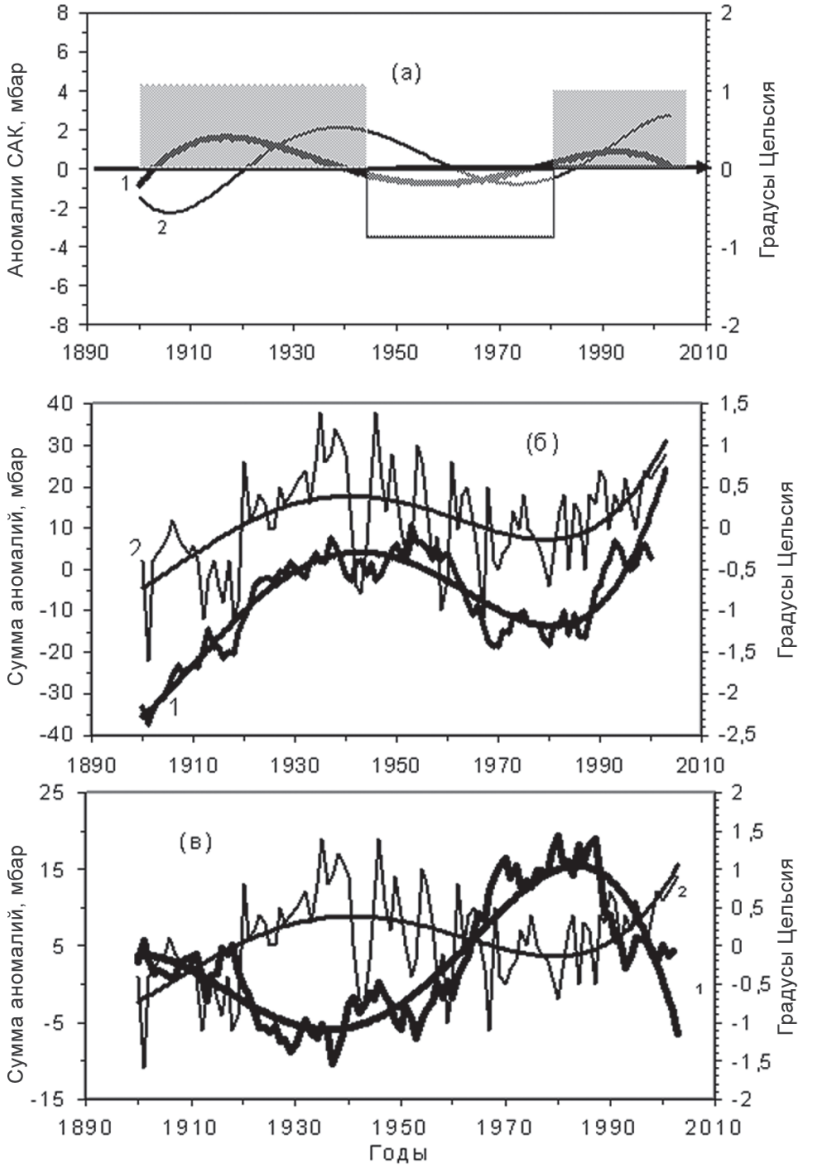


Рис. 3. Зависимость приземной температуры воздуха в западной части приполярной зоны (2) от параметров и компонент северо-атлантического колебания атмосферного давления (1).
а – полиномы ПТВ и аномалий САК 4-го порядка,
б – ПТВ и сумма аномалий САК,
(в) – ПТВ и сумма аномалий давления в Исландии.

Таким образом формализуется зависимость ПТВ в западной приполярной зоне Евразии от САК и от его северной компоненты. Эта зависимость проявляется и в других характеристиках климата. Идентичные периоды в данном регионе характерны для преобладающих типов атмосферной циркуляции (Бышев и др., 2004). Установлено наличие статистически значимых трендов в многолетних изменениях скорости и направления приземного ветра (Панин, Дзюба, 2006). По данным (Бардин, Полонский, 2005; Полонский, 2001) наблюдается коррелированность между повторяемостью, продолжительностью и глубиной циклонов в субполярной Атлантике и величиной САК.

С учетом того, что подстилающая поверхность рассматриваемой зоны примерно на 30% состоит из незамерзающей водной поверхности, физически обоснованным и соответствующим статистическому диагнозу эмпирических данных представляется следующий механизм климатической эволюции в западной части приполярной зоны на протяжении 104 лет.

Положительной фазе САК соответствует рост числа отрицательных аномалий давления в северной части Северной Атлантики и приполярных широтах и, как следствие, рост циклонической завихренности в атмосфере. Поток тепла от океана в атмосферу возрастает. Количество облачности над поверхностью Земли изменяется в противофазе с атмосферным давлением, а поглощенная радиация – в противофазе с облачностью и в фазе с атмосферным давлением. Эффективное излучение подстилающей поверхности уменьшается с ростом облачности. Суммарная радиация, поступающая на подстилающую поверхность, также имеет обратную зависимость с облачностью. Поэтому влияние облачности на радиационный баланс подстилающей поверхности и климатической системы в целом может быть противоположным по знаку в зависимости от соотношения альбедо облаков с альбедо конкретной подстилающей поверхности. Альбедо океана в среднем меньше чем альбедо облаков. Поэтому над океанами при увеличении облачности альбедо климатической системы несколько возрастает. Однако это с избытком компенсируется сохранением тепла посылаемого океаном атмосфере и удерживаемого облачностью (уменьшением эффективного излучения). Вследствие этого температура воздуха над океаном повышается, особенно в зимнее время года. В субтропических широтах при положительной фазе САК возрастает число положительных аномалий давления. Барический градиент между субтропическими и субполярными широтами возрастает. Преобладающая в зоне от субтропиков до заполярных широт западная составляющая переноса в тропосфере усиливается. Сопутствующими циклонами и фронтальными системами доставляется большее количество теплого и влажного воздуха из Атлантики в приполярные широты Евразии. С продвижением на восток атлантические воздушные

массы, отдавая тепло и влагу, постепенно теряют свои характеристики. Поэтому рассматриваемый механизм характерен лишь для западной части приполярной зоны.

При отрицательной фазе САК наблюдается обратное межширотное распределение атмосферного давления, облачности и аномалий температуры. Межширотный барический градиент уменьшается, что приводит к ослаблению зональной циркуляции в атмосфере, уменьшению адвекции тепла и влаги из Атлантики в северо-восточном направлении и понижению ПТВ западной части приполярной зоны.

Колебательный характер описанного механизма может обуславливаться отрицательной обратной связью в Северной Атлантике между океаном и атмосферой. Так, при положительной фазе САК в субполярной области Атлантики из-за увеличения циклоничности, скорости приземного ветра и теплоотдачи атмосфере температура поверхности воды понижается. Это приводит к затуханию роста температуры воздуха над субполярной Атлантикой и смене знака трендов ПТВ и атмосферного давления. При этом в субтропической зоне океана аналогичные процессы развиваются в обратном направлении. В результате уменьшается величина межширотного барического градиента и интенсивность северо-западного переноса в атмосфере. В итоге в северо-западную часть Евразии доставляется меньшее количество атлантических воздушных масс к тому же имеющих более низкую температуру. Таким образом, Северная Атлантика, возможно, играет роль регулятора амплитуды и продолжительности наблюдаемых направленных изменений ПТВ в западной части приполярной зоны.

Представленный механизм колебания атмосферного давления между субтропическими и субполярными широтными зонами подтверждает предложенную нами гипотезу о квазипериодическом перераспределении момента количества движения между вращающимися с различными угловыми скоростями Землёй и атмосферой (Дзюба, Панин, 2007). Описанный механизм влияния САК на температурный режим соответствует условиям сохранения абсолютной завихренности в атмосфере и динамического равновесия системы оболочек Земли с учетом колебательных процессов в них согласно решению вириального уравнения для атмосферы и океана (Ферронский, Ферронский, 2007).

Заключение

Потепление в течение последних 105 лет не может рассматриваться как дефиниция климата западной части приполярной зоны Северного полушария. Приведенные результаты не свидетельствуют о неизбежности катастрофических изменений климата в текущем столетии в рассматриваемой зоне. В первом десятилетии 21 века даже при неблагоприятном сценарии роста концентрации парниковых

газов в атмосфере среднегодовая температура приземного воздуха в западной части приполярной зоны не превысит уровень изменчивости, наблюдавшийся в 20 веке, а достигнет, вероятно, лишь уровня 1900-1930 гг. Статистически значимые изменения приземной температуры в рассматриваемой зоне вследствие динамического и радиационного воздействия парникового эффекта реальны при умеренных сценариях роста концентрации инертных газов в атмосфере (например, сценарий B2) в 30-е годы текущего столетия.

Статистический диагноз многолетних изменений температуры приземного воздуха в западной части приполярной зоны Евразии и параметров компонент САК, возможно, будет полезен при верификации численных моделей климата. Полученные результаты могут быть полезны при выработке экологических и других стратегий регионального и более крупного пространственного масштаба.

Подтверждение синхронности колебаний давления в североатлантических центрах действия атмосферы, высокая полезность регрессии САК на Исландский минимум и ПТВ северо-западной части Евразии на САК позволяют снизить многофакторность параметризации крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы.

Приведенные в работе результаты, касающиеся САК и возможного механизма его влияния на климат северо-западной части Евразии и приполярной зоны Северной Атлантики, могут быть адекватны лишь на межгодовом или междесятилетнем масштабе времени.

Предлагаемый механизм дальней корреляционной связи между изменениями климатических параметров в Северной Атлантике и наблюдаемыми трендами ПТВ в северо-западной части Евразии вследствие естественных процессов в системе океан-атмосфера свидетельствует о не окончательном решении вопроса о значимости антропогенного сигнала для указанных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г. В., Фролов И. Е., Соколов В. Т. 2007. Наблюдения в Арктике не подтверждают ослабление термохалинной циркуляции в Северной Атлантике. – Докл. РАН. Т. 413, № 1. С. 92-95.

Антоновский М. Я., Бухштабер В. М., Пивоваров В. А. 2004. Динамика закономерностей поля концентраций атмосферного CO_2 на основе данных мониторинга в течение последних 45 лет. Метеорология и гидрология. № 4. С. 67-76.

Бардин М. Ю., Полонский А. Б. 2005. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период. Физика атмосферы и океана. Т. 41, № 2. С. 147-157.

Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. 2004. Количественная оценка параметров климатической изменчивости системы океан-атмосфера. – Океанология. Т. 44, № 3. С. 341-353.

Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. 2006. О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками. Океанология. Т. 46, №2. С. 165-167.

Володин Е. М. и др. 2004. Связь величины глобального потепления и баланса тепла на поверхности Земли при увеличении содержания углекислого газа – Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 40, № 3. С. 306-313.

Голицын Г. С., Дзюба А. В., Осипов А. Г., Панин Г. Н. 1990. Региональные изменения климата и их проявления в современном подъеме уровня Каспийского моря. ДАН СССР. Т. 313, № 5. С. 1224-1227.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2004. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. Метеорология и гидрология. № 4, С. 50-66.

Дзюба А. В., Клиге Р. К. 1982. Современные изменения температуры поверхностных вод, ледовых условий и уровня Мирового океана. В кн.: Колебания уровня моря. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. М.: Радио и связь. С. 1020-107.

Дзюба А. В., Добровольский С. Г., Клиге Р. К. 1984. Об эвстатических колебаниях уровня океана и их прогнозировании. Метеорология и гидрология. № 7. С. 56-62.

Дзюба А. В., Осипов А. Г., Панин Г. Н. 1990. Закономерности временной и пространственной изменчивости гидрометеорологических характеристик, определяющих теплообмен Каспийского моря с атмосферой. Водные ресурсы. № 5. С. 17-32.

Дзюба А. В., Панин Г. Н. 1993. Многолетние изменения локальных и интегральных характеристик взаимодействия. В кн.: Взаимодействие вод суши с атмосферой. М.: Наука. С. 63-101.

Дзюба А. В., Панин Г. Н. 2007. Механизм формирования климатических тенденций в прошедшем и текущем столетиях. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 21. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 92-121.

Дымников В. П., Володин Е. М., Галин В. Я. и др. 2004. Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям. Метеорология и гидрология. № 4. С..77-92.

Израэль Ю. А., Егоров В. И., Парамонов С. Г. 2007. Фоновое содержание двуокиси углерода и метана в атмосфере северных районов Северного полушария и тенденции его изменения. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 21. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 9-22

Кондратьев К. Я. 2004. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата. Метеорология и гидрология. № 4. С. 93-119.

Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф. 2005. Современное общество потребления: экологические ограничения. Известия Русского географического общества. Т. 137, вып. 2. С. 13-38.

Лаппо С. С., Гулёв С. К., Добролюбов С. А. и др. 2003. Северная Атлантика и её влияние на климат Европы. Актуальные проблемы океанологии. Под ред. Н. П. Лаврова, М.: Наука. С. 8-59.

Монин А. С., Шишков Ю. А. 1979. История климата. Л.: Гидрометеоиздат. 408 С.

Монин А. С. 1988. Теоретические основы геофизической гидродинамики. – Л.: Гидрометеоиздат. 424 С.

Мохов И. И., Демченко П. Ф., Елисеев А. В. и др. 2002. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX-XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 38, № 5. С. 629-642.

Панин Г. Н., Дзюба А. В. 2006. Изменение направления и скорости ветра от Арктики до Каспийского моря. Водные ресурсы. Т. 33. № 6. С. 737-753.

Полонский А. Б. 2001. Роль океана в современных изменениях климата. Морской гидрофизический журнал. № 6. С. 32-58.

Семенов С. М., Израэль Ю. А., Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2007. Глобальные и региональные климатические последствия некоторых программ стабилизации концентраций диоксида углерода и метана. В кн.; Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т.21. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 75-91.

Ферронский В. И., Ферронский С. В. 2007. Динамика Земли. М.: Научный мир. 336 С.

Climate Change 2001. 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group

I to the 3 Assessment Report of the IPCC – Eds. Houghton J.T. et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 944 P.

Climate Change 2007. 2007. 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.

Hilmer M., Jung T. 2000. Evidence for a recent change in the link between the North Atlantic Oscillation and Arctic sea ice. Geophys. Res. Lett. V. 27. P. 989-992.

Jones P. D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. J. Climate. № 7. P. 1794-1802.

Jones P. D., New M., Parker D. E. et al. 1999. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. Rev. Geophys. May. V. 37, № 2. P. 173–199.

Jones P. D., Moberg A. 2001. Hemisphere and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to. J. Climate. 2003. V. 16. P. 206-223.

Josey S. A., Kent E., Sinha B. 2001. Can a state of the art of Atmospheric General Circulation Model reproduce resent NAO related variability at the air – sea interface? Geophys. Res. Leet. V. 28, № 24. P. 4543-4546.

Lorenz E. 1968. Climatic determinism . – Meteor. Monogr., № 30. P.1-3.

Lorenz E. Climatic change as a mathematical problem. 1970. J. Appl. Meteor. V. 9. P. 325-329.

Marshall J., Kushnir Y., Battisti D. et al. 2001. North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms. J. Climatology. V. 21, № 15. P. 1863-1889.

Meehl G. A., Boer G. J., Covey C., et al. 2000. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). Bull. Amer. Meteorol. Soc. V. 81. P. 313-318.

Rogers J. C. North Atlantic Storm Track variability and Its Association to the North Atlantic Oscillation and Climate Variability of Northern Europe. 1997. J. Climate. V. 10, № 7. P. 1635-1647

Walker G. T., Bliss E. W. 1932. World weather. Meteorol. Roy. Meteorol. Soc. V. 4, № 36, P. 53-84.

WMO.WDCGG data summary 2005. GAV DataVol.4. Greenhouse gases and other atmospheric gases. CD-ROM, № 11.

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ АТМОСФЕРОЙ НА РАВНОВЕСНУЮ СРЕДНЮЮ ТЕМПЕРАТУРУ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С. М. Семенов

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Serguei.Semenov@mtu-net.ru

Реферат. Построена упрощенная, одномерная (горизонтально-однородная) модель потоков энергии в климатической системе Земли. В результате оценки параметров модели, исходя из фактического бюджета энергии атмосферы в XX веке, показано, что: – в среднем коротковолновое излучение в гораздо большей степени рассеивается атмосферой, чем поглощается; – длинноволновое излучение в гораздо большей степени поглощается атмосферой, нежели коротковолновое поглощается и рассеивается; – свойство атмосферных слоев заданной массы поглощать инфракрасное (длинноволновое) излучение с длинами волн вне атмосферных окон с высотой заметно убывает в тропосфере, где массовый коэффициент поглощения на ее верхней границе составляет лишь примерно 66% от его значения у земной поверхности. Исследовано изменение вертикального профиля температуры в атмосфере при изменении массового коэффициента поглощения атмосферным воздухом длинноволнового излучения. Показано, что при увеличении этого коэффициента примерно на 20% в наибольшей степени увеличивается приповерхностная температура, почти на 9К. При этом на нижней границе тропопаузы увеличение составило лишь 2,4К. Исследование чувствительности равновесной средней среднеглобальной температуры земной поверхности к изменению параметров рассеяния и поглощения коротковолновой радиации и поглощения длинноволновой радиации тонкого слоя атмосферы на уровне тропопаузы показало, что значения чувствительности относятся, как 35:55:16. Таким образом, при хроническом внесении какого-либо агента в рассматриваемый слой атмосферы с целью повлиять на температуру земной поверхности знак сочетанного эффекта потенциально может быть и положительным – если свойство поглощения длинноволнового излучения будет в несколько раз сильнее выражено, чем свойства поглощения и рассеяния коротковолнового излучения.

Ключевые слова. Температура, земная поверхность, атмосфера, излучение, рассеяние, поглощение, тропопауза, геоинженеринг.

MODEL ESTIMATES OF THE EFFECTS OF CHANGES IN ABSORPTION AND DISPERSION RADIATIVE PROPERTIES OF THE ATMOSPHERE ON EQUILIBRIUM TEMPERATURE OF THE EARTH'S SURFACE

S. M. Semenov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, Serguei.Semenov@mtu-net.ru

Abstract. A simple one-dimensional (horizontally uniform) model quantifying energy fluxes in the climate system of the Earth is proposed. Model parameters were derived from the actual energy budget of the atmosphere in the 20th century. Estimated coefficients showed that on average: – dispersion of short-wave radiation discernibly prevails over adsorption; – adsorption of long-wave radiation significantly prevails over both absorption and dispersion of short-wave radiation; – the ability of atmospheric layers of a given mass to absorb infrared radiation discernibly decreases along with altitude (at the upper limit of the troposphere it makes roughly 66% of its value at the Earth's surface). Modification of the vertical temperature profile of the atmosphere in response to a change in absorption coefficient for long-wave radiation was computed. It was shown that an increase in the coefficient by 20% had led to warming by approximately 9K at the Earth's surface and 2,4K at the lower limit of the tropopause. Estimation of sensitivity of the equilibrium global mean surface temperature to a unit change in dispersion and adsorption parameters for short-wave radiation and adsorption parameter for long-wave radiation yielded 35:55:16 respectively for a thin atmospheric layer at the tropopause. Thus, continuous injections of an agent to this atmospheric layer aiming at reducing temperature of the Earth's surface potentially may lead to warming. This may occur if adsorption of long-wave radiation by the agent is many times more than its dispersion and adsorption of short-wave radiation.

Keywords. Temperature, Earth's surface, atmosphere, radiation, dispersion, absorption, tropopause, geoengineering.

Введение

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в своем Четвертом оценочном докладе сделала вывод о том, что бóльшая часть увеличения средней глобальной температуры во второй половине XX века с высокой вероятностью связана с наблюдаемым антропогенным увеличением концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере (IPCC, 2007, p. 5).

Известная обеспокоенность возможными негативными последствиями антропогенного изменения глобального климата (Schneider, Semenov, Patwardhan et al., 2007) стимулировала разработку и обсуждение дальнейших предложений по возможному сокращению выбросов ПГ в атмосферу, связанных с хозяйственной деятельностью. При этом обсуждаются как научные аспекты проблемы (Izrael, Semenov, 2006; Semenov et al., 2007), так и возможные дальнейшие практические шаги после завершения первой фазы Киотского протокола в 2012 г. (IPCC, 2007b, p. 15).

Известно, что сокращение глобальных антропогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу требует значительных затрат, что негативно отражается на темпах экономического развития. Сокращение глобального выброса ПГ до уровней, соответствующих стабилизации их концентраций в атмосфере в XXI или же в XXII веках, вряд ли может быть достигнуто лишь за счет стран, уже взявших на себя определенные обязательства по сокращению национальных эмиссий. Ведь экономический лидер западного мира – США, а также мощно развивающиеся в экономическом отношении Китай и Индия, никаких международных обязательств по сокращению национальных эмиссий ПГ не имеют.

В сложившейся ситуации активизировались дискуссии по альтернативным методам регулирования глобального климата, не связанным с идеей ограничения антропогенных выбросов ПГ. В том числе, обсуждается подход, который в мировой научной литературе называется «geoengineering», т.е. «геоинженерный» подход. В его основе лежит идея о таком специальном антропогенном воздействии на глобальный климат, которое могло бы компенсировать потепление, вызванное антропогенными выбросами ПГ. В частности, обсуждается возможность периодического внесения в нижнюю стратосферу аэрозолей (сульфатных или иных), что увеличит их содержание в этих слоях атмосферы. Предполагается, что это приведет к экранированию дополнительной части нисходящего потока солнечного излучения, что вызовет некоторое похолодание на земной поверхности. При этом содержание аэрозоля в тропосфере изменится несущественно вследствие малости его времени жизни в этой части атмосферы – эти частицы сравнительно быстро выводятся с осадками на подстилающую поверхность.

Этот подход был выдвинут М. И. Будыко (1974) и развит в последние годы Ю. А. Израэлем (2005). Научная дискуссия по этому вопросу идет довольно оживленная, см., например, (Crutzen, 2006; Kiehl, 2006; Wigley, 2006). Обсуждаются, в частности, и разные косвенные эффекты – влияние аэрозольных инжекций на фотохимическую продукцию озона в стратосфере, на потоки частиц, осаждающихся на подстилающую поверхность и др. Эти процессы в настоящее время еще недостаточно ясны и требуют тщательного изучения.

Кроме того, следует иметь в виду, что внесение дополнительного количества вещества, могущего взаимодействовать с излучением, приводит к множественным последствиям, которые не сводятся лишь к отражению дополнительной части нисходящего потока прямой солнечной радиации. Такое внесение вещества в определенный слой атмосферы, в том числе, в нижнюю стратосферу приводит в этом слое к изменениям

– рассеяния прямого и рассеянного коротковолнового излучения;

– поглощения прямого и рассеянного коротковолнового излучения;

– поглощения длинноволнового (инфракрасного) излучения[1].

Подчеркнем, что это касается потоков коротковолнового и длинноволнового излучения всех возможных направлений, а не только нисходящего потока прямой солнечной радиации.

Изменение температурного режима земной поверхности будет складываться под влияние всех трех перечисленных факторов. Каков будет их интегральный эффект (в частности, каков будет его знак, что будет – потепление или похолодание) – зависит от способности вносимого агента рассеивать коротковолновое излучение и поглощать солнечное и инфракрасное излучение, от соотношения этих свойств вносимого агента.

Цели данной работы:

– построить минимальную горизонтально-однородную модель атмосферы, описывающую статическое распределение ее основных параметров по высоте, равновесный глобальный бюджет энергии в которой соответствовал бы фактическому;

– исследовать с ее помощью влияние изменения свойств рассеяния и поглощения коротковолнового и длинноволнового излучения в узком слое атмосферы на высоте, соответствующей тропопаузе, на среднюю равновесную температуру земной поверхности.

Методы

В рамках минимальной, сильно упрощенной модели рассматриваются потоки излучения двух типов:

– коротковолновое излучение, под которым условно подразумевается любое излучение с длиной волны менее 4 мкм;

– длинноволновое излучение, с длиной волны больше 4 мкм.

Первый диапазон соответствует составу солнечного излучения – от начала ультрафиолетовой части спектра 0,125 мкм до конца его ближней инфракрасной части 4 мкм, а второй – составу излучения земной поверхности и атмосферы Земли (Кароль, 1986, с. 58). Хотя в спектре солнечного излучения есть ближняя инфракрасная область

1 Рассеяние инфракрасного излучения в данной работе не рассматривается.

(0,8 мкм – 4 мкм), приходящаяся на нее энергия относительна мала. Поэтому, несмотря на это, любое излучение первого типа мы будем ниже иногда называть солнечным, а второго – инфракрасным.

Рассматриваемая модель – **одномерная.** Единственной пространственной координатой является высота над уровнем земной поверхности, скажем, над уровнем моря. Соответственно, излучение распространяется в двух направлениях – вниз или же вверх.

Свойство слоя атмосферы рассеивать и поглощать коротковолновое излучение зависит в модели только от массы воздуха в нем. Рассеяние происходит по направлению набегающего потока и в противоположном направлении в равных долях – по 0,5. Поглощенная энергия преобразуется в тепло. Считается, что коэффициенты рассеяния и поглощения коротковолнового излучения пропорциональны массе воздуха в слое.

Свойство атмосферного слоя поглощать длинноволновое, инфракрасное излучение в основном также зависит от массы воздуха в слое. Однако, для того, чтобы учесть изменение структуры общего содержания парниковых веществ с высотой, в частности, уменьшение относительного содержания водяного пара (с высотой с уменьшением температуры его доля существенно падает) и метана (происходит его безвозвратный сток в химических реакциях, в основном с гидроксилом). Чтобы учесть это, предполагается, что коэффициент поглощения атмосферного слоя с заданной массой воздуха для инфракрасного излучения пропорционален произведению этой массы и множителя, который экспоненциально убывает с увеличением массы воздуха от земной поверхности до этого слоя. Таким образом, в частности, стратосферный озоновый слой и его взаимодействие с потоками лучистой энергии не рассматриваются. Тем самым, характерного возрастания температуры воздуха в стратосфере в модели возникнуть не может, и модель оказывается пригодной лишь для изучения температурного профиля тропосферы.

В отличие от атмосферных слоев, земная поверхность поглощает всегда определенную часть $(1-\alpha)$ нисходящего потока коротковолнового излучения, а остальную часть отражает; α есть альбедо земной поверхности. Нисходящий поток длинноволнового излучения полностью поглощается земной поверхностью. В равновесии поглощенная земной поверхностью энергия поступает обратно в атмосферу двумя путями. Во-первых, в виде инфракрасного излучения. Во-вторых, с термиками и при испарении воды. В модели предполагается, что во втором случае тепло распределяется в тропосфере в таких долях, что земной поверхности соответствует 1, верхней границе тропосферы соответствует 0, а доли промежуточных атмосферных слоев определяются линейной интерполяцией. При этом при интерполяции используется не переменная «высота x над земной поверхностью», а пе-

ременная «масса воздуха M ниже данной высоты». В модели также предполагается, что часть инфракрасного потока, излучаемого земной поверхностью, которая соответствует так называемым атмосферным окнам, беспрепятственно пропускается атмосферными слоями и уходит в космос.

Сформулированные выше допущения приводят к следующим уравнениям, описывающим потоки энергии в атмосфере.

Нисходящий $S^{\downarrow}$ и восходящий $S^{\uparrow}$ потоки прямой солнечной радиации меняются с изменением переменной M – суммарной массы воздуха от земной поверхности до данной высоты – следующим образом:

$$\frac{dS^{\downarrow}}{d(-M)} = -(u+v)S^{\downarrow};\ \frac{dS^{\uparrow}}{dM} = -(u+v)S^{\uparrow},$$

где u и v – соответственно массовые коэффициенты рассеяния и поглощения коротковолнового излучения. Поскольку при расчетах далее будет использоваться система СИ, то удобно считать, что M – масса воздуха до данной высоты в столбе воздуха с сечением 1 м^2. В таком случае размерность коэффициентов есть м^2 • кг$^{-1}$.Физический смысл этих уравнений – ослабление потока прямой солнечной радиации вследствие ее рассеяния и поглощения.

Нисходящий $D^{\downarrow}$ и восходящий $D^{\uparrow}$ потоки рассеянной коротковолновой радиации меняются с изменением переменной M следующим образом:

$$\frac{dD^{\downarrow}}{d(-M)} = -(u+v)D^{\downarrow}+0,5u(D^{\downarrow}+D^{\uparrow}+S^{\downarrow}+S^{\uparrow});$$

$$\frac{dD^{\uparrow}}{dM} = -(u+v)D^{\uparrow}+0,5u(D^{\downarrow}+D^{\uparrow}+S^{\downarrow}+S^{\uparrow}).$$

Физический смысл этих соотношений следующий: оба потока рассеянного коротковолнового излучения $D^{\downarrow}$ и $D^{\uparrow}$ ослабляются при прохождении слоя воздуха так же, как и прямое излучение, за счет рассеяния и поглощения, но и усиливаются за счет рассеяния этим слоем прямого и рассеянного излучения.

Подобным же образом описываются нисходящий $L^{\downarrow}$ и восходящий $L^{\uparrow}$ потоки инфракрасного излучения:

$$\frac{dL^{\downarrow}}{d(-M)} = -w(M)\,L^{\downarrow}+0,5w(M)\,(L^{\downarrow}+L^{\uparrow})+0,5v(D^{\downarrow}+D^{\uparrow}+S^{\downarrow}+S^{\uparrow})+0,5H^{c}(M);$$

$$\frac{dL^{\uparrow}}{dM} = -w(M)\,L^{\uparrow}+0,5w(M)\,(L^{\downarrow}+L^{\uparrow})+0,5v(D^{\downarrow}+D^{\uparrow}+S^{\downarrow}+S^{\uparrow})+0,5H^{c}(M);$$

Здесь w – массовый коэффициент поглощения инфракрасного излучения ($м^2 \cdot кг^{-1}$). Физический смысл этих соотношений: ослабление инфракрасного потока за счет его поглощения слоем воздуха при одновременном его усилении за счет излучения этим же слоем в инфракрасном диапазоне того количества энергии, что было поглощено в виде прямого и рассеянного солнечного излучения, а также в виде «нерадиационного» тепла $H^c(M)$. В нисходящем $L^{\downarrow}$ и восходящем $L^{\uparrow}$ потоках инфракрасного излучения не учитываются часть потока, приходящаяся на атмосферные окна.

Такая запись уравнений переноса энергии, которая была использована выше, помогает объяснить смысл уравнений. Приведем их, однако, к более традиционной форме – перейдем в левых частях к дифференцированию только по M, а в правых частях приведем подобные члены при тех потоках, производные которых по M имеются в их левых частях:

$$\frac{dS^{\downarrow}}{dM} = (u+v)S^{\downarrow};$$
$$\frac{dS^{\uparrow}}{dM} = -(u+v)S^{\uparrow};$$

$$\frac{dD^{\downarrow}}{dM} = (v+0,5u)D^{\downarrow} - 0,5uD^{\uparrow} - 0,5u(S^{\downarrow}+S^{\uparrow});$$
$$\frac{dD^{\uparrow}}{dM} = 0,5uD^{\downarrow} - (v+0,5u)D^{\uparrow} + 0,5u(S^{\downarrow}+S^{\uparrow});$$

$$\frac{dL^{\downarrow}}{dM} = 0,5w(M)\,L^{\downarrow} - 0,5w(M)L^{\uparrow} - 0,5v(S^{\downarrow} + S^{\uparrow} + D^{\downarrow} + D^{\uparrow}) - 0,5H^c(M);$$
$$\frac{dL^{\uparrow}}{dM} = 0,5w(M)\,L^{\downarrow} - 0,5w(M)L^{\uparrow} + 0,5v(S^{\downarrow} + S^{\uparrow} + D^{\downarrow} + D^{\uparrow}) + 0,5H^c(M).$$

Для рассматриваемых потоков лучистой энергии существуют некоторые граничные условия.

Во-первых, $D^{\downarrow}(M_0) = 0$ и $L^{\downarrow}(M_0) = 0$, где M_0 – полная масса воздуха в столбе. Это означает, что на верхнюю границу атмосферы сверху не поступают рассеянная солнечная и инфракрасная радиация (с длиной волны > 4 мкм).

Во-вторых, $S^{\uparrow}(0) = \alpha S^{\downarrow}(0)$ и $D^{\uparrow}(0) = \alpha D^{\downarrow}(0)$, т.е. потоки прямой и рассеянной коротковолновой радиации одинаково отражаются земной поверхностью.

В-третьих, $(1-\alpha)(S^{\downarrow}(0)+D^{\downarrow}(0)) = L^{\uparrow}(0)+L^{w}+H_0^c$, где L^{w} – часть потока инфракрасного излучения земной поверхности, приходящаяся на атмосферные окна, а H_0^c – поток энергии, уходящей с земной поверхности в нерадиационной форме – за счет процессов конвекции (тер-

мики) и испарения. Это равенство означает нулевой баланс энергии на земной поверхности.

Коэффициенты u и v считаются константами. Коэффициент w экспоненциально убывает с ростом M: $w(M) = w_0 \exp(-bM)$.

Поток энергии H_0^c, уходящей с земной поверхности в атмосферу в конвективной форме и в процессе испарения, распределяется в тропосфере в виде поглощенных потоков $H^c(M)$ линейно по M, т.е. поверхности Земли соответствует 1, верхней границе тропосферы соответствует 0, а для промежуточных значений M применяется линейная интерполяция. При этом верхняя граница тропосферы по переменной M определяется таким образом, чтобы в ней содержалось 80% всей массы атмосферы.

Считается, что атмосфера находится не только в состоянии равновесия по энергетическим потокам, что отражает последняя система шести дифференциальных уравнений, но и в состоянии статического механического равновесия. Последнее допущение приводит к следующему соотношению между давлением воздуха $P(M)$ на высоте, соответствующей массе воздуха M под данным слоем, и значением M :

$$P(M) = g\,(M_0 - M),$$

где $g = 9{,}81$ м с$^{-1}$ есть ускорение свободного падения.

В равновесной атмосфере переменные «высота над земной поверхностью» X и «масса воздуха до высоты X» M связаны через уравнение состояния идеального газа:

$$P(M)dX = \frac{dM}{m}RT(M), \text{ или же, } \frac{dX}{dM} = \frac{RT(M)}{mP(M)},$$

где m – средняя молекулярная масса воздуха земной атмосферы в углеродных единицах, R – универсальная газовая постоянная, а T – абсолютная температура воздуха на высоте X, соответствующей массе воздуха M от земной поверхности до этой высоты.

Абсолютная температура воздуха $T(M)$ вычисляется, исходя из значения $\mathrm{d}F(M)$ суммарной энергии всех типов, поглощенной в тонком слое заданной массы $\mathrm{d}M$, нижняя граница которого расположена на высоте X, соответствующей массе воздуха M до этой высоты:

$$T(M) = T(0)\left(\frac{dF(M)}{dF(0)}\right)^{1/4}$$

Это соотношение получается непосредственно из закона Стефана-Больцмана и предположения об однородности атмосферы, а именно о том, что спектры поглощения ее разных слоев заданной массы одинаковы (Матвеев, 2000, с. 122–129).

Температура воздуха $T(0)$ в слое, непосредственно примыкающем к земной поверхности, в равновесии в модели принимается равной

температуре поверхности Земли T_s. Последняя же при заданном потоке инфракрасного излучения земной поверхности F_s вычисляется, исходя из следующего соотношения:

$$\sigma T_s^4 = F_s$$

в соответствии с законом Стефана-Больцмана.

Средняя по времени среднеглобальная температура в тропопаузе принимается равной 218К (Матвеев, 2000, с. 60).

И, наконец, масса атмосферы принимается равной $5{,}157 \cdot 10^{18}$ кг (Александров и др., 1992, с. 6), а площадь земной поверхности – $510{,}098 \cdot 10^{12}$ м^2 (Матвеев, 2000, с. 54). Тем самым масса столба атмосферы единичного сечения равна $1{,}101 \cdot 10^4$ кг м$^{-2}$.

Отметим, что в уравнения равновесной атмосферы, приведенные выше, явно не входит теплоемкость воздуха. Тем самым, равновесное состояние атмосферы, в частности, вертикальное распределение температуры, давления и плотности не зависит от теплоемкости в противоположность базовым предположениям конвективной теории равновесия атмосферы, предложенной в работе (Сорохтин, 2001).

В табл. 1 сведены оценки некоторых потоков энергии в климатической системе Земли, а в табл. 2 – значения упоминавшихся выше физических параметров.

Таблица 1.

Оценки некоторых средних по времени среднеглобальных потоков энергии в климатической системе Земли, Вт м$^{-2}$.

№ п/п	Поток	Соответствующая модельная переменная	Оценка значения по (Kiehl, Trenberth, 1997)
1	Поток прямого солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы	$S^{\downarrow}(M_0)$	342
2	Суммарный поток коротковолнового (прямого и рассеянного) излучения, уходящего в космос	$S^{\uparrow}(M_0) + D^{\uparrow}(M_0)$	107
3	Суммарный поток коротковолнового излучения, достигающего земной поверхности	$S^{\downarrow}(0) + D^{\downarrow}(0)$	198
4	Суммарный поток коротковолнового излучения, отраженного земной поверхностью	$S^{\uparrow}(0) + D^{\uparrow}(0)$	30
5	Поток длинноволнового излучения земной поверхности вне атмосферных окон	$L^{\uparrow}(0)$	350
6	Поток длинноволнового излучения земной поверхности в атмосферных окнах	L^{w}	40
7	Поток тепла, уходящего с земной поверхности с термиками и за счет испарения	H_0^c	102

Таблица 2.

Значения физических параметров.

Параметр	Символ	Значение	Размерность	Источник
Средняя масса молекулы сухого воздуха по углеродной шкале	m	28,9645	кг кмоль$^{-1}$	Матвеев, 2000, с. 44
Универсальная газовая постоянная	R	8,31441	Дж К$^{-1}$ моль$^{-1}$	Равдель, Пономарева, 1983, с. 11
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5{,}67032 \cdot 10^{-8}$	Вт м$^{-2}$ К$^{-4}$	Матвеев, 2000, с. 127
Среднее альбедо земной поверхности	α	0,152	безразмерный	Вычислено по данным табл. 1 как отношение оценок, приведенных в строках 4 и 3

Приведенные выше значения физических констант, оценок потоков и допущения о характере процессов в климатической системе были использованы при построении программного модуля на языке FORTRAN, пригодного для расчетов вертикальных профилей параметров атмосферы на обычных персональных компьютерах.

Результаты и обсуждение

Параметры u, v, w_0 и b были подобраны так, чтобы модельные значения переменных, упомянутых в табл. 1, и температуры в тропопаузе совпадали с теми оценками, что приведены в предыдущем разделе (табл. 1). Подобранные значения параметров модели приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Значения параметров модели; размерность кг$^{-1}$ м^2.

Параметр	Символ	Значение
Массовый коэффициент рассеяния для коротковолнового излучения	u	$0{,}8312 \cdot 10^{-4}$
Массовый коэффициент поглощения для коротковолнового излучения	v	$0{,}1834 \cdot 10^{-4}$
Массовый коэффициент поглощения длинноволнового излучения воздухом у земной поверхности	w_0	$0{,}4539 \cdot 10^{-3}$
Поправка на ослабление с высотой коэффициента поглощения длинноволнового излучения атмосферными слоями одинаковой массы	b	$0{,}4778 \cdot 10^{-4}$

Полученные оценки указывают, прежде всего, на то, что:

– в среднем коротковолновое излучение в гораздо большей степени рассеивается атмосферой, чем поглощается;

– длинноволновое излучение в гораздо большей степени поглощается атмосферой, нежели коротковолновое поглощается и рассеивается;

– свойство атмосферных слоев заданной массы поглощать инфракрасное (длинноволновое) излучение с длинами волн вне атмосферных окон с высотой заметно убывает в тропосфере, где массовый коэффициент поглощения на верхней границе тропосферы составляет лишь примерно 66% от его значения у земной поверхности.

На рис. 1 приведен вертикальный профиль средней среднеглобальной температуры, полученный при модельном расчете, а также фактические данные, соответствующие стандартной атмосфере (Атмосфера, 1991). Модельный профиль удовлетворительно соответствует фактическому, хотя в средней части тропосферы можно заметить занижение расчетных значений температуры по сравнению с фактическими значениями. Это, по-видимому, связано с чрезмерно упрощенным подходом к распределению в тропосфере потоков тепла нерадиационной природы, связанных с термиками и испарением. В модели максимальный перенос тепла этими потоками происходит в приповерхностном слое атмосферы, в то время как, по крайней мере, для второго потока, это предположение не совсем реалистично. Однако для первого приближения этим различием – см. рис. 1 – можно пренебречь.

Вертикальный профиль температуры, получаемый при модельном расчете, весьма сильно зависит от массового коэффициента поглощения w атмосферным воздухом длинноволнового излучения. Для демонстрации этого, не меняя прочих параметров модели мы изме-

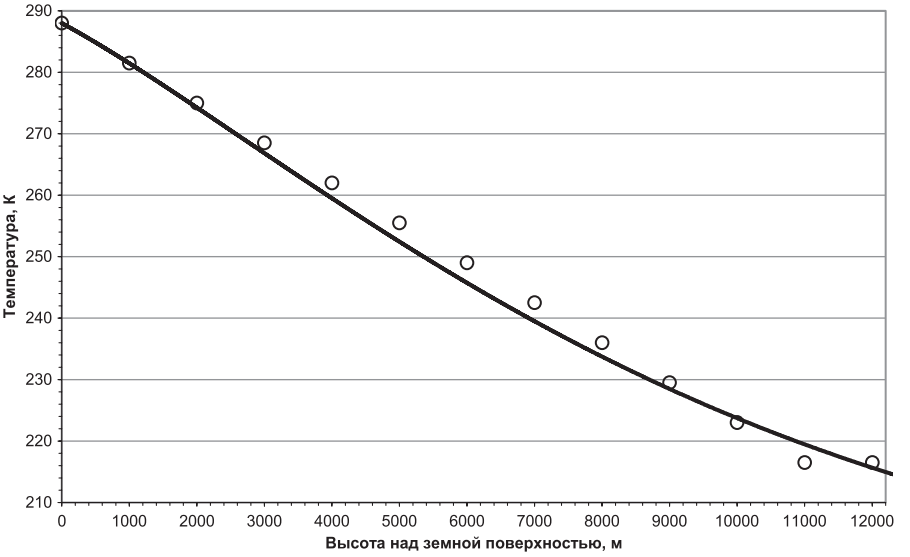


Рис. 1. Расчетный вертикальный профиль средней среднеглобальной температуры в атмосфере в конце XX века – сплошная линия и стандартная атмосфера – кружки (Атмосфера, 1991).

нили значение параметра $w_0 = 0{,}4539 \cdot 10^{-3}$ на $0{,}5500 \cdot 10^{-3}$, т.е. увеличили исходной значение на примерно на 20%. Вследствие этого равновесный вертикальный профиль температуры в тропосфере заметно изменился, см. рис. 2. Наибольшему изменению подверглась приповерхностная температура – она увеличилась почти на 9К. При этом на верхней границе тропопаузы увеличение составили лишь 2,4К.

При рассматриваемом увеличении массового коэффициента поглощения длинноволнового излучения изменяются не только равновесные значения температуры в слоях атмосферы, соответствующих разным значениям переменной M, что показано на рис. 2. Изменится также расположение этих слоев по высоте над земной поверхностью. На рис. 3 изображены эти изменения в тропосфере в зависимости от начальной высоты. Видно, что тропосфера расширилась, причем вышележащие слои поднялись на большую высоту по сравнению с нижележащими слоями. Однако, это увеличение невелико – до нескольких сотен метров, и, если оценить эти изменения в процентах, то становится видно, что максимальное относительное расширение характерно для приповерхностного слоя – примерно 3% (рис. 4). Далее этот показатель уменьшается с высотой.

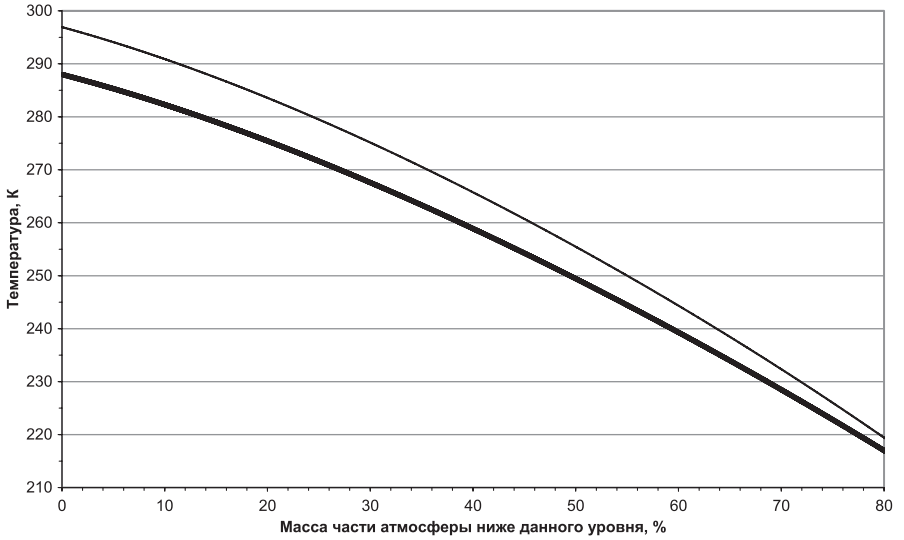


Рис. 2. Изменение вертикального среднего среднеглобального профиля температуры воздуха в равновесии при увеличении массового коэффициента поглощения длинноволновой радиации примерно на 20% ; значения температуры приведены в зависимости от переменной M – массы воздуха в слое от земной поверхности до данной высоты в процентах от общей массы атмосферы; исходный профиль – жирная линия, модифицированный профиль – обычная линия.

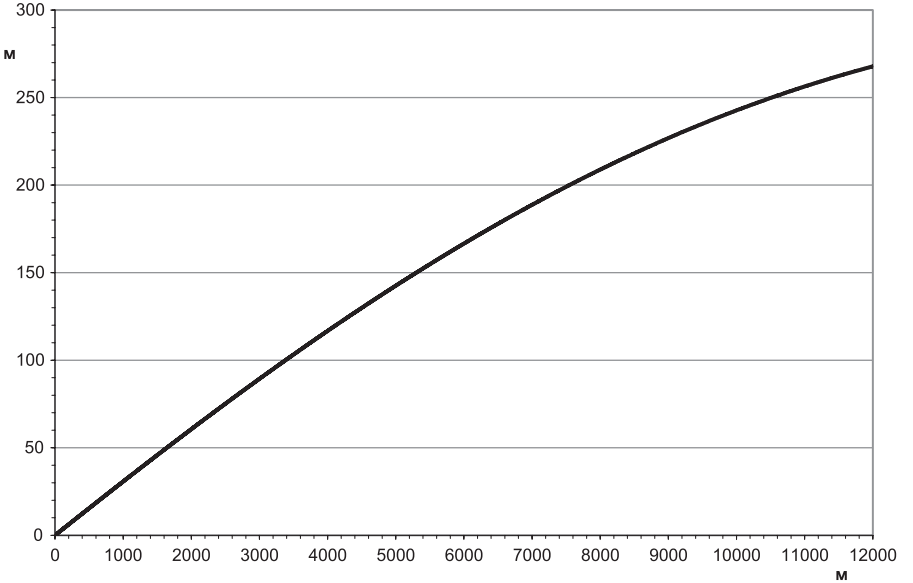


Рис. 3. Изменение границ атмосферных слоев: по оси абсцисс – исходная высота, по оси ординат – ее изменение при увеличении массового коэффициента поглощения длинноволновой радиации в машинном эксперименте.

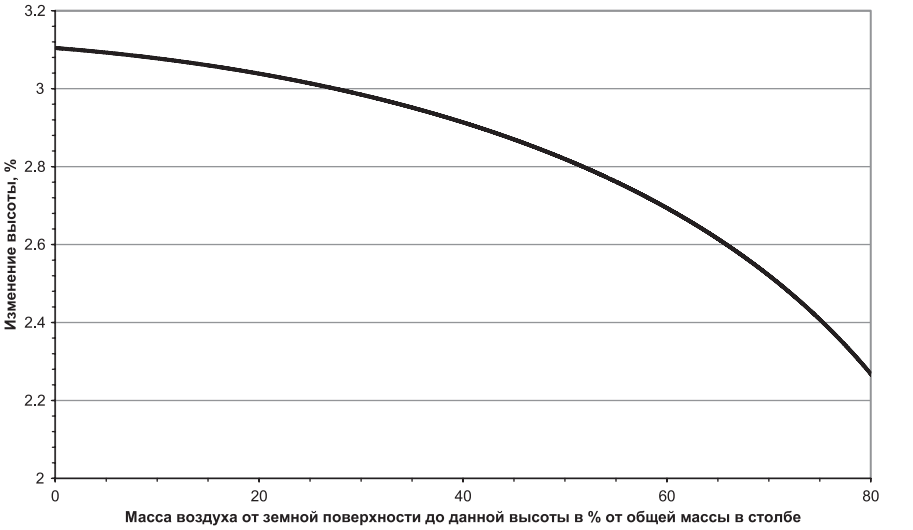


Рис. 4. Изменение границ атмосферных слоев с заданной массой воздуха под ними: по оси абсцисс – масса воздуха от земной поверхности до данной высоты, по оси ординат – изменение высоты в % при увеличении массового коэффициента поглощения длинноволновой радиации в машинном эксперименте.

Коэффициентам, приведенным в табл. 3, отвечают соответственно следующие значения параметров рассеяния и поглощения коротковолнового излучения, а также коэффициента поглощения длинноволнового излучения, для слоя, нижняя граница которого совпадает с началом тропопаузы и который содержит 1/10000 массы атмосферного воздуха: $u_1 = 0{,}915 \cdot 10^{-4}$, $v_1 = 0{,}202 \cdot 10^{-4}$ и $w_1 = 0{,}328 \cdot 10^{-3}$. Это – безразмерные величины.

Рассмотрим теперь специфическое воздействие на радиационные свойства атмосферы, а именно, изменение в этом слое его параметров рассеяния (u_1) и поглощения (v_1) коротковолновой радиации и поглощения длинноволновой радиации (w_1). В машинном эксперименте эти параметры будут меняться по отдельности, а именно, увеличиваться примерно на 10%. При этом будут вычисляться соответствующее изменение равновесной температуры в приповерхностном слое атмосферы, а также отношение такого изменения к изменению возмущаемого параметра, т.е. чувствительность. В табл. 4 суммированы условия машинного эксперимента и полученные оценки чувствительности.

Таблица 4.

Условия машинного эксперимента и полученные оценки чувствительности.

Параметр	Исходное значение	Возмущение параметра, Δ	Оценка чувствительности, $\Delta T_s/\Delta$
Параметр рассеяния для коротковолнового излучения	$0{,}915 \cdot 10^{-4}$	$0{,}1 \cdot 10^{-4}$	−35
Параметр поглощения для коротковолнового излучения	$0{,}202 \cdot 10^{-4}$	$0{,}2 \cdot 10^{-5}$	−55
Параметр поглощения длинноволнового излучения	$0{,}328 \cdot 10^{-3}$	$0{,}5 \cdot 10^{-4}$	+ 16

Оценки чувствительности равновесной температуры T_s к изменению в рассматриваемом слое параметров рассеяния и поглощения коротковолновой радиации и поглощения длинноволновой радиации свидетельствуют о следующем. Равновесная температура T_s наиболее чувствительна к изменению параметра поглощения v_1 коротковолновой радиации, несколько менее – к изменению параметра рассеяния u_1. При увеличении обоих параметров температура в приповерхностном слое уменьшается. К изменению параметра поглощения длинноволновой радиации w_1температура T_s менее чувствительна, чем к изменению двух вышеназванных параметров. При этом при его увеличении T_s возрастает, т.е. парниковый эффект усиливается.

Пусть теперь на рассматриваемый слой атмосферы оказывается комплексное воздействие, т.е. одновременно меняются все три параметра u_1, v_1 и w_1. Это происходит, в частности, при хроническом изменении аэрозольного состава этого слоя атмосферы – ведь аэрозоли одновременно модифицируют все три рассматриваемых радиационных свойства. Тогда знак сочетанного эффекта будет зависеть от того, какое именно свойство наиболее выражено у вносимого агента. Если, например, это вещество в несколько раз лучше поглощает длинноволновое излучение, чем поглощает и отражает коротковолновое, то результирующее воздействие может привести к потеплению в приповерхностном слое, т.е. к увеличению T_s.

Благодарности

Автор благодарен В. И. Эскину за плодотворные обсуждения рассматриваемой проблемы, а также В. В. Ясюкевичу и И. О. Попову за помощь при проведении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. 1992. Озонный щит Земли и его изменения. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 288 С.

Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). 1991. Л.: Гидрометеоиздат. 509 С.

Будыко М. И. 1974. Изменение климата. Л.: Гидрометеоиздат. 280 С.

Израэль Ю. А. 2005. Эффективные пути сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы. Метеорология и гидрология. № 10. С. 5-9.

Кароль И. Л. (ред.). 1986. Радиационно-фотохимические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 190 С.

Матвеев Л. Т. 2000. Физика атмосферы. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат. 778 С.

Равдель А. А., Пономарева А. М. (ред.). 1983. Краткий справочник физико-химических величин. Ленинград, «Химия», Ленинградское отделение. 231 С.

Сорохтин О. Г. 2001. Парниковый эффект: миф и реальность. Вестник РАЕН. Т. 1, №1. С. 8-21.

Cicerone R. J. 2006. Geoengineering: encouraging research and overseeing implementation. Climatic Change, V. 77. P. 221-226.

Crutzen P. J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? Climatic Change, V. 77. P. 211-220.

IPCC, 2007a: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 P.

IPCC, 2007b: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Izrael Yu. A., Semenov S. M. 2006. Critical Levels of Greenhouse Gases, Stabilization Scenarios, and Implications for the Global Decisions Avoiding Dangerous

Climate Change, Schellnhuber H. J., Cramer W., Nakicenovic N., Wigley T., Yohe G (Eds). Cambridge University Press.

Kiehl J. T., Trenberth K. E. 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bull. Amer. Met. Soc. V. 78. P. 197-208.

Kiehl J. T. 2006. Geoengineering climate change: treating the symptom over the cause? Climatic Change, V. 77. P. 227-228.

Schneider S. H., Semenov S., Patwardhan A., Burton I., Magadza C. H. D., Oppenheimer M., Pittock A. B., Rahman A., Smith J. B., Suarez A., Yamin F. 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. 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, UK.

Semenov S. M., Izrael Yu. A., Gruza G. V., Ran'kova E. Ya. 2007. Global and regional scale climate implications of some stabilization programs for carbon dioxide and methane concentrations. In : Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling. V. XXI. St. Petersburg, Gidrometeoizdat. P. 75-91.

Wigley T. M. L. 2006. A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization. Science. V. 314. P. 452-454.

ИЗМЕНЕНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ СУББОРЕАЛЬНЫХ РАВНИННЫХ ЛАНДШАФТОВ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

***Е. А. Черенкова*[1], *Т. Б. Титкова*[2]**

Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., д.29, Институт географии РАН, [1]lcherenkova@marketresearch.ru; [2]ttitkova@yandex.ru

Реферат. В период 1961–1990 гг. по отношению к 1936–1960 гг. увеличилось увлажнение суббореальных равнинных ландшафтов России. Изменение увлажнения Западно-Сибирского сектора было менее интенсивным, чем Восточно-Европейского. В период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. в зонах суббореальных ландшафтов России проявились разнонаправленные тенденции изменения увлажнения. Оценки изменений увлажнения на территории исследования в первой половине XXI века, полученные в численных экспериментах с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) ECHAM (Германия), Хэдли-центра (Великобритания) и региональной климатической моделью Главной геофизической обсерватории (Россия), оказались различными. Результаты расчетов с помощью двух последних моделей в наибольшей степени соответствуют современным тенденциям увлажнения. При этом изменения увлажнения в соседних ландшафтных зонах могут быть противоположными по знаку, а в пределах зоны изменения могут быть неоднородны в пространстве. Установлено, что произошедшие в 1936–2000 гг. изменения увлажнения были зональными и затронули все зоны суббореальных равнинных ландшафтов. Эти изменения были неустойчивыми во времени и пространстве, кратковременными и обратимыми, поэтому не привели к необратимому смещению границ ландшафтных зон. Ожидаемые в первой половине XXI века изменения коэффициента увлажнения имеют такой же порядок, как и в XX веке. Это позволяет предположить, что возможные локальные изменения не приведут к заметным изменениям границ зональных ландшафтов.

Ключевые слова. Россия, глобальное потепление, увлажнение, коэффициент увлажнения, Торнтвейт, суббореальные равнинные ландшафты, Восточно-Европейская равнина, Западно-Сибирская равнина, модель регионального климата, модель общей циркуляции атмосферы и океана.

CHANGES IN THE MOISTENING OF SUB-BOREAL PLAIN LANDSCAPES IN RUSSIA UNDER GLOBAL WARMING

***E. A. Cherenkova*[1)], *T. B. Titkova*[2)]**

Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetnyi per., 109017 Moscow, Russia, [1)]lcherenkova@marketresearch.ru; [2)]ttitkova@yandex.ru

Abstract. In 1961–1990 vs. 1936–1960, moistening of sub-boreal plain landscapes in Russia was enhanced. The increase was lesser in the West Siberian sector than in the East European one. In 1991–2000 vs. 1961–1990, changes in moistening in sub-boreal landscape zones of Russia were not unidirectional. Estimates of changes in moistening over the investigated territory for the first half of the 21st century obtained in computational experiments with ECHAM (Germany), Hadley (United Kingdom) atmosphere-ocean general circulation models (AOGCM), and regional climate model of the Main Geophysical Observatory (Russia) substantially differed. Outputs of the second and third model are to the utmost similar to the recent tendencies in moistening. Changes in moistening in the neighboring landscapes may have different signs and may be spatially heterogeneous within a given zone. It is shown that changes in moistening in 1936–2000 were of zonal character and took place in all sub-boreal plain landscape zones. The changes were not persistent in time and space. They were short-term and reversible. Therefore they did not cause irreversible shifts of the landscape zone boundaries. Changes in the moisture index ex-pected in the first half of the 21st century are of the same order as those observed in the 20th century. Therefore, one can hypothesize that corresponding local alterations will not lead to discernible shifts of the landscape zone boundaries.

Keywords. Russia, global warming, moistening, moisture index, Thornthwaite, sub-boreal plain landscapes, East European plain, West Siberian plain, regional climate model, atmosphere-ocean general circulation model.

Введение

Под увлажнением авторы подразумевают влагообеспеченность территории. Увлажнение характеризуется соотношением между приходной и расходной компонентами водного баланса (количеством выпадающих атмосферных осадков и испаряемостью) и численно выражается посредством коэффициентов увлажнения (КУ). Формулы для расчета коэффициентов увлажнения, предлагаемые многими учеными, содержат вариации функций осадков и испаряемости. Ис-

паряемость является условной величиной, характеризующей максимально возможное (потенциально возможное, не ограниченное запасами воды) испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях (Хромов, Мамонтова, 1974). Известно множество расчетных методов оценки испаряемости, учитывающих данные температуры, влажности воздуха, скорости ветра и составляющих радиационного баланса (Thornthwaite, 1931, 1948; Будаговский, 1964; Penman, 1948; Monteith, 1985; Иванов, 1954; Константинов, 1968; Мезенцев, 1962; Будыко, 1956; Ольдекоп, 1911; Тюрк, 1958; Holdridge, 1959).

В данной статье величина испаряемости в формуле для вычисления коэффициента увлажнения определялась по методу Торнтвейта (Thornthwaite, 1931). Коэффициент увлажнения Торнтвейта был выбран авторами для анализа изменения увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в связи с тем, что на нем базируется классификация засушливых земель «Мирового атласа опустынивания» (UNEP, 1992) и Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (CCD, 1994).

Одной из особенностей климата России, присущей последней трети XX века, является усиление потепления в холодный период. В результате аномалии среднегодовой температуры воздуха для России изменились от 0,0–0,2°С в конце базового периода (1961–1990 гг.) до 0,8°С в 2000 г. (Результаты…, 2005). Влияние потепления на увлажнение сельскохозяйственных земель России на уровне экономических районов за последние 30 лет было неоднозначным (Сиротенко и др., 2007). Тенденция роста увлажнения преобладала на территории Северного Кавказа, засушливой части Поволжья, Южного Предуралья и Зауралья, западной части Западной Сибири. В то же время увлажнение Центрально-Черноземного и Центрального районов, а также Алтайского края уменьшилось.

На возможность противоположных тенденций увлажнения территории России указывает и анализ проведенных численных экспериментов на общепризнанных моделях общей циркуляции атмосферы и океана МОЦАО (Груза и др., 2006). Неоднозначные оценки предполагаемых изменений гидротермических условий лесостепной и степной зон для сценариев антропогенного потепления получены при сравнении результатов численных экспериментов разных МОЦАО (Шумова, 2005). Разнонаправленные изменения агроклиматических условий в XXI века для европейской части России были получены при реализации сценариев аридного (МОЦАО HadCM3) и гумидного потепления (МРК ГГО) (Сиротенко, Грингоф, 2006). Вывод об уменьшении увлажнения и сдвига к северу границ зональных ландшафтов Волжского бассейна следует из анализа антропогенного сценария МОЦАО GISS (Коломыц, 2004, 2006).

Целью данной статьи является оценка влияния наблюдаемого и ожидаемого потепления на увлажнение суббореальных равнинных ландшафтов России. Для этого необходимо ответить на следующие вопросы: 1) увлажнение каких зональных ландшафтов изменялось в наибольшей степени в периоды 1936–1960, 1961–1990 и 1991–2000 гг.? 2) различна ли структура изменений увлажнения каждой из ландшафтных зон? 3) каковы тенденции увлажнения зональных ландшафтов по разным сценариям ожидаемого антропогенного потепления? 4) какой из рассмотренных сценариев наиболее близко отражает современные тенденции изменения увлажнения?

Данные и методы

Территория исследования ограничивается с севера 55° с.ш., с юга – государственной границей страны, с запада – 30° в.д., с востока – 90° в.д. и представлена суббореальными зональными ландшафтами: широколиственно-лесными, лесостепными, степными, полупустынными, северопустынными.

В работе были использованы архивы данных наблюдений за температурой воздуха и суточными суммами осадков метеостанций за период 1936-2000 гг.: архив ежедневных данных (Архив данных ВНИИГМИ-МЦД), архив срочных данных (Achive of NCDC). Результаты рассчитывались по данным 118-ти метеостанций, находящихся на территории России и сопредельных государств. Изменение увлажнения в XX в. исследовалось при помощи сравнительного анализа вычисленного за периоды 1936–1960, 1961–1990, 1991–2000 гг. КУ Торнтвейта.

При оценке изменения увлажнения в XXI в. использовались: архив среднесуточных температур и суточных сумм осадков, полученных в результате численных экспериментов на модели регионального климата модели (МРК) ГГО (Школьник и др., 2000) за периоды 1991-2000 и 2041-2050 гг. а также архивы данных среднемесячных значений температур воздуха и месячных сумм осадков МОЦАО ECHAM4 (Архив IPCC) и Hadley (Архив IPCC) за периоды 1961-1990 и 2010-2039 гг.

МРК ГГО встроена в глобальную модель общей циркуляции атмосферы ГГО T24L14. Ее горизонтальное разрешение – 50 км. Численный эксперимент выполнен по сценарию эмиссий парниковых газов и аэрозолей B2 МГЭИК (IPCC-2000), дающему умеренный рост содержания парниковых газов в атмосфере в XXI веке.

Модель Hadley центра предсказания и исследования климата (Великобритания) имеет разрешение 2,5° по широте и 3,75° по долготе. Результаты моделирования представлены среднемесячными значениями за базовый период 1961-1990 и три прогнозируемых перио-

да 2010–2039, 2040–2069, 2070–2099 гг. Был рассмотрен сценарий HadCM2GSAX при изменении прироста аэрозолей и CO_2 на 1%.

Модель ECHAM Метеорологического института Планка (Гамбург, Германия) с разрешением $2{,}8^\circ \times 2{,}8^\circ$ предполагает условия прироста CO_2 на 1%. Базовый и прогнозируемые периоды соответствуют модели Hadley. Использовался сценарий ECHAM4GGA1. Для корректного сравнения результатов по наблюденным и модельным данным значения температуры воздуха и атмосферных осадков выбирались в узлах модельной сетки с координатами, наиболее приближенными к географическим координатам используемых метеостанций.

Испаряемость рассчитывалась по формуле (Thornthwaite, 1931):

$$E_{OTортвейт} = 1{,}6(10T/I)^a \qquad (1)$$

где $E_{OTортвейт}$ – испаряемость, см·мес$^{-1}$;

T – средняя месячная температура воздуха, °С;

$a = f(I)$, где I – тепловой индекс с поправкой на широту.

В расчет годовой испаряемости берутся только месяцы с положительной средней месячной температурой воздуха. Метод К. Торнтвейта отражает зональные изменения средних многолетних значений испаряемости на территории юга Русской равнины и показывает хорошую согласованность с другими методами определения испаряемости (Черенкова, Шумова, 2007).

Годовые значения КУ получены по формуле (Thornthwaite, 1948):

$$КУ = r_{I\text{-}XII} / E_O, \qquad (2)$$

где $r_{I\text{-}XII}$ – годовая сумма осадков, E_O – суммарная годовая испаряемость (см).

Для пространственного анализа результатов в системе MapInfo были построены электронные карты-схемы. Статистические оценки значимости изменения результатов получены с помощью пакетов SPSS и Statistica. Для этого использовался метод t-test с уровнем значимости 0,05, позволяющий оценить значимость различия средних значений для двух периодов.

Анализ результатов

Анализ динамики КУ, рассчитанного на основе наблюденных данных, свидетельствует, что увеличение увлажнения в период 1961–1990 гг. по сравнению с 1936–1960 гг. доминирует практически на всей рассматриваемой территории. На рис. 1 можно увидеть, что интенсивность изменений растет в направлении от сухостепной и полупустынной зоны к широколиственно-лесной зоне Восточно-Ев-

ропейской равнины. Наибольшее изменение значения КУ (0,11–0,3) приходится на широколиственно-лесную, лесостепную, северную часть степной зоны. Повышение КУ юга Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнины было слабее (изменение значения КУ – 0,01–0,11). Максимальное повышение увлажнения в Западно-Сибирском секторе зафиксировано на юге Омской области (изменение КУ – 0,11). Повышение увлажнения большей части территории было больше разности среднего КУ между соседними зонами. Статистически достоверный рост КУ отмечался в основном в северной части суббореальных ландшафтов.

На севере Алтайского края, на территории Краснодарского края, республики Адыгея и Дагестана отмечались небольшие очаги, где зафиксировано иссушение.

Повышение увлажнения в период 1961–1991 гг. связано с увеличившимися годовыми суммами осадков (в среднем 10–18%) (Золотокрылин, Черенкова, 2006), испаряемость же возросла только на 1–2% . Полученные результаты согласуются с выводами о росте положительных аномалий осадков в отдельных регионах Русской равнины при усилении меридионального обмена (Попова, 2003).

В период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. на всей рассматриваемой территории отмечены небольшие изменения КУ (–0,13...+0,12). Как следует из рис. 2, на исследуемой территории

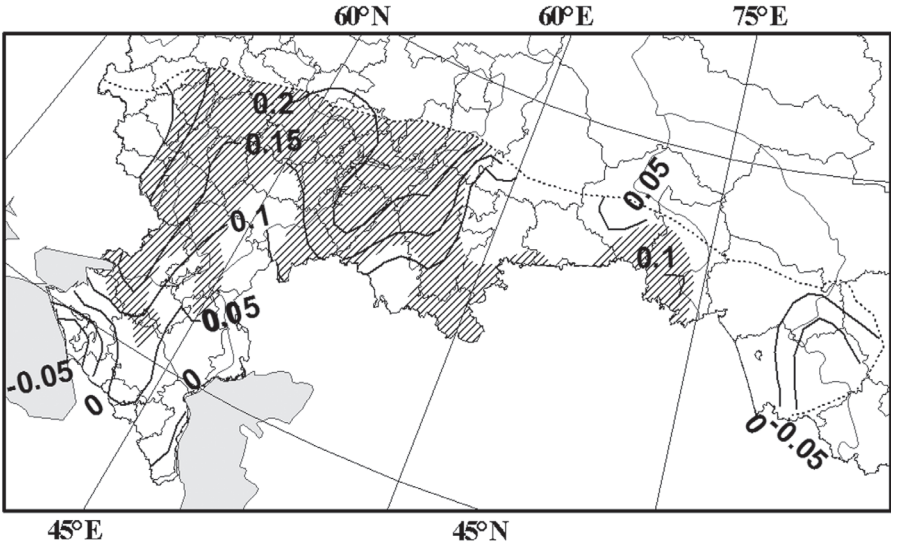


Рис.1. Изменение коэффициента увлажнения Торнтвейта в период 1961–1990 гг. по отношению к периоду 1936–1960 гг. (штриховкой отмечены зоны значимых изменений с вероятностью 0.95, пунктирной линией – северная граница суббореальных равнинных ландшафтов)

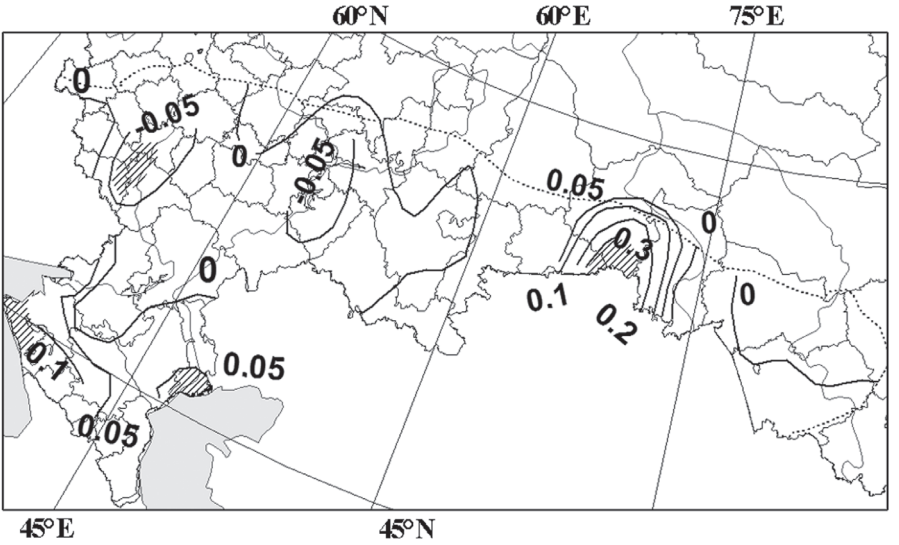


Рис. 2. Изменение коэффициента увлажнения Торнтвейта в период 1991-2000 гг. по отношению к периоду 1961–1990 гг. (штриховкой отмечены зоны значимых изменений с вероятностью 0.95, пунктирной линией – северная граница суббореальных равнинных ландшафтов)

Восточно-Европейского сектора в этот период преобладало слабое иссушение, в котором определяющую роль сыграло уменьшение годовых сумм осадков. Исключение составили Астраханская область, Краснодарский и Ставропольский края, республика Калмыкия и запад Ростовской области, где стало влажнее. Наибольший рост увлажнения отмечен на юге степной зоны, наибольшее иссушение – в лесостепной зоне.

В Западно-Сибирском секторе в период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. стало более влажно, кроме небольших районов на востоке Омской и западе Новосибирской области, юге Алтайского края. Максимальное увлажение отмечено в центре лесостепной зоны Западно-Сибирской равнины.

Эпицентры со значимым ростом увлажнения периода 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. располагаются на черноморском побережье Краснодарского края, на юге Астраханской области и республики Калмыкия, в Омской, Курганской, Тюменской областях.

Проанализируем подробнее динамику КУ Торнтвейта по ландшафтным зонам и выделим области значимых изменений. На территории Восточно-Европейского сектора в период 1961–1990 гг. по сравнению с 1936–1960 гг. во всех зонах среднее значение КУ увеличилось (табл. 1). В широколиственной и лесостепной зоне все изменения были значи-

мыми, за исключением небольших территорий в Пензенской, Саратовской, Оренбургской, Брянской, Орловской, Курской и Белгородской областях. В степной зоне произошедшие изменения являются значимыми для Ростовской, Воронежской, Волгоградской, Саратовской, Оренбургской областей, Ставропольского края. В зоне полупустынь значимые изменения имели место в Калмыкии и на юге Волгоградской области.

Таблица 1.

Среднее значение коэффициента увлажнения Торнтвейта по зонам суббореальных равнинных ландшафтов России за период 1936–2000 гг. (1 – Восточно-Европейский сектор, 2 – Западно-Сибирский сектор). По данным наблюдений («+» – увеличение увлажнения, «–» – уменьшение).

	1936–1960 гг.		1961–1990 гг.		1991–2000 гг.	
Зоны	1	2	1	2	1	2
широколиственно-лесная	0.89	—	1.01 (+)	—	0.99 (–)	—
лесостепная	0.76	0.67	0.92 (+)	0.69 (+)	0.86 (–)	0.86 (+)
степная	0.67	0.47	0.76 (+)	0.53 (+)	0.77 (+)	0.5 (–)
полупустынная	0.48	—	0.53 (+)	—	0.54 (+)	—
пустынная северная	0.24	—	0.28 (+)	—	0.33 (+)	—

В Восточно-Европейском секторе потепление в период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. проявилось в уменьшении КУ в широколиственно-лесной и лесостепной зонах. В остальных зонах зафиксирован рост КУ. В пределах степной зоны изменения режима влажности были противоположными по знаку: на юге и западе зафиксировано иссушение, в остальной части зоны – рост увлажнения. В этот период значимые изменения произошли в лесостепной зоне (запад Воронежской, восток Курской и Белгородской областей), в зоне северных пустынь (юг Астраханской области).

Возрастание КУ в лесостепной и степной зонах в 1961–1990 гг. по сравнению с 1936–1960 гг. свойственно и для территории Западной Сибири. Для лесостепной зоны изменения являются значимыми в Омской, на юге Тюменской и Курганской областей. Значимые изменения в степной зоне произошли на юге Челябинской области.

Разнонаправленные тенденции увлажнения были характерны для Западно-Сибирского сектора в период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.: оно увеличилось в лесостепи и уменьшилось в степи. Внутри лесостепной зоны изменения были неоднородными. Значимым было повышение увлажнения лесостепной зоны (юг Тюменской, восток Курганской области).

Остановимся подробнее на анализе характера изменения КУ. На рис. 3 можно увидеть, что положение изолиний, определяющих максимальное и минимальное пространственное смещение значений КУ, согласуется с границами зональных ландшафтов. В рассмотренные периоды сдвиг изолиний произошел во всех природных зонах. Смещение не было равномерным, оно уменьшалось в направлении от широколиственно-лесной зоны к пустынной северной. В период 1961–1990 гг. и 1991–2000 гг. по сравнению с 1936–1960 гг. на территории Восточно-Европейского сектора максимальное расстояние, на которое переместилась к югу изолиния со значением коэффициента увлажнения, равного «1», составило 500 км и «0,8» – 430 км. Изолинии сместились к югу и востоку на максимальное расстояние: со значением «0,6» – на 200 км и «0,5» – на 130 км, к востоку: «0,35» – на 120 км. Сдвиг изолиний со значениями «0,8», «0,6» и «0,5» на территории Западно-Сибирского сектора составил в среднем 70-90 км.

Изменения КУ в Восточно-Европейском и Западно-Сибирском секторах в период 1961–1990 гг. по сравнению с 1936–1960 гг. были зональными. Увлажнение каждой ландшафтной зоны приблизились к более влажным условиям соседней зоны.

В период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. наметилась тенденция «отката» к прежним условиям увлажнения периода 1936–1960 гг. Исключение составили сухостепные, полупустынные,

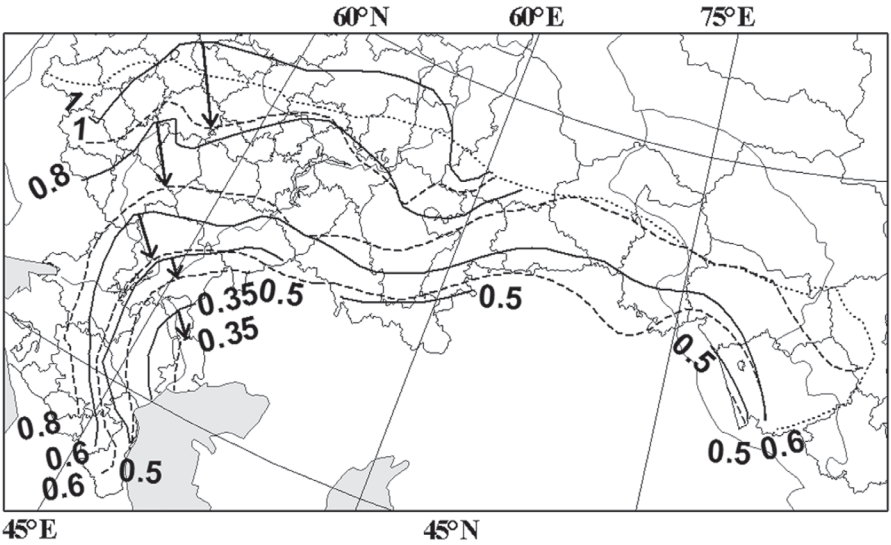


Рис. 3. Максимальное и минимальное положение изолиний коэффициента увлажнения в период 1936–2000 гг. Сплошная линия соответствует коэффициенту увлажнения в 1936–1960 гг., пунктирная линия – в 1961–2000 гг.

пустынные ландшафты Восточно-Европейского сектора, а также лесостепные и степные ландшафты Омской области – процесс увлажнения здесь продолжился, хотя и гораздо менее интенсивно, чем в период 1961–1990 гг. Необходимо отметить, что изменение увлажнения также имело зональный характер.

Перед началом анализа динамики увлажненния суббореальных равнинных ландшафтов России в первой половине XXI в. оценим качество воспроизведения КУ моделями МРК ГГО и МОЦАО. Качество определялось величиной относительной ошибки, вычисленной для базовых периодов моделей: 1991–2000 гг. для МРК ГГО, 1961–1990 гг. для ECHAM и Hadley. Анализ пространственного распределения относительной ошибки показал, что по сравнению с данными наблюдений КУ завышается всеми рассмотренными моделями в предгорных районах Кавказа, Урала и Алтая. Завышенные значения наблюдаются в прибрежных областях Азовского, Черного морей Краснодарского края (МРК ГГО, Hadley), в прибрежных районах Каспийского моря – на территории Калмыкии (МРК ГГО, ECHAM) и на юге Астраханской области (МРК ГГО, Hadley), в Новосибирской, Омской областях (МРК ГГО, ECHAM). Такая ситуация связана с воспроизведением завышенных модельных осадков на обозначенных территориях. Например, на территории предгорий Алтая модельные отклонения в зимний период могут достигать 50-100% по сравнению с данными наблюдений (Школьник и др., 2007). На остальной равнинной части территории исследования величина относительной ошибки не превышает 34% (МРК ГГО), 25% (ECHAM), 17% (Hadley). На территории Центрально-Черноземного района модели демонстрируют заниженный КУ с относительной ошибкой до 14% (МРК ГГО), 32% (ECHAM), 21% (Hadley).

Рассмотренные модели в целом удовлетворительно воспроизводят коэффициент увлажнения на равнинных территориях, завышая его в предгорных территориях и вблизи морей. Для более корректного сравнительного анализа изменений увлажнения решено было оценивать разность КУ, рассчитанного по данным моделей: МРК ГГО для периодов 1991–2000 гг. и 2041–2050 гг., ECHAM и Hadley для периодов 1961–1990 гг. и 2010–2039 гг.

Анализ динамики коэффициента увлажнения, рассчитанный для всех трех рассмотренных моделей, показал различные тенденции изменения увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в первой половине XXI века. Современным тенденциям изменения увлажнения (Сиротенко и др., 2007), а также динамике коэффициента увлажнения Торнтвейта периода 1936–2000 гг. более всего соответствуют сценарии, данные МРК ГГО и Hadley. В этих сценариях достаточно много общего, несмотря на то, что расчет Hadley касается периода 2010–2039 гг., а МРК ГГО – 2041–2050 гг.

Как видно из табл. 2, в период 2041–2050 гг. согласно результатам численного эксперимента на МРК ГГО, для Восточно-Европейского сектора следует ожидать повышение увлажнения широколиственно-лесной, лесостепной и полупустынной зон и понижение увлажнения степной и пустынной зон. В Западно-Сибирском секторе ожидается иссушение лесостепной зоны и увеличение увлажнения степной зоны.

Таблица 2. Изменение коэффициента увлажнения Торнтвейта в зонах суббореальных равнинных ландшафтов России (1 – Восточно-Европейский сектор, 2 – Западно-Сибирский сектор). По результатам численного эксперимента МРК ГГО («+» – увеличение увлажнения, «–» – уменьшение).

	1991-2000 гг.		2041-2050 гг.	
Зоны	1	2	1	2
широколиственно-лесная	1.10	—	1.19 (+)	—
лесостепная	0.94	0.95	1.01 (+)	0.87 (-)
степная	1.13	0.74	1.1 (-)	0.78 (+)
полупустынная	1.21	—	1.22 (+)	—
пустынная северная	1.02	—	0.97 (-)	—

На рис. 4 а) показано изменение увлажнения в 2010-2039 гг., относительно базового периода, по данным МОЦАО ECHAM: иссушение во всех ландшафтных зонах территории исследования.

Из рис. 4 б) и в) следует, что на территории Восточно-Европейской равнины ожидается: в широколиственно-лесной зоне – повышение увлажнения в восточной части и снижение в западной части зоны (МРК ГГО, Hadley). В восточной части лесостепной зоны ожидается увеличение увлажнения. Относительно западной части зоны обе модели не дают однозначного прогноза: возможно как увеличение увлажнения (МРК ГГО), так и понижение (Hadley). В степной зоне ожидается: рост увлажнения ее северной части и уменьшение ее южной части (МРК ГГО), уменьшение увлажнения на западе и увеличение в остальной части зоны (Hadley). Согласно сценарию Hadley полупустыня и северная пустыня станут влажнее. Но по сценарию МРК ГГО ожидается уменьшение увлажнения полупустыни и северной пустыни.

Сценарии МРК ГГО и Hadley для Западно-Сибирского сектора дают повышение увлажнения западной части лесостепной и степной зон и понижение увлажнения восточной части.

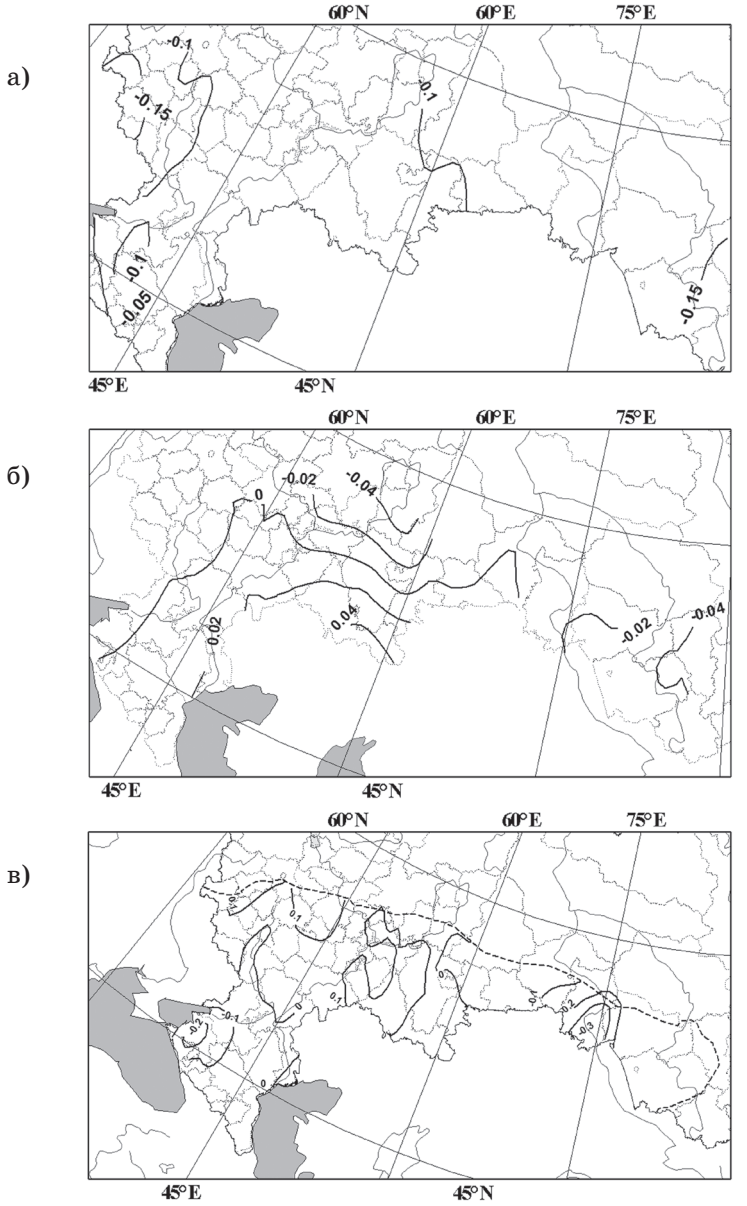


Рис. 4. Изменение коэффициента увлажнения Тортвейта: а) в период 2010-2039 гг. по отношению к периоду 1961-1990 гг. по данным МОЦАО ЕСНАМ, б) в период 2010-2039 гг. по отношению к 1961–1990 гг. по данным МОЦАО Hadley, в) в период 2041-2050 гг. по отношению к 1991–2000 гг. по данным МРК ГГО.

Заключение

Проведенный анализ изменения увлажнения на рассматриваемой территории в XX в. и первой половине XXI в. позволяет сделать следующие выводы.

Период 1961-1990 гг. по отношению к 1936-1960 гг. характеризуется увеличением увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России. В Восточно-Европейском секторе наибольшим было увлажнение широколиственно-лесной, лесостепной и северной части степной зон. Изменение увлажнения Западно-Сибирского сектора было менее интенсивным, чем Восточно-Европейского. Максимальное увлажнение в Западной Сибири зафиксировано в центре лесостепной зоны. На севере Алтайского края, на территории Краснодарского края, республики Адыгея и Дагестана отмечались небольшие очаги иссушения.

Разнонаправленные тенденции изменения увлажнения в период 1991–2000 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. проявились в суббореальных ландшафтах России. Иссушение наблюдалось в широколиственно-лесной и лесостепной зонах, а повышение увлажнения было отмечено в степной, полупустынной и пустынной зонах Восточно-Европейского сектора. В пределах степной зоны изменения увлажнения были разнонаправленными. Увлажнение юга степной зоны возросло в наибольшей степени, в то время как уменьшалось увлажнение лесостепной зоны.

На территории Западной Сибири наблюдалось повышение увлажнения лесостепной и иссушение степной зоны. Внутри лесостепной зоны изменения были разнонаправленными.

Анализ результатов численных экспериментов предполагает различную направленность изменений увлажнения в первой половине XXI в. В широколиственной и лесостепной зоне Восточно-Европейского сектора согласно сценарию МРК ГГО ожидается увеличение увлажнения в 2041–2050 гг., тогда как по сценариям ECHAM и Hadley, – уменьшение в 2010–2039 гг. В степной зоне – иссушение в рассмотренные периоды XXI в. показывают все модели. Повышение увлажнения полупустынной зоны ожидается по сценариям МРК ГГО в период 2041–2050 гг. и МОЦАО Hadley в 2010–2039 гг., а иссушение в 2010–2039 гг. – по сценарию модели ECHAM. Уменьшение увлажнения северопустынной зоны ожидается по сценарию моделей МРК ГГО и ECHAM, а увеличение увлажнения северной пустыни – по модели Hadley. В Западно-Сибирском секторе рост увлажнения ожидается только в степной зоне (МРК ГГО и Hadley).

Сценарии МРК ГГО и Hadley наиболее близко отражают современные тенденции изменения увлажнения. Согласно этим сценариям изменения увлажнения в соседних ландшафтных зонах могут быть

противоположными, структура этих изменений в пределах зоны будет неоднородна.

В процессе анализа выявлено, что произошедшие за период 1936–2000 гг. изменения увлажнения были зональными и затронули все зоны суббореальных равнинных ландшафтов. Несмотря на относительно небольшой временной интервал исследования, можно сказать, что изменения увлажнения на выбранной территории носят колебательный характер. Эти изменения были неустойчивыми во времени и пространстве (хотя и значимыми), но кратковременными и обратимыми, поэтому не привели к необратимому смещению границ ландшафтных зон с использованием коэффициента увлажнения Торнтвейта. Прогнозируемые в первой половине XXI века значения изменения коэффициента увлажнения имеют такой же порядок, как и в XX веке. Это позволяет предположить, что ожидаемые локальные изменения не приведут к перестройке границ зональных ландшафтов.

Исследование увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в XXI веке проводилось на основе данных прогнозных физико-математических моделей, поэтому точность приведенных в данной статье результатов зависит от качества воспроизведения колебаний климата рассмотренными моделями (корректности поведения рассмотренных моделей на будущих периодах).

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ-07-05-00593).

Авторы выражают благодарность Золотокрылину А. Н. за помощь в подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Архив данных ВНИИГМИ-МЦД (Обнинск) (http://www.meteo.ru).

Архив центра распределения модельных данных IPCC (http://www.ipcc-data.org).

Будаговский А. И. 1964. Испарение почвенной влаги. М.: Наука. 242 С.

Будыко М. И. 1956. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоиздат. 256 с.

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.

Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А. 2006. Изменение индикаторов соотношения тепла и влаги, биопродуктивности в зональных равнинных ландшафтах России во второй половине XX в. Изв. РАН. сер. геогр. № 3. С. 19-28.

Иванов Н. Н. 1954. Об определении величин испаряемости. Изв. Всесоюзного географического общества. Т. 86. № 2. С. 189-196.

Изменение климата России. ИГКЭ Росгидромета и РАН. 2006. http://www.climatechange.su

Коломыц Э. Г. 2004. Ландшафтно-зональные системы Волжского бассейна в условиях предполагаемого глобального потепления. Изв. РАН. Сер. геогр. № 3. С. 92-105.

Коломыц Э. Г. 2006. Прогноз влияния глобальных изменений климата на зональные экосистемы Волжского бассейна. Экология. № 6, С. 429-439.

Константинов А. Р. 1968. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоиздат. 532 С.

Мезенцев В. С. 1962. К методике расчета суммарного испарения и характеристик увлажнения за внутригодовые периоды. Труды Омского сельскохозяйственного института (ОмСХИ). Т. XXVI. С. 35-54.

Ольдекоп Э. М. 1911. Об испарении с поверхности речных бассейнов. Сб. трудов, исполненных студентами при Метеорологической обсерватории Юрьевского университета. Юрьев. Т. 4. 209 с.

Попова В. В. 2003. Современные изменения климата и их региональные особенности на территории России. В кн.: Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия. – М.: Наука. С. 194-218.

Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития Российской Федерации. 2005. М.: Росгидромет. 178 С.

Сиротенко О. Д., Грингоф И. Г. 2006. Оценки влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации. Метеорология и гидрология. № 8. С. 92-101.

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.

Тюрк Л. 1958. Баланс почвенной влаги. Л.: Гидрометеоиздат. 228 С.

Хромов С. П., Мамонтова Л. И. 1974. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат. 568 С.

Черенкова Е. А., Шумова Н. А. 2007. Испаряемость в количественных показателях климата. Аридные экосистемы. Т. 13, № 33-34, С. 57-69.

Школьник И. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В. 2000. Региональная гидродинамическая модель атмосферы для исследования климата на территории России. Метеорология и гидрология. № 4. С. 32-49.

Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М. 2007. Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири. Метеорология и гидрология. № 6. С. 5-18.

Шумова Н. А. Прогноз воздействия возможных изменений климата на гидротермические условия и урожай сельскохозяйственных культур лесостепной и степной зон. 2005. В сб.: Оценка влияния изменения режима вод суши на наземные экосистемы. М.: Наука. С. 71-107.

Achive of National Climatic Data Center, NOAA-9290, NOAA-9813c, http://www.ncdc.noaa.gov

CCD: United Nations Convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and desertification, particulary in Africa. Geneva. 1994.

Holdridge L. R. 1959.Simple Method for determining Potential Evapotranspiration from Temperature Data. Science. V. 130. P. 572.

IPCC-2000: Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change./Nakicenovic N.et al. (eds.). – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2000, 599 P.

Monteith J. L. 1985. Evaporation from land surface: progress in analysis and prediction since 1948. Advances in Evapotranspiration. Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration, Chicago, Ill. ASAE. Michigan: St. Joseph, P. 4-12.

Penman H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc.Roy.Soc. London: A193, P. 120-146.

Thornthwaite C. W. 1931. The climates of North America. Geograph. Rev. V. 21. № 3, P. 633-655.

Thornthwaite C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rev. V. 38, № 1. P. 55-94.

UNEP. World atlas of desertification. L.: Arnold, 1992.69 P.

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ФАКТОР ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

***А. Н. Золотокрылин*[1)], *Т. Б. Титкова*[2)]**

Россия, 119017 Москва, Старомонетный пер., 29, Институт географии РАН, [1)]zgoldfinch@mtu-net.ru; azolotokrylin1938@yandex.ru; [2)]ttitkova@yandex.ru

Реферат. Сравниваются вклады климатического и антропогенного факторов в восстановление растительности засушливых земель на Европейской территории России (ЕТР) в конце XX века. Поскольку климат вегетационного сезона на данной территории определяется преимущественно положением климатического Полярного фронта, изменения его положения в периоды 1931–1960, 1961–1990 и 1982–2001 гг. интерпретированы с помощью значений меридионального градиента июльских значений температуры и осадков. В качестве индикатора наземной фитомассы использован нормированный разностный вегетационный индекс (NDVI), для которого также было вычислено значение меридионального градиента. Выявлена устойчивость меридионального градиента температуры в XX веке. Однако градиент осадков увеличился в период 1961–2001 гг., что свидетельствует об изменении структуры поля осадков.

Межгодовая изменчивость растительности прослежена по NDVI-данным за период 1982–2001 гг. Вначале восстановление растительности было вызвано группировкой влажных лет в 1980-х годах в условиях сильной антропогенной нагрузки на пастбища. Затем оно было поддержано резким падением антропогенной нагрузки в результате социально-экономических перемен в стране. Восстановление происходило не одновременно, а с некоторым сдвигом во времени. Оно проявилось в Среднем Заволжье и Южном Предуралье в начале 1980-х годов и позднее в Северо-Западном Прикаспии. Уменьшение градиента осадков в Среднем Заволжье и Южном Предуралье в декаду 1992–2001 гг. по сравнению с декадой 1982–1991 гг. вызвало соответствующее уменьшение осадков и NDVI. Напротив, увеличение градиента осадков и NDVI в Северо-Западном Прикаспии проявилось в декаду 1992–2001 гг.

Ключевые слова. Засушливые земли, осадки, NDVI, меридиональный градиент, восстановление растительности, Европейская территория России.

CLIMATIC FACTOR OF VEGETATION DYNAMICS IN DRY LANDS OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

A. N. Zolotokrylin[1)], *T. B. Titkova*[2)]

Institute of Geography RAS, 29, Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia, [1)]zgoldfinch@mtu-net.ru; azolotokrylin1938@yandex.ru; [2)]ttitkova@yandex.ru

Abstract. Contribution of climatic factors vs. anthropogenic ones to the process of restoring the vegetation in dry lands of the European part of Russia at the end of 20th century is discussed. Because the Climatic Polar front determines climate of the vegetation season of the area, changes in its location in 1931–1960, 1961–1990 and 1982–2001 were interpreted through magnitude of meridian gradients of July temperature and precipitation. Terrestrial phytomass was quantified with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and the meridian gradient for the index has also been calculated. Temperature meridian gradient was stable over the 20th century, while precipitation meridian gradient was increasing in 1961–2001 that indicates changes in precipitation field. The analysis of 1982–2001 NDVI-data yielded the following conclusions on the interannual variations of vegetation. Initially restoring the vegetation was launched in 1980s as a result of consecutive humid years under strong anthropogenic load on pastures. After this period the process was maintained due to substantial decrease in anthropogenic load on pastures caused by social-economic changes in the country. Restoring the vegetation lagged behind its drivers. It began in the Middle Trans-Volga and in the South Cis-Ural in the early 1980s, and later on in the north-western part of the Caspian Lowland. A decrease in precipitation gradient in the Middle Trans-Volga and South Cis-Ural in 1992–2001 vs. 1982–1991 has caused a decline in precipitation and NDVI. On the contrary, an increase in precipitation and NDVI gradients in north-west part of the Caspian Lowland came up in 1992–2001 only.

Keywords. Dry lands, precipitation, NDVI, meridian gradient, restoring of vegetation, European part of Russia.

Введение

Засушливые земли классифицируются в соответствии с географическим распределением индекса влажности, который вычисляется как отношение годовой суммы осадков к годовой потенциальной эвапотранспирации. Если потенциальная эвапотранспирация определяется по методу Торнтвейта (Thornthwaite, 1948), то значения индекса влажности в диапазонах 0,05-0,20, 0,20-0,50, 0,50-0,65 характеризуют соответственно аридные (пустынные), семиаридные (полупус-

тынные) и сухие субгумидные (сухостепные) земли (UNEP, 1992). По этой классификации только небольшая часть засушливых земель находится в пределах юго-востока Европейской России. Это сухостепные и полупустынные земли, которые используются в основном как пастбища.

В начале 1990-х годов проявился феномен восстановления растительного покрова сухих степей и полупустынь Европейской России. Он наблюдался как на пастбищах (Неронов, 1998; Виноградов и др., 1999; Шилова и др., 2001), так и на заповедных участках (Новикова и др., 2004; Вомперский и др., 2006). Среди экологов сформировались две точки зрения, объясняющие этот феномен. Первая утверждала, что естественная восстановительная динамика растительности началась в результате резкого и широкомасштабного сокращения пастбищных нагрузок в результате социально-экономических перемен в стране в начале 1990-х годов (Неронов, 1998). Согласно второй точке зрения причиной восстановления растительности стало как уменьшение пастбищных нагрузок, так и циклическое ослабление засушливости климата (Виноградов и др., 1999; Опарин, 2007). В настоящее время появляются свидетельства, что восстановление растительности, например в Северо-Западном Прикаспии, было вызвано вначале кратковременным ослаблением засушливости, а затем поддержано резким сокращением перевыпаса (Золотокрылин, Виноградова, 2007).

Широкомасштабное восстановление растительности засушливых земель в конце XX в. подтверждается наблюдениями за вегетационным индексом (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), который является наиболее обоснованным индикатором динамики зеленой фитомассы (Золотокрылин, 2003). Рост NDVI был зафиксирован в конце 1980-х – начале 1990-х годов, т.е. ранее резкого падения численности выпасаемых животных (Золотокрылин, Виноградова, 2007).

Целью данной статьи является обоснование значения климатического фактора в восстановлении растительности засушливых земель Европейской России. Принимая во внимание накопленные сведения о колебаниях климата в регионе исследования, предлагается дополнительно рассмотреть горизонтальный градиент показателей климата в заданные периоды. Выбор данного подхода подкрепляется тем, что положение климатологического Полярного фронта (по С. П. Хромову) в период вегетации в данном регионе вызывает усиление градиента температуры и осадков. Градиент достигает максимальных значений в степной и полупустынных зонах, определяя, таким образом, зональную контрастность растительного покрова (Золотокрылин, Титкова, 2004). Изменение градиента показателей климата в конце XX в. может быть еще одним независимым доводом в пользу

значимой роли климатического фактора, наряду с антропогенным, в восстановлении растительности.

Как известно Полярный фронт в холодный период в среднем своем положении располагается вне территории России, южнее 40°с.ш. над бассейном Средиземного моря, далее над Передней и Центральной Азией. В теплый период года Полярный фронт сильно смещается к северу и его среднее положение в июле – примерно над западным побережьем Черного моря, над степью и лесостепью Восточно-Европейской равнины и лесостепью Западной Сибири (Справочник..., 2005). Даже небольшое смещение положения Полярного фронта в южном направлении может создать на засушливых землях предпосылки для увеличения осадков и усиленного развития степных растительных формаций. Поэтому важно предвидеть направление смещения фронта, сравнивая положения максимального градиента температуры и осадков за интервалы времени климатического масштаба. В этом случае восстановительная динамика растительности может быть отслежена по изменению положения максимального градиента NDVI относительно положения максимального градиента показателей климата.

Таким образом, данное исследование ориентировано на объяснение особенностей изменений климата и растительности в регионе в конце XX в., принимая во внимание новую информацию о максимальном градиенте показателей климата и растительного покрова.

Методы и материалы

Вычисление и географический анализ градиента показателей климата для объяснения изменения градиента растительного покрова лежит в основе метода исследования. Под градиентом температуры (осадков) понимается вектор, характеризующий увеличение температуры (осадков) на единицу расстояния по нормали к изотерме (изогиете). На примере схемы на рис.1 показано как вычислялась широтная (G_x) и меридиональная (G_y) проекции вектора по формулам:

$$G_x=(f2-f1)+(f4-f3)/2\Delta x$$

$$G_y=(f1-f3)+(f2-f4)/2\Delta y,$$

где f1, f2, f3, f4 – значения температуры (осадков) в узлах одноградусной сетки, а Δx и Δy соответственно 1° меридиана и параллели.

Тогда формула градиента G температуры (осадков) имеет вид:

$$|G|=\sqrt{G_x^2+G_y^2}$$

Градиент температуры и осадков вычислялся для среднемноголетних условий середины вегетационного сезона – июля. Для этого использовались среднемесячные значения температуры и месячные

суммы осадков за период 1931-2001 гг., вычисленные по данным метеосети с суточным шагом (http://wdc.meteo.ru). Данные метеостанций были интерполированы в узлы одноградусной сетки. Затем по интерполированным данным многолетних значений вычислялся месячный градиент температуры и осадков.

По данным метеосети был вычислен июльский градиент температуры и осадков на Восточно-Европейской равнине за периоды 1931–1960, 1961–1990, 1982–2001 гг. и построены карты. Карты показывают географическое распределение числового значения градиента полей, а также меридиональную и широтную его проекции. Выбор периода 1982–2001 гг. обусловлен возможностью сравнения градиентов климата с градиентом NDVI.

Ассимилирующая (зеленая) фитомасса является наиболее приемлемым показателем растительности засушливых земель. Фитомасса в отличие от других показателей преимущественно оценивается с помощью дистанционных измерений, так как она тесно связана с NDVI. В нашем исследовании в качестве индикатора зеленой фитомассы применялся месячный (июльский) NDVI. с разрешением $1^{\circ}\times1^{\circ}$ за период 1982–2001 гг. Массив NDVI был составлен по исходным данным, подготовленным в Годдардовском аэрокосмическом центре США (Pathfinder ...).

Градиент NDVI вычислялся по схеме градиентов климатических показателей.

Дополнительно были построены карты изменения градиента температуры, осадков и NDVI в период 1992–2001 гг. по сравнению с периодом 1982–1991 гг.

Результаты

Хорошо выраженное на территории изменение климата в зависимости от широты определяет доминирование меридионального градиента его показателей, а также растительности. Поэтому ниже основное внимание уделено анализу связи меридионального градиента с положением климатологического Полярного фронта.

Меридиональный градиент июльской температуры отрицателен на Восточно-Европейской равнине (рис. 2а). На большей части равнины градиент колеблется в пределах 0,4–0,6°С/мес. • град. со стандартным отклонением 0,1–0,2°С/мес. • град. Полярный фронт выделяется изолинией повышенного градиента, меняющегося в пределах 0,8–1,3°С/мес. • град. Изолинией максимального градиента более 1,2°С/мес. • град. выделяются преимущественно степные и полупустынные экосистемы.

Меридиональный градиент июльских осадков положителен на южной половине Восточно-Европейской равнины и отрицателен на северной (рис. 2б). Смена знака градиента происходит примерно на 400–500 км севернее Полярного фронта. На равнине абсолютные зна-

чения меридионального градиента осадков колеблются от 0 до 10 мм/мес.град со стандартным отклонением не более 5 мм/мес. • град. Рост градиента осадков (более 4 мм/мес.·град.) отмечается в полосе по обе стороны от Полярного фронта. Изолиния максимального градиента осадков (более 8 мм/мес.·град.) охватывает лесостепь, степь и полупустыню на юге-востоке Восточно-Европейской равнины.

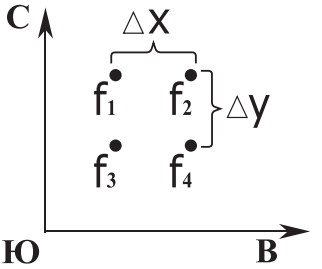


Рис. 1. Схема расчета широтной (G_x) и меридиональной (G_y) проекции вектора

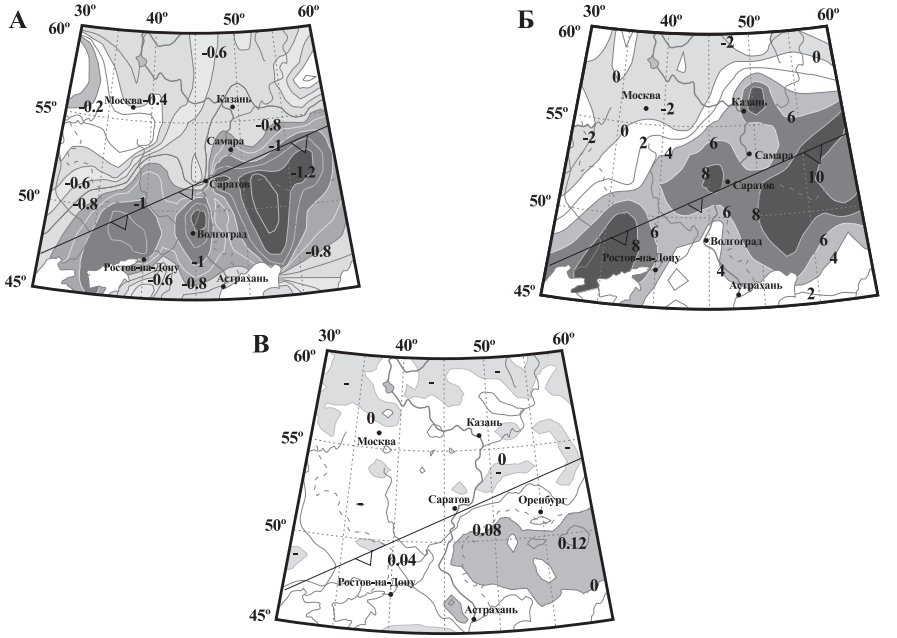


Рис. 2. Меридиональный градиент (Gy) на Восточно-Европейской равнине в июле: а) температуры за 1931–2001 гг. б) осадков за 1931–2001 гг. в) NDVI за 1982–2001 гг.

– положение климатологического полярного фронта в июле

Изолиния повышенного градиента температуры несколько смещена к югу по отношению к Полярному фронту, а аналогичная изолиния градиента осадков более равномерно расположена по обе стороны фронта.

Меридиональный градиент NDVI положителен на южной половине Восточно-Европейской равнины (рис. 2в). Севернее 57– 59°с.ш. он становятся отрицательным. Изолиния повышенного градиента (более 0,04 относ.ед/мес. • град.) смещена к югу относительно Полярного фронта. Она отделяет сухостепные экосистемы от настоящих степных. Изолиния максимальных значений градиента NDVI (более 0,08 относ.ед/мес. • град.; стандартное отклонение не выше 0,04 относ.ед/мес.·град.) локализуется в полупустыне и отчасти в сухой степи.

Выявленное повышение градиента показателей климата и растительности вблизи Полярного фронта не является однородным. Кроме того, замкнутые изолинии максимальных значений градиента локализуются в основном на юго-востоке Восточно-Европейской равнины.

Представляет интерес сравнение распределения на территории широтного градиента показателей климата и NDVI с меридиональным. По направлению с запада на восток вдоль Полярного фронта широтный градиент температуры положителен (температура повышается), а соответствующий градиент осадков отрицателен (осадки снижаются). Восточнее 53–55° в.д., происходит смена знаков градиента температуры и осадков: температура понижается, а осадки возрастают в Южном Предуралье и над Южным Уралом. Характерно, что на этих же долготах также прослеживается узкая меридиональная полоса повышенного широтного градиента NDVI с максимальными значениями в степном и лесостепном Предуралье.

Таким образом, повышение меридионального градиента температуры и осадков за июль 1931–2001 гг. на южной половине Восточно-Европейской равнины объясняется положением климатологического Полярного фронта. Максимальный градиент локализуется в юго-восточной полупустынной, степной и отчасти лесостепной части равнины. Он является климатической предпосылкой усиления контрастности растительного покрова засушливых земель.

Рассмотрим обусловленное Полярным фронтом климатическое изменение меридионального градиента температуры и осадков в сравниваемые периоды 1931–1960, 1961–1990 и 1982–2001 гг. Положение изолиний повышенного и максимального градиента температуры мало менялось на протяжении всего периода. Значимых изменений градиента не отмечалось. Долготная граница смены знака широтного градиента температуры в Предуралье оставалась стабильной за это время. Также можно констатировать, что глобальное потепление не проявилось в поле июльского градиента температуры вблизи Полярного фронта.

Напротив, положение изолинии повышенного градиента осадков менялось от периода к периоду. Особенно сильное изменение имело место на территории между долготами 38 и 44°в.д. в период 1931–1960 гг. Положение изолинии градиента осадков также было неустойчивым, особенно в периоды 1961–1990 и 1982–2001 гг. Градиент осадков усилился в периоды 1961–1990 и 1982–2001 гг. Нестабильной оказалась граница между положительным и отрицательным градиентом осадков, которая в центральной части Восточно-Европейской равнины в периоды 1961–1990 и 1982–2001 гг. стала проходить южнее, чем в период 1931–1960 гг. После 1961 г. смена знака широтного градиента осадков была примерно на 400 км восточнее, чем в период 1931–1960 гг.

Таким образом, положение изолинии повышенного меридионального градиента температуры вдоль Полярного фронта, а также максимального градиента было устойчивым на протяжении всего периода. Широтный градиент температуры менялся мало. В то же время положение изолиний повышенного и максимального градиента осадков было неустойчивым от периода к периоду с ростом градиента в конце XX в.

Важно рассмотреть климатическое изменение меридионального градиента осадков и NDVI на засушливых землях Европейской России в период ускорения глобального потепления, а именно в декады 1982–1991 и 1992–2001 гг. (рис.3). Как видно из рис. 3а, в декаду 1982–1991 гг. на территории восточнее Волги изолиния максимального градиента осадков проходила по обе стороны Полярного фронта. Максимальный градиент отмечался в лесостепи, степи и полупустыне Заволжья. На засушливых землях южнее градиент был значительно ниже. Данное положение градиента соответствовало росту осадков в Среднем Заволжье и снижению в Нижнем Поволжье.

В декаду 1992–2001 гг. ареал максимального градиента осадков перестал существовать как единое целое, что можно объяснить разбросом траекторий циклонов (рис. 3б). Самый большой ареал максимального градиента осадков расположился в восточной части Полярного фронта, а его изолиния пересекала Полярный фронт почти перпендикулярно. Меридиональный градиент осадков вблизи Полярного фронта в Среднем Заволжье уменьшился по сравнению с декадой 1982–1991 гг., но одновременно он возрос в Северо-Западном Прикаспии. Соответственно осадки уменьшились в Среднем Заволжье и возросли в Северо-Западном Прикаспии.

Изменения градиента NDVI рассмотрены на примере сравнения двух декад 1982–1991 и 1992–2001 гг. (рис. 3в, г). Положение изолинии максимального градиента NDVI в декаду 1992–2001 гг. соответствовало изменению максимального градиента осадков. Ха-

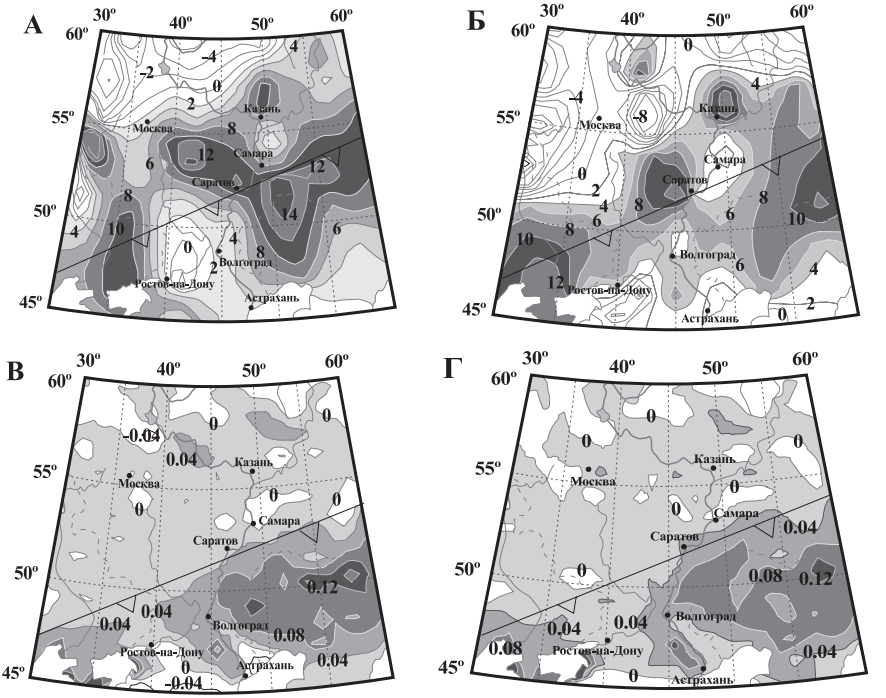


Рис. 3. Меридиональный градиент (G_y) на Восточно-Европейской равнине в июле: а) осадков за 1982–1991 гг. б) осадков за 1992–2001 гг. в) NDVI за 1982–1991 гг. г) NDVI за 1992–2001 гг.
условные обозначения – см. рис. 2

рактерно, что градиент NDVI почти не изменился в пределах российских засушливых земель Среднего Заволжья и Южного Предуралья во вторую декаду по сравнению с первой (рис. 3г). В то же время усиление градиента NDVI, как и градиента осадков отмечалось в Северо-Западном Прикаспии: на территории Калмыкии и Волгоградской области. Данное междекадное изменение градиента осадков и NDVI указывает на то, что восстановление растительности (повышение NDVI) засушливых земель Европейской России происходило не одновременно, а с некоторым сдвигом во времени. Вначале оно проявилось в Среднем Заволжье и Южном Предуралье в декаду 1982–1991 гг. и позднее Северо-Западном Прикаспии. Это хорошо видно на рис. 4, который показывает междекадное изменение NDVI. В южной части Саратовской и юго-восточной части Оренбургской областей NDVI снизился или оставался неизменным, а в Северо-Западном Прикаспии и на части Ставропольского края и Ростовской области, наоборот, повысился во вторую декаду по сравнению с первой.

Таким образом, ослабление градиента осадков в Среднем Заволжье и Южном Предуралье в декаду 1992–2001 гг. по сравнению с декадой 1982–1991 гг. вызвало соответствующее уменьшение осадков и NDVI. Напротив, повышение градиента осадков и NDVI в Северо-Западном Прикаспии проявилось в декаду 1992-2001 гг.

Дискуссия

Прежде чем перейти к обсуждению особенностей атмосферного увлажнения засушливых земель Европейской России в декады 1982–1991 и 1992–2001 гг. в связи с изменением меридиональных градиентов осадков и NDVI, отметим выявленную в работе (Сиротенко и др., 2007) положительную тенденцию сезонных осадков на этих землях за период 1975–2004 гг. На фоне такой тенденции прослеживается сильная неоднородность межгодового хода годовых и сезонных сумм осадков на этой территории. Речь идет о редких и кратковременных группировках влажных лет, которые могут вызвать восстановление растительности даже в условиях сильного антропогенного воздействия. Такая группировка влажных лет проявилась в разное время в разных районах в 1980-х и в начале 1990-х гг. (Титкова, 2003; Сотнева, 2004; Сажин и др., 2006; Золотокрылин, Титкова, 2006). Ее продолжительность не превышала 5-7 лет, но оказалось достаточной, чтобы запустить многолетний процесс восстановления полупустынной и сухостепной растительности. Проведенный выше анализ градиента осадков дает дополнительную информацию, которая проясняет выявленные разными авторами проявления группировки влажных лет на исследуемой территории.

Например, в степном Заволжье и Предуралье сезон активной вегетации в декаду 1982–1991 гг. был влажнее, чем в декаду 1992–2001 гг. (Золотокрылин, Титкова, 2006). Этот результат согласуется с меридиональным градиентом осадков и июльского NDVI на исследуемой территории в сравниваемые декады (рис.3). Восстановление растительности началось в начале 1980-х годов (Опарин, 2007), что подтверждается повышением NDVI в декаду 1982–1991 гг. (рис.4).

Другая картина изменения атмосферного увлажнения наблюдалась в степной части Волгоградской области (Сажин и др., 2006). Начало и середина 1980-х годов характеризовались годовыми осадками ниже нормы. Однако в конце 1980-х., начале 1990-х годов последовала серия из семи лет подряд (1987-1993 гг.) с резко возросшими годовыми суммами осадков и оптимальным увлажнением вегетационного периода. После 1993 года отмечалось несколько влажных лет, которые поддержали начавшийся ранее процесс восстановления растительного покрова. В итоге NDVI был выше в декаду 1992–2001 гг. по сравнению с декадой 1982–1991 гг. (рис.4).

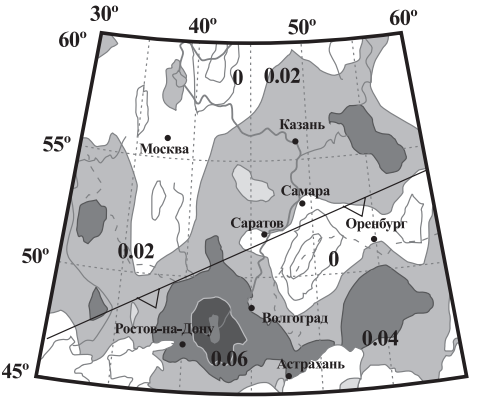


Рис. 4. Изменение средних июльских значений NDVI в период 1992–2001гг. по сравнению с периодом 1982–1991гг.

В то же время в полупустынной части Волгоградской области обе декады характеризовались как влажные (Сотнева, 2004). В 1980-х годах летом возросла повторяемость сильных осадков (более 10 мм/сутки), которая сохранялась на прежнем уровне и в 1990-х годах. Восстановление растительного покрова началось в начале-середине 1980-х годов (Опарин, 2007). Увеличение осадков в середине лета в этом районе в 1990-х годах согласуется с увеличением градиента осадков (рис. 3б), а также ростом NDVI (рис.4) за это время.

Следующие черты межгодового хода весенне-летних осадков наблюдались в Северо-Западном Прикаспии (район Черных Земель). Здесь осадки выше нормы отмечались в начале 1980-х годов. Затем они были ниже нормы. Осадки вновь стали выше нормы в период с 1989 по 1992 г. Это повышение осадков вызвало восстановление растительного покрова, которое позднее было поддержано резким ослаблением пастбищной нагрузки. В декаду 1992–2001 гг. наблюдалось три влажных года, которые проявились в увеличении градиентов осадков и NDVI (рис. 3б, г), а также в повышении NDVI (рис.4).

Таким образом, наблюдаемые особенности атмосферного увлажнения в середине вегетационного сезона в разных районах засушливых земель Европейской России в декады 1982-1991 и 1992-2001 гг. соответствуют изменению градиента осадков вследствие динамики Полярного фронта. Градиент NDVI и междекадное изменение NDVI не противоречит изменению градиента осадков. Восстановление растительного покрова вначале было вызвано ослаблением засушливости территории, а затем поддержано снижением антропогенной нагрузки на пастбища.

Заключение

Использование в работе меридионального градиента показателей климата и растительности расширяет возможности интерпретации колебаний климата как фактора динамики растительного покрова. Выявленное усиление меридионального градиента осадков на засушливых землях Европейской России в 1980-х годах отразило отмечаемое многими исследователями группировку влажных лет. Последствием роста меридионального градиента осадков стало увеличение градиента NDVI, и, соответственно, фитомассы.

Реакцией растительности на группировку влажных лет стало развитие процесса восстановления растительности даже в условиях сильной антропогенной нагрузки на пастбища. Вскоре восстановление растительности было поддержано резким падением антропогенной нагрузки в результате социально-экономических перемен в стране в начале 1990-х годов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-00593).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Виноградов Б. В., Кулик К. Н., Сорокин А. Д., Федотов П. Б. 1999. Изодинамическое картографирование и долговременный мониторинг опустынивания и деградации земель с применением нелинейных методов моделирования. Почвоведение. № 4. С. 494-504.

Вомперский С. Э., Добровольский Г. В., Сапанов М. К., Сиземская М. Л., Соколова Т.А. 2006. Рукотворный лесной оазис в полупустыне. Вестник РАН. Т. 76. № 9. С.798-804.

Золотокрылин А. Н. 2003. Климатическое опустынивание. Отв. ред. А. Н. Кренке. М.: Наука. 246 С.

Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. 2004. Природная переходная зона на Прикаспийской низменности. Изв. РАН, сер. геогр. № 2. С. 92-99.

Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. 2006. Изменения климата в области повышенных меридиональных градиентов показателей климата и растительности на юго-востоке Русской равнины. Степи Северной Евразии. Материалы IV Международного симпозиума. Оренбург: ИПК «Газпромпечать» ООО «Оренбурггазпромсервис. С. 274-277.

Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В. 2007. Соотношение между климатическим и антропогенным факторами восстановления растительного покрова юго-востока Европейской России. Аридные экосистемы. Т. 14. № 33-34, С. 20-33.

Климатический архив Международного центра данных Росгидромета в г. Обнинске [http://wdc.meteo.ru].

Неронов В. В. 1998. Антропогенное остепнение пустынных пастбищ северо-западной части Прикаспийской низменности. Успехи соврем. биол. Т. 118, вып. 5. С. 597-612.

Неронов В. В., Чабовский А. В. 2003. Черные земли: полупустыня вновь становится степью. Природа. № 2. С. 72-79.

Новикова Н. М., Волкова Н. А., Хитров Н. Б. 2004. Растительность солонцового комплекса заповедного степного участка в Северном Прикаспии. Аридные экосистемы. Т. 10, № 22-23. С. 9-17.

Опарин М. Л. 2007. Антропогенная трансформация и естественное восстановление биоты сельскохозяйственных ландшафтов Нижнего Поволжья и Закавказья. Автореф. дисс. на соискание ученой степени докт. биол. наук. М. 46 с.

Сажин А. Н., Петров С. А., Погосян Н. В., Васильев Ю. Ф., 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. Изв. РАН. Сер. Геогр. № 1. С. 26-34.

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.

Сотнева Н. И. 2004. Динамика климатических условий второй половины XX в. района Джаныбекского стационара Северного Прикаспия. Изв. РАН. Сер. Геогр. № 5. С. 74-83.

Справочник эколого-климатических характеристик Москвы. 2005. Под ред. д.г.н. А. А. Исаева. М.: географический ф-т МГУ. Т. 2. 410 С.

Титкова Т. Б. 2003. Изменения климата полупустынь Прикаспия и Тургая в XX в. – Изв. РАН. Сер. Геогр. № 1. С. 106-111.

Шилова С. А., Чабовский А. В., Неронов В. В. 2001. Закономерности динамики полупустынных экосистем Калмыкии при снятии антропогенного пресса. Чтения памяти академика В.Н.Сукачева. XIX. Экологические процессы в аридных биогеоценозах. М. С. 9-55.

Pathfinder AVHRR Land One Monthly Composite // URL. http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN DOCS/ FTP SITE.

Thornthwaite C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. V. 38. P. 55-94.

UNEP. World atlas of desertification. L.: Arnold, 1992. 69 P.

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ЧЕТЫРЁХ ЛЕСНЫХ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ В РОССИИ С ПОМОЩЬЮ ЭКОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

М. Д. Корзухин*[1)], *Ю. Л. Цельникер

[1)] Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, mdkorz@comtv.ru

Реферат. Эколого-физиологическая модель была применена для расчета первичной продукции (*NPP*) древостоя в 2460 точках на территории России, стран СНГ и Балтии. Использовались гидрометеорологические данные часового разрешения по температуре и дефициту влажности воздуха, облачности, а также суточная сумма осадков. Производные факторы – влажность и температура почвы, ФАР – были оценены с помощью простых субмоделей. Для четырёх важнейших бореальных видов или групп видов деревьев (береза, лиственница, ель, сосна) найдены пороговые значения NPP^{crit} – там, где значение *NPP* ниже критического, деревья данного вида или же группы видов не произрастают. Модель применена для решения нескольких задач: 1) расчёт потенциальных ареалов видов или групп видов деревьев при текущем климате, т. е. оценка их климатических пределов произрастания; 2) расчёт средних значений *NPP* и оценка их чувствительности к вариациям факторов среды; 3) анализ зависимости *NPP* от широты; 4) расчёт изменения ареалов видов и *NPP* при изменении климата (в качестве примера температура воздуха увеличивалась на 2°C). Получено в целом удовлетворительное согласование расчётных ареалов с фактическими. Показано, что наивысшая продуктивность достигается около 55° с.ш., а также в горных лесах около 40° с.ш. Анализ показывает, что в среднем по ареалу все рассматриваемые породы деревьев испытывают недостаток тепла (температура воздуха), влажности почвы, влажности воздуха и освещённости (ФАР). Влияние температуры почвы, напротив, неоднозначно. Установлено также, что при увеличении температуры воздуха на 2°C южная граница ареалов всех пород сдвинется к северу, а продуктивность в целом по ареалу уменьшится из-за сопутствующего увеличения испарения и сухости воздуха.

Ключевые слова. Береза (*B. pendula* и *B. pubescens*), лиственница (*L. sibirica*), ель (*P. abies* и *P. obovata*), сосна (*P. sylvestris*), чистая первичная продукция (*NPP*), биохимическая модель Фаркуара, модель продуктивности полога, широтное распределение *NPP*, изменение ареалов, изменение *NPP*, вариации температуры.

ANALYSIS OF DISTRIBUTION AND NET PRIMARY PRODUCTION OF THE FOUR FOREST TREE SPECIES IN RUSSIA WITH AN ECOPHYSIOLOGICAL MODEL

M. D. Korzukhin[1)], *Yu. L. Tcelniker*

[1)]Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, mdkorz@comtv.ru

Abstract. An ecophysiological model was employed in the calculation of forest stand *NPP* (net primary production) in 2460 locations over the former Soviet Union. Hourly resolution meteorological data on air temperature, vapor pressure deficit, and cloudiness, and daily precipitation totals were used. Derivative factors, namely, soil moisture, soil temperature, and photosynthetic active radiation (PHAR) were computed with simple sub-models. For the four major tree groups, namely, birch (*B. pendula* and *B. pubescens*), larch (*L. sibirica*), spruce (*P. abies* and *P. obovata*), and pine (*P. sylvestris*) critical values NPP^{crit} were estimated: respective trees can exist only when $NPP > NPP^{crit}$. The model was applied to the following analyses: 1) assessment of potential tree group ranges under current climate; 2) estimation of average *NPP* values and their sensitivity to each of the abovementioned climatic factors; 3) calculation of *NPP* dependence on latitude; 4) assessment of *NPP* and species range variations in response to air temperature rise (2°C warming served as an example). As a whole, calculated tree group ranges were satisfactorily consistent with the observed ones. It was shown that *NPP* reached maximum close to 55°N in plains and close to 40°N in mountains. Sensitivity analysis showed that all the abovementioned tree groups experienced deficit of heat (air temperature), soil moisture, air humidity, and PHAR. Soil temperature effects were not uniform. It was also computed, that 2°C warming may lead to a northward shift of southern boundaries of ranges of the abovementioned tree groups, and to decline in productivity over the whole range due to increasing evaporation and dryness of air.

Key words. Birch (*B. pendula* and *B. pubescens*), larch (*L. sibirica*), spruce (*P. abies* and *P. obovata*), pine (*P. sylvestris*), net primary production, Farquhar biochemical model, canopy production model, warming, *NPP* change, change of range.

Введение

Вопросы, связанные с распространением растительности по Земному шару давно обсуждаются в литературе. В настоящее время такие исследования во всем мире стали более актуальными в связи с возможными изменениями климата, которые могут существенно повли-

ять на состояние растительности. Для территории России, стран СНГ и Балтии характерно широтное размещение растительных зон, в частности разных типов лесов – лесотундры, тайги, широколиственных лесов и лесостепи.

Анализ связи между распространением растительности и климатом был произведен в многочисленных моделях. Простейшие модели имеют статистический характер (Chytrý et al., 2007). Более сложные модели типа CLIMEX, используют разного рода «индексы» для описания действия экологических факторов (Sutherst, 2003; Tchebakova et al., 2006). В частности, в биоклиматических работах, анализирующих зависимость распространения и продуктивности растительности от радиационного баланса и «индекса сухости» на территории бывшего Советского Союза (Варлыгин, Базилевич, 1992; Голубятников, Денисенко, 2007) установлено, что распространение и продуктивность в высоких широтах определяется радиационным балансом, а на юге – сухостью климата.

Однако такого рода работы для анализа воздействия климатических факторов на растительность не используют физиологических механизмов, и, соответственно, ограничены в применимости. Более углубленное изучение воздействия климата на растительность показывает, что это воздействие может быть двояким: с одной стороны, возможность существования видов зависит от их устойчивости к экстремальным факторам среды – морозам, жаре, засухе и переувлажнению. С другой стороны, она зависит от количества доступного ресурса – годичной продуктивности (*NPP* – Net Primary Production), которая является ключевым экологическим «индикатором», суммирующим влияния экологических факторов, и удобна для изучения влияния климата на лесные экосистемы.

В последние 15–20 лет широкое развитие получило моделирование свойств глобальной растительности, основанное на моделях продуктивности, глобального климата и на спутниковых наблюдениях. (Модели постоянно улучшаются; уже в 1999 году специальный номер журнала Global Change Biology был посвящён сравнению семнадцати таких моделей, см. Cramer et al., 1999.) Обзор этой области выходит за рамки нашей работы, нужные для изложения ссылки даются в тексте. Отметим только, что расчёты текущего состояния и его прогноз обычно ведутся для двух типов величин: для *NPP* растительного покрова как целого, и для отдельных растительных зон (напр., «бореальные леса»), меняющих свою площадь. Работы, рассматривающие отдельные виды, сравнительно редки.

Для России её лесной комплекс и продукция лесных экосистем – важные компоненты устойчивого развития в экологическом и экономическом аспектах. Изменения климата, ведущие к неблагоприятным последствиям для лесного комплекса, естественно счи-

тать недопустимыми (Израэль, 2004; Израэль и др., 2007; Working Group II .., 2007). Таким последствием может быть, в том числе, существенное падение *NPP* для экологически и хозяйственно значимых пород (ведущее, возможно, к исчезновению некоторого вида на части ареала).

Для оценки возможных изменений *NPP* и ареалов обитания лесных пород надо иметь адекватную имитационную модель. В основе нашего подхода лежит известная экофизиологическая модель ассимиляции углерода Фаркуара (Farquhar et al., 1980), широко применяющаяся в подобных исследованиях, дополненная блоком, связывающим ассимиляцию листа с ассимиляцией растительного полога (насаждения). В настоящей статье мы:

А. Суммируем описание нашей модели, давая подробное её изложение (что делает её доступной для конструктивной критики и возможного использования).

Б. Применяем модель для решения нескольких задач: расчёта потенциальных аутоэкологических ареалов видов при текущем климате, а также значений *NPP* в пределах ареалов; расчёт изменения *NPP* и ареалов видов при вариации климата (в качестве примера температура воздуха увеличена на 2°C); вычисляем чувствительность *NPP* к вариациям факторов; анализируем широтную зависимость *NPP*.

Настоящая статья посвящена решению этих задач на примере четырёх важнейших лесообразующих пород бореальной зоны – берёзы, лиственницы, ели и сосны.

Объекты

Объектами моделирования были лесные породы: береза поникшая и пушистая (*Betula pendula* и *Betula pubescens*), виды лиственницы (*Larix ssp*), ель (*Picea abies* и *Picea obovata*) и сосна (*Pinus sylvestris*), а также ареалы их распространения на территории России. Эти породы являются преобладающими в составе бореальных лесов, причем три из них – береза, ель и сосна распространены по всей территории лесов Восточной Европы и Сибири, тогда как лиственничные леса имеются только в Сибири. Наиболее обширный ареал занимает береза, которая растет даже в лесостепи, правда, не образуя сплошных массивов, а только в виде отдельных участков, так называемых «колков».

Несмотря на то, что все четыре породы занимают близкие ареалы, что делает их во многом похожими по экологическим свойствам, между ними имеются и заметные различия.

По характеристикам лесоводов, сосна приспособлена и к недостатку влаги, и к переувлажнению, но в Сибири не растет на болотах,

так как её корневая система не выносит низких температур болотных почв (Попов, 1982). В отличие от неё, лиственница более чувствительна к почвенному увлажнению (Поликарпов и др., 1986). Считают, что её приспособленность к суровым условиям Сибири обусловлена листопадностью и холодостойкостью корневой системы (Попов, 1982). Ель более избирательна по отношению к почвенному и атмосферному увлажнению, чем лиственница и сосна. Она не выносит ни сухости, ни переувлажнения почв, обладает мало развитой и поверхностной корневой системой, хуже выносит континентальный климат, хотя и нетребовательна к теплу (Ткаченко, 1952; Ванин, 1960; Коропачинский, 1983). Поэтому ареал её распространения меньше, чем у сосны и лиственницы.

Метод

Биомасса древесных растений формируется двумя основными процессами – компонентами цикла углерода: поглощением CO_2 в ходе фотосинтеза и его выделением при дыхании растений. Количество запасённого при этом за год (вегетационный сезон) древостоем углерода находится из фундаментального уравнения баланса

$$NPP = GPP - R_{\Sigma},$$

где GPP (Gross Primary Production или чистая продукция) – количество поглощённого деревьями углерода; NPP – количество накопленного углерода; R_{Σ} – затраты на дыхание (количество освобождённого углерода); все величины в расчёте на квадратный метр листвы, гС $м^{-2}$ $год^{-1}$.

Основой модели служат данные о зависимости процессов углеродного обмена (фотосинтеза и дыхания) от внешних условий. Установление этих зависимостей производится на основе измерений, сделанных за короткие промежутки времени (минуты, часы) на небольших частях растений – листьях, побегах, участках ствола, ветвей и корней, с одновременной регистрацией внешних факторов. По полученным данным и на основе базовых представлений о механизмах строятся экофизиологические модели, которые позволяют рассчитать интенсивности процессов при любом сочетании внешних факторов.

Описание метода расчёта начнём с описания углеродного баланса листа. Затем будет описан переход к углеродному балансу дерева, и окончательно – к величине NPP, характеризующей продуктивность целого древостоя.

Значения ключевых параметров всех подмоделей даны в таблице 1, обозначения вводятся по ходу изложения.

Таблица 1.

Основные параметры и сопутствующие величины объединённой модели листа, углеродного баланса дерева и полога.

Параметр и размерность	Береза	Лиственница	Ель	Сосна
Модель листа				
V_{cmax25}, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	74.0	25.6	54.5	74.0
J_{max25}, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	166.6	57.5	122.6	166.6
φ, моль e$^-$ (моль ФАР)$^{-1}$	0.1223	0.0604	0.0925	0.1223
g_{sw}^{max}, ммоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	100	65	60	79
W_0, мм	0	25	0	0
W_1, мм	100	55	100	100
W_2, мм	200	100	100	200
W_3, мм	400	300	150	400
A_{max} [*], мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	10.5	4.80	7.02	9.32
$T_{aopt,A}$, °C [**]	22.3	25.9	21.1	22.3
Модель дерева				
P_L, г С м$^{-2}$	20.1	17.5	31.0	34.5
$r_M(T_a = 15)$, гС (гС массы)$^{-1}$ сут$^{-1}$	1.36 10^{-4}	1.10 10^{-4}	1.04 10^{-4}	1.20 10^{-4}
r_{FR}, безразм.	0.20	0.20	0.20	0.10
r_G, безразм.	0.25	0.25	0.25	0.25
$R_{LeafCreationCost}$, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	55.8	48.6	17.2	31.9
μ, безразм.	30	30	30	30
H^{root}, см	60	50	30	100
Модель полога				
NPP_{empir}, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	332	206	248	228
τ (время жизни листвы), год	1	1	5	3
L_{eff}, м^2 м$^{-2}$	1.6259	1.7552	3.2755	1.3318
NPP_{crit}, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	90.73	85.30	56.34	42.48

V_{cmax25}, $J_{max25} \equiv 2.25V_{cmax25}$, φ, g_{sw}^{max} – параметры модели Фаркуара и проводимости (соответственно, максимальные скорости карбоксилирования и электронного транспорта при 25°C, квантовая эффективность фотосинтеза, максимальная устьичная проводимость для H_2O).

[*] A_{max} – максимальная скорость ассимиляции (результат счёта по модели Фаркуара, **не** параметр).

[**] Найдено как среднее по нескольким значениям Q.

Углеродный баланс листа

Скорость удельной нетто–ассимиляции листа (A_{netL}, мкмоль $м^{-2}с^{-1}$) равна

$$A_{netL} = A_{brutL} - R_L, \quad (1)$$

где A_{brutL} – брутто-ассимиляция, R_L – дыхание листвы, состоящее из дневной, R_{Lday}, и ночной, R_{Lnight}, компонент, всё в мкмоль $м^{-2}с^{-1}$. Величины A_{brutL}, R_{Lday} вычисляются по биохимической модели Фаркуара (Farquhar et al., 1980), R_{Lnight} – из дополнительных соображений. Для описания потока CO_2 в лист используется модель устьичной проводимости (Jarvis, 1976), что даёт в результате экофизиологическую модель ассимиляции листа. За последние 20 лет эта совместная модель, в той или иной модификации, применена во многих десятках экофизиологических и экологических работ.

Эколого–физиологические характеристики изучаемых видов были получены на основании экспериментальных наблюдений, проведенных Г. Г. Суворовой с сотрудниками в Предбайкалье (Суворова и др., 2004а, 2004б), а также литературных данных. Более подробное описание системы измерений и использования данных для идентификации модели Фаркуара см. в работах (Корзухин и др., 2004; Цельникер и др., 2007).

В настоящий момент модель оперирует шестью метеорологическими (экологическими) факторами, влияющими на депонирование углерода:

Q – интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР), мкмоль $м^{-2}с^{-1}$;

T_a – температура воздуха, °С;

D – дефицит влажности воздуха, гПа;

T_s – температура почвы, °С;

W_s – запас доступной влаги в почве, мм;

C_a – концентрация CO_2 в воздухе, $млн^{-1}$ (принята постоянной, равной 360 $млн^{-1}$).

В то время как биохимическое «ядро» модели Фаркуара остаётся практически неизменным (и многократно описано в литературе), зависимости от внешних факторов (помимо ФАР и C_a) заметно варьируют. Они существенны для понимания реакции модели на климатические параметры, поэтому кратко описываются ниже.

Скорость ассимиляции зависит от четырёх внешних факторов

$$A_{brutL} = A_{brutL}(Q, T_a, T_s, C_a). \quad (2)$$

Зависимость от Q – монотонно растущая функция с насыщением, близкая к гиперболе (т. н. световая кривая фотосинтеза). Зависимость от T_a входит в шесть субмоделей и описывается полуэмпирическими функциями, дающими в результате зависимость $A_{netL}(T_a) =$

$f_{\mathrm{Ta,A}}(T_a)$ с максимумом при некоторой оптимальной для фотосинтеза температуре, $T_{\mathrm{aopt,A}}$; в реальном диапазоне остальных факторов этот максимум зависит от Q, T_s, C_a и сравнительно мягок. Зависимость от T_s введена следуя результатам работ Cai and Dang (2002) и Dang and Cheng (2004): параметры V_{cmax25} (максимальная скорость карбоксилирования) и φ (квантовая эффективность фотосинтеза) модели Фаркуара умножались на квадратичную параболу

$$f_{\mathrm{Ts}}(T_s) = \begin{cases} 1-[(T_{\mathrm{sopt}} - T_s)/(T_{\mathrm{sopt}} - T_{\mathrm{smin}})]^2, & \text{при } T_{\mathrm{smin}} \le T_s \le T_{\mathrm{smax}}, \text{ и} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

(T_{smin}, T_{smax} – параметры, $T_{\mathrm{sopt}} = (T_{\mathrm{smin}} - T_{\mathrm{smax}})/2$). Таким образом, скорость карбоксилирования

$$V_c(T_a, T_s) = f_{\mathrm{Ta,A}}(T_a) f_{\mathrm{Ts}}(T_s) V_{\mathrm{cmax25}},\ \varphi(T_s) = f_{\mathrm{Ts}}(T_s)\varphi_{\mathrm{opt}},$$

где φ_{opt} – значение φ при $f_{\mathrm{Ts}}(T_{\mathrm{sopt}}) = 1$. Зависимость от C_a – монотонно растущая функция с насыщением; можно показать, что при Q, $C_a \to \infty$, $T_a = T_{\mathrm{aopt,A}}$, $T_s = T_{\mathrm{sopt}}$

$$A_{\mathrm{netL}}(C_a) \to \alpha V_{\mathrm{cmax25}},$$

где некоторая постоянная $\alpha < 1$.

Устьичная проводимость считается по широко применяемой эмпирической мультипликативной модели Jarvis (1976) и зависит от всех внешних факторов, кроме C_a:

$$g_{\mathrm{sw}}(Q, T_a, D, T_s, W_s) = \\ = g_{\mathrm{w}}^{\mathbf{cut}} + (g_{\mathrm{sw}}^{\mathbf{max}} - g_{\mathrm{w}}^{\mathbf{cut}}) \times f_{\mathrm{Q}}(Q) \times f_{\mathrm{Ta,G}}(T_a) \times f_{\mathrm{D}}(D) \times f_{\mathrm{Ts}}(T_s) \times f_{\mathrm{w}}(W_s), \quad (4)$$

где $g_{\mathrm{sw}}^{\mathbf{max}}$ – максимальная проводимость для H_2O, $g_{\mathrm{w}}^{\mathbf{cut}}$ – кутикулярная проводимость, обе в ммоль $м^{-2}$ $с^{-1}$. Значения всех функций $f_{\mathrm{ф}}(\Phi)$ (Φ – экологический фактор) лежат в интервале [0, 1]. Для радиации (Q_{05} – параметр)

$$f_{\mathrm{Q}}(Q) = Q(Q_{05}+Q)^{-1}.$$

Зависимость от T_a аналогична (3):

$$f_{\mathrm{TaG}}(T_a) = \begin{cases} 1-[(T_{\mathrm{aopt,G}} - T_a)/(T_{\mathrm{aopt,G}} - T_{\mathrm{amin}})]^2, & \text{при } T_{\mathrm{amin}} \le T_a \le T_{\mathrm{amax}} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

(T_{amin}, T_{amax} – параметры, $T_{\mathrm{aopt,G}} = (T_{\mathrm{amin}} - T_{\mathrm{amax}})/2$.) Естественно ожидать, что $T_{\mathrm{aopt,G}} \approx T_{\mathrm{aopt,A}}$, однако точного равенства добиться невозможно из–за зависимости $T_{\mathrm{aopt,A}}(Q)$, индивидуальной для каждой метеостанции. Зависимость от D – гиперболическая при $D < D_{00}$

$$f_D(D) = \begin{cases} 1, & \text{при } D < D_0, \text{ и} \\ [1+ (\mathrm{D} - \mathrm{D}_{00})/(\mathrm{D}_{05} - \mathrm{D}_{00})]^{-1} & \text{в противном случае} \end{cases}$$

(D_{00}, $D_{05} > D_{00}$ – параметры.) Зависимость $g_{\mathrm{sw}}(T_s)$ от T_s совпадает с таковой для V_c.

Зависимость устьичной проводимости от запаса почвенной влаги, $f_w(W_s)$, должна описывать подавление фотосинтеза при недостатке влаги, диапазон оптимального запаса, и подавление при переувлажнении; для этого была взята простейшая кусочно–линейная функция с четырьмя параметрами $0 \le W_0 \le W_1 \le W_2 \le W_3$: $f_w(W_s) = 0$ при $0 \le W_s < W_0$, $f_w(W_s)$ растёт при $W_0 \le W_s < W_1$, $f_w(W_s) = 1$ при $W_1 \le W_s < W_2$, $f_w(W_s)$ падает при $W_2 \le W_s < W_3$, $f_w(W_s) = 0$ при $W_s \ge W_3$. Заметим, что запас доступной влаги отсчитывается от влажности завядания, в нашем случае $W_{whilt} = 82$ мм, которой соответствует доступная влажность W_s=0.

Подмодели ассимиляции и устьичной проводимости – уравнения (1), (2) и (4) объединяются законом проводимости Фика

$$A_{netL} = 10^{-3} g_{ts}(C_a - C_i),$$

где g_{ts} – полная проводимость для CO_2 (находится из g_{ts} и g_w^{cut}), ммоль $м^{-2}$ $с^{-1}$, C_i – парциальная концентрация CO_2 в межклетниках, $млн^{-1}$; числовой множитель согласует размерности. В результате получаем итоговую зависимость нетто–ассимиляции от всех внешних факторов

$$A_{netL} = A_{netL}(Q, T_a, T_s, C_a, D, W_s).$$

Углеродный баланс дерева

Этот показатель отличается от углеродного баланса листа тем, что учитывает выделение углерода при дыхании всех органов дерева. Затраты на дыхание дерева, R_T, в нашей модели включают в себя следующие компоненты: R_L – дыхание листвы (дневное и ночное); R_{FR} – дыхание тонких корней; R_G – дыхание роста; R_M – дыхание поддержания неассимилирующей части фитомассы, исключая тонкие корни, всё в гС $м^{-2}$ $сут^{-1}$. Таким образом,

$$R_T = R_L + R_{FR} + R_G + R_M. \qquad (5)$$

Нетрудно получить уравнение суточного углеродного баланса с учётом введённых затрат. Введём величину нетто–ассимиляции дерева, A_{netT}, в гС $м^{-2}$ $сут^{-1}$. Кроме двух компонент в правой части уравнения углеродного баланса листа (1), A_{netT} зависит от всех новых компонент дыхательных затрат дерева (5), составляющих “дыхательную нагрузку” листа. Из-за трудностей измерения биомассы и дыхания тонких корней приближенно принято, что их масса пропорциональна брутто–фотосинтезу, а дыхание пропорционально массе, что даёт $R_{FR} = r_{FR} A_{brutT}$, r_{FR} – сравнительно хорошо оцениваемый параметр. Дыхание поддержания пропорционально массе неассимилирующих органов, приходящихся на массу проективной поверхности листа

$$R_M = r_M \times P_L \times [(M_{conduct} - M_L)/M_L],$$

где P_L – вес 1 м^2 проекционной поверхности листвы, в гСм$^{-2}$, r_M – удельный коэффициент дыхания поддержания, гС (г С массы)$^{-1}$ сут$^{-1}$. Дробь в R_M возникает из-за написания уравнения баланса для 1 м^2, $M_{conduct}$ – масса всех проводящих органов, для которой определяется дыхание поддержания, M_L – масса листвы, дыхание поддержания которой учтено в R_L. Безразмерная величина

$$\mu = (M_{conduct} - M_L)/M_L$$

принята постоянной, равной 30 (оценено по данным нормативных таблиц хода роста, Усольцев, 2002). Дыхание роста принято брать пропорциональным A_{netT}, $R_G = r_G A_{netT}$, r_G – сравнительно хорошо известный коэффициент пропорциональности. Удельные коэффициенты дыхания r_{FR} и r_M зависят от T_a по закону Вант–Гоффа с соответствующими параметрами, r_G от T_a не зависит.

Собирая введённые зависимости, получаем уравнение баланса углерода дерева

$$A_{netT} = A_{brutT} - R_L - r_{FR}A_{brutT} - r_G A_{netT} - r_M P_L \mu.$$

В итоге, A_{netT} находится из уравнения

$$A_{netT} = [A_{brutT}(1 - r_{FR}) - R_L - r_M P_L \mu/(1 + r_G),$$

где $A_{brutT} = A_{brutL}$ и R_L берутся из расчёта удельного углеродного баланса листа.

Величины трёх компонент ассимиляции листа (уравнение (1)) за сутки, гС м$^{-2}$ сут$^{-1}$, находились суммированием 24 значений (найденных с шагом в 1час) и переводом мкмоль в г С.

Суточные значения ассимиляции листа, дерева и компонент дыхания суммировалась по вегетационному периоду (см. ниже), а дыхание – по периоду с положительными температурами (бóльшему, чем вегетационный период). В результате получали все величины с размерностью гС м$^{-2}$ год$^{-1}$.

Параметры модели Фаркуара и устьичной проводимости (их число равно 36, см. Цельникер и др., 2007) брались из литературы или находились подгонкой к измерениям ассмиляции для световой (наиболее производительной) хвои трёх видов – лиственницы *Larix sibirica* Ledeb, ели *Picea obovata* Ledeb., и сосны *Pinus sylvestris* L. в Предбайкалье, с одновременной регистрацией факторов среды Q, T_a, RH (отн. влажность воздуха), T_s, W_s (Суворова и др., 2004 а, б). Для березы параметры взяты близкими к таковым для сосны, с учетом ее листопадности и различий в чувствительности к разным факторам среды.

Углеродный баланс полога

В рамках нашей постановки задачи, именно климат определяет величину годичного углеродного баланса каждой породы. Для того, чтобы растение могло существовать в заданном климате, его углеродный баланс должен быть, как минимум, положительным. Кроме того, необходимо, чтобы ежегодный прирост органического вещества дерева позволял ему возобновлять листву и проводящие органы, обеспечивающие её жизнедеятельность. Ввиду ежегодного опадения части листвы (~ 20% у ели, ~ 33% у сосны и по 100% у березы и лиственницы), критическая величина прироста биомассы должна быть не меньше массы обновляемой листвы плюс минимальная масса «обслуживающих» листву неассимилирующих органов (в общей массе годичного прироста в плохих условиях роста она составляет около 45%, рассчитано по данным Усольцева, 2007). Надо также учесть затраты углерода на дыхание при образовании новой массы; они составляют долю r_G от её величины. Мы приняли экспертно, что для своего существования дерево должно воспроизводить в год как минимум 1 м^2 листвы на 1 м^2 имеющейся фотосинтезирующей листвы. Масса, необходимая для возобновления листвы и проводящих органов обозначена как $R_{\text{LeafCreationCost}}$, в гС м$^{-2}$ год$^{-1}$, её величина оказалась довольно большой (табл. 1).

Величина $R_{\text{LeafCreationCost}}$ задаёт критические границы для совокупности параметров климата, при которых данный вид может существовать. Потенциальный («экофизиологический») ареал древесной породы – это та часть географического пространства, где баланс углерода дерева $A_{\text{netT k}}$ превосходит $R_{\text{LeafCreationCost}}$, т.е.

$$A_{\text{netT k}} > R_{\text{LeafCreationCost}}, \qquad (6)$$

k – индекс станции; общее число таких станций обозначим N^+.

Центральный шаг перехода от листа к пологу, или от A_{netT} к NPP (т.е. фактически от 1 м^2 листвы к 1 м^2 полога), делался сравнением A_{netT} с эмпирически наблюдаемыми значениями NPP_{empir}, которые по определению относятся к 1 м^2 полога. Была введена величина, названная эффективной листовой поверхностью, $\mathbf{L}_{\text{eff}}$, в м^2 м$^{-2}$. Она равна числу слоёв световой листвы, эквивалентной по своей производительности реальному количеству листвы, состоящей из световой и теневой (гораздо менее производительной) листвы, и была найдена для каждой метеостанции, принадлежащей ареалу

$$\mathbf{L}_{\text{eff k}} = NPP_{\text{empir}}/A_{\text{netT k}},$$

где NPP_{empir} – среднее значение прироста биомассы для соответствующего вида по базе данных Усольцева (2007) (табл. 1). $\mathbf{L}_{\text{eff}}$ была найдена как среднее значение

$$\mathbf{L}_{\text{eff}} = (\Sigma \mathbf{L}_{\text{eff k}})/N^{+}.$$

Эквивалентное (6) неравенство получается после умножения (6) на $\mathbf{L}_{\text{eff}}$

$$NPP_{\text{mod k}} > NPP_{\text{crit}}, \qquad (7)$$

где

$$NPP_{\text{crit}} = \mathbf{L}_{\text{eff}} \times R_{\text{LeafCreationCost}}.$$

Неравенство (7) использовалось для причисления каждой точки к соответствующему ареалу.

$\mathbf{L}_{\text{eff}}$ имеет разумные значения (табл. 1), принимая во внимание, что параметры модели Фаркуара были найдены для самой продуктивной – световой листвы; наблюдаемые значения LAI обычно заметно больше (типичный диапазон 3–6); значение $\mathbf{L}_{\text{eff}}$ для сосны видимо занижено. Впрочем, усреднённые по сезону наблюдаемые из космоса значения ближе к нашим оценкам; повидимому, величина LAI ~ 3–6 относится к максимально достигаемой за сезон (Krinner et al., 2005).

Найденное значение $\mathbf{L}_{\text{eff}}$ позволяет рассчитать основные величины, используемые при анализе продуктивности полога – индивидуальные и средние по всем станциям значения GPP, NPP, R_{Σ}, в гС м$^{-2}$ год$^{-1}$:

$$GPP = \mathbf{L}_{\text{eff}} \times A_{\text{brutT}}, \; NPP = \mathbf{L}_{\text{eff}} \times A_{\text{netT aver}}, \; R_{\Sigma} = \mathbf{L}_{\text{eff}} \times R_{\text{T}},$$

а также величину CUE (Carbon Use Efficiency)

$$CUE = NPP/GPP$$

(для каждой станции и среднюю по ареалу).

Климатические данные и производные величины

Для определения климатических факторов были использованы данные часового (срочные) и суточного разрешения из трёх источников.

1. Данные DATASET 9290c, собранные в National Climatic Data Center, NC, USA по 2085 станциям на территории бывшего СССР за все годы наблюдения (1871–2001): срочные значения T_{a}, относительной влажности воздуха RH, и процента облачности Cl (от 1 до 8 измерений в разное время суток в зависимости от года наблюдения).

2. Данные DATASET 9813, собранные в National Climatic Data Center, NC, USA по величине суточных осадков Pr(JD), мм день$^{-1}$, на 2188 станциях на территории бывшего СССР за все годы наблюдения (1871–2001), JD – Юлианский день. Число станций, общих для этих двух баз данных, равнялось 2083. Они были дополнены из третьего источника данных.

3. Метеоданные оперативного потока с каналов связи, собираемые ГМЦ Росгидромета и используемые для задач мониторинга климата в ИГКЭ Росгидромета. Всего – 377 станций, дополняющих список 2083 станций, максимальный период наблюдения 2000–2007 гг. Из полного набора факторов оперативного потока были использованы следующие: срочные значения T_a (от 1 до 8 измерений за сутки), суточные значения Pr(JD) и температуры точки росы, T^{dew}(JD).

Таким образом, полное число использованных станций равнялось 2460. Для каждой станции из списка–2083 все срочные значения для каждого момента наблюдения и за каждый день не високосного года JD = 1..365 были усреднены, а затем интер– или экстраполированы внутри каждого дня для получения 24 часовых значений T_a(JD, h), RH(JD, h), Cl(JD, h), h = 0,..,23. Так же были получены величины T_a(JD, h) для списка–377 станций.

Недостающие для запуска модели факторы находились дополнительными расчётами.

Инсоляция Q(JD, h). Сначала по известным астрономическим формулам (напр., Spitters et al., 1986) находился угол наклона Солнца, φ_S(lat, JD, h) (lat – широта, h – час суток). Затем применялась эмпирическая формула (Барашкова и др., 1981), дающая величину Q (уже в форме ФАР) в зависимости от балла облачности ν (ν = 0 соответствует ясному небу, ν = 10 – сплошной облачности):

$$Q = p(\nu) \times \varphi_S^{\,q(\nu)},$$

p, q – эмпирические параметры, зависящие от ν, которое находилось из процента облачности (как величина, округлённая до ближайшего целого):

$$\nu(\mathrm{JD}, h) = Cl(\mathrm{JD}, h)/10.$$

Отсутствующие значения Cl(JD, h) для списка–377 брались с ближайшей станции списка–2083.

Дефицит влажности воздуха, D(JD, h), гПа, для списка–2083 находился по прямой формуле

$$D(T_a, RH) = e^{sat}(T_a)[1-RH/100];$$

здесь T_a, $RH = T_a$, RH(JD, h), $e^{sat}(T_a)$ – известная эмпирическая функция зависимости насыщающей влажности воздуха от температуры, гПа. Для списка–377 использовалось равенство

$$D(T_a, T^{dew}) = e^{sat}(T_a) - e^{sat}(T^{dew}),$$

для каждого часа h, где неизвестная T^{dew}(JD, h) была оценена из предположения, что в каждый момент времени T^{dew} меньше T_a на постоянную величину:

$$T^{\mathrm{dew}}(\mathrm{JD}, h) = T_{\mathrm{a}}(\mathrm{JD}, h) - \Delta T^{\mathrm{dew}}(\mathrm{JD}),$$

где за ΔT^{dew} естественно взять разность средне–дневных значений

$$\Delta T^{\mathrm{dew}}(\mathrm{JD}) = T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD}) - T^{\mathrm{dew}}(\mathrm{JD}).$$

Суточные значения температуры почвы $T_{\mathrm{s}}(\mathrm{JD})$, были взяты равными средне–дневной температуре воздуха с запаздыванием в $\beta = 7$ дней (при $\mathrm{JD} \le \beta$ бралось $\beta = 0$) (оценено по данным Суворовой и др., 2004а, 2004б)

$$T_{\mathrm{s}}(\mathrm{JD}) = T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD}-\beta).$$

Суточные значения запаса доступной влаги в почве. $W_S(\mathrm{JD})$ находился из динамической модели увлажнения почвы и использования почвенной влаги растением, сформулированной при следующих упрощающих предположениях. Почвенный слой однороден и во всех пунктах одинаков, имеет максимальную толщину $H_S^{\max} = 200$ см, влага распределяется по всей глубине почвы равномерно и мгновенно; плотность влаги по глубине $\rho_{\mathrm{W}} = 2$ мм см$^{-1}$, откуда текущая толщина обводнённого слоя $H_S = W_S/\rho_{\mathrm{W}}$; максимальная влагоёмкость $W_S^{\max} = 400$ мм, избыток стекает либо по поверхности почвы, либо в грунтовые воды; испаряемость, в мм сут$^{-1}$, $E_0(\mathrm{JD}) = B \times T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD})$ при $T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD}) > 0$ ($B = 0{,}18$, мм К$^{-1}$ – константа испаряемости Будыко), иначе $E_0 = 0$. В этих предположениях динамика почвенной влаги с шагом в одни сутки описывается уравнением

$$W_S(\mathrm{JD}+1) = W_S(\mathrm{JD}) + Pr(\mathrm{JD}) - E_0[T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD})] \qquad (8)$$

с дополнительным условием: если $W_S(\mathrm{JD}) < 0$, берём $W_S(\mathrm{JD}) = 0$. Начальное условие для уравнения (8) находится следующим образом. Задаёмся днём $\mathrm{JD} = 244$ (1 Сентября), и находим разность суммы осадков, Pr^{sum}, и испарения, E_0^{sum}, до момента оттаивания почвы в следующем году, определяемого как первый день следующего года, $\mathrm{JD}^{\mathrm{melt}}$, для которого $T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD}^{\mathrm{melt}}) > 0$. Траекторию $W_S(\mathrm{JD})$ находим с начальным условием $W_S(\mathrm{JD}^{\mathrm{melt}}) = Pr^{\mathrm{sum}} - E_0^{\mathrm{sum}}$, с естественным ограничением $[0, W_S^{\max}]$.

Использование почвенной влаги зависит от глубины проникновения корневой системы, H^{root} (параметр модели); в итоге, запас доступной влаги находим как

$$W_S^{\mathrm{avail}} = \begin{cases} W_S(\mathrm{JD}) & \text{при } H^{\mathrm{root}} > H_S, \text{ и} \\ W_S(\mathrm{JD}) \times H^{\mathrm{root}}/H_S & \text{при } H^{\mathrm{root}} \le H_S \end{cases}$$

Сроки вегетации

Они зависят от обеих координат местообитания породы и дат наступления некоторой пороговой температуры (Цельникер и др.,

2002); из–за немонотонного хода даже усреднённой температуры алгоритм не является строгим, но результаты легко исправляются экспертным образом. Начало вегетации происходит в $\mathrm{JD}_{\mathrm{veg\ init}}$ – первый день года, для которого выполняется

$$T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD}_{\mathrm{veg\ init}}) > T_{\mathrm{Va}}^{\mathrm{mean\ crit\ init}}$$

(для берёзы и лиственницы добавляется 10 дней на распускание листвы). Конец вегетации для ели и сосны происходит в $\mathrm{JD}_{\mathrm{veg\ fini}}$ – первый день года, для которого выполняется

$$T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}(\mathrm{JD}_{\mathrm{veg\ fini}}) < T_{\mathrm{Va}}^{\mathrm{mean\ crit\ fini}};$$

для лиственницы он фиксирован, а для березы находится по прямой регрессионной зависимости (табл. 2). Дыхание поддержания становится ненулевым раньше начала вегетации, а прекращается позже; сроки также определяются переходом через критическую температуру, $T_{\mathrm{Ra}}^{\mathrm{mean\ crit\ init}} = T_{\mathrm{Ra}}^{\mathrm{mean\ crit\ fini}} = 0^{\circ}\mathrm{C}$.

Таблица 2.

Критические температуры начала и конца вегетации. Граница Европейская Россия – Сибирь проходит по долготе 58.0° в. д.; lat – градусы с. ш.

Порода	Регион	Начало $T_{\mathrm{Va}}^{\mathrm{mean\ crit\ init}}$	Конец $\mathrm{JD}_{\mathrm{veg\ fini}}$	Конец $T_{\mathrm{Va}}^{\mathrm{mean\ crit\ fini}}$
Береза	Европейская Россия	9.6	$306.7 - 0.69 \times \mathrm{lat}$	
	Сибирь	9.2	$307.4 - 0.77 \times \mathrm{lat}$	
Лиственница	Европейская Россия	9.4	276	
	Сибирь	9.2	260	
Ель	Россия	5.0		5.0
Сосна	Россия	5.0		5.0

Результаты

Наблюдаемые и расчётные ареалы

Наблюдаемые ареалы распространения изучаемых видов были взяты по Соколов и др. (1977) и из «Атлас...» (1988). При настоящем уровне развития экологии практически невозможно экофизиологически различить даже наиболее распространённые виды внутри рода, поэтому имеет смысл сравнивать модельный расчёт с суммарным ареалом группы видов в пределах рода; список видов дан в легенде соответствующей карты (рис. 1, *a–d*).

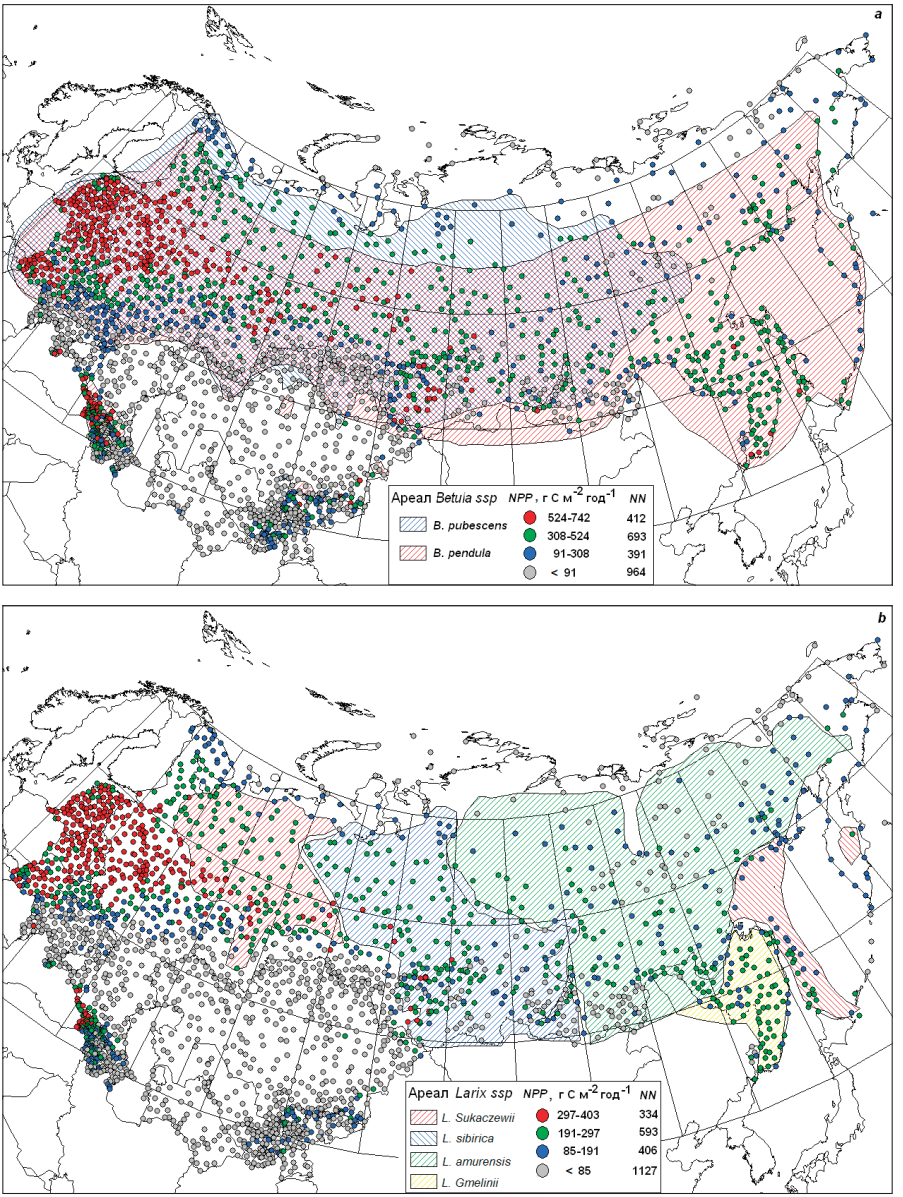


Рис. 1 (*a*–*b*). Ареалы распространения и рассчитанное по модели распределение нетто-продуктивности пород при современном климате. Диапазон [NPP_{crit}, NPPmax] разбит на три равных интервала с $\Delta NPP = (NPP_{max} - NPP_{crit})/3$, NN – число точек (метеостанций), попавших в интервал с высокой (●), средней (●) и низкой (●) продуктивностью; (●) – точки с $NPP \le NPP_{crit}$. ***a*** – береза, ***b*** – лиственница.

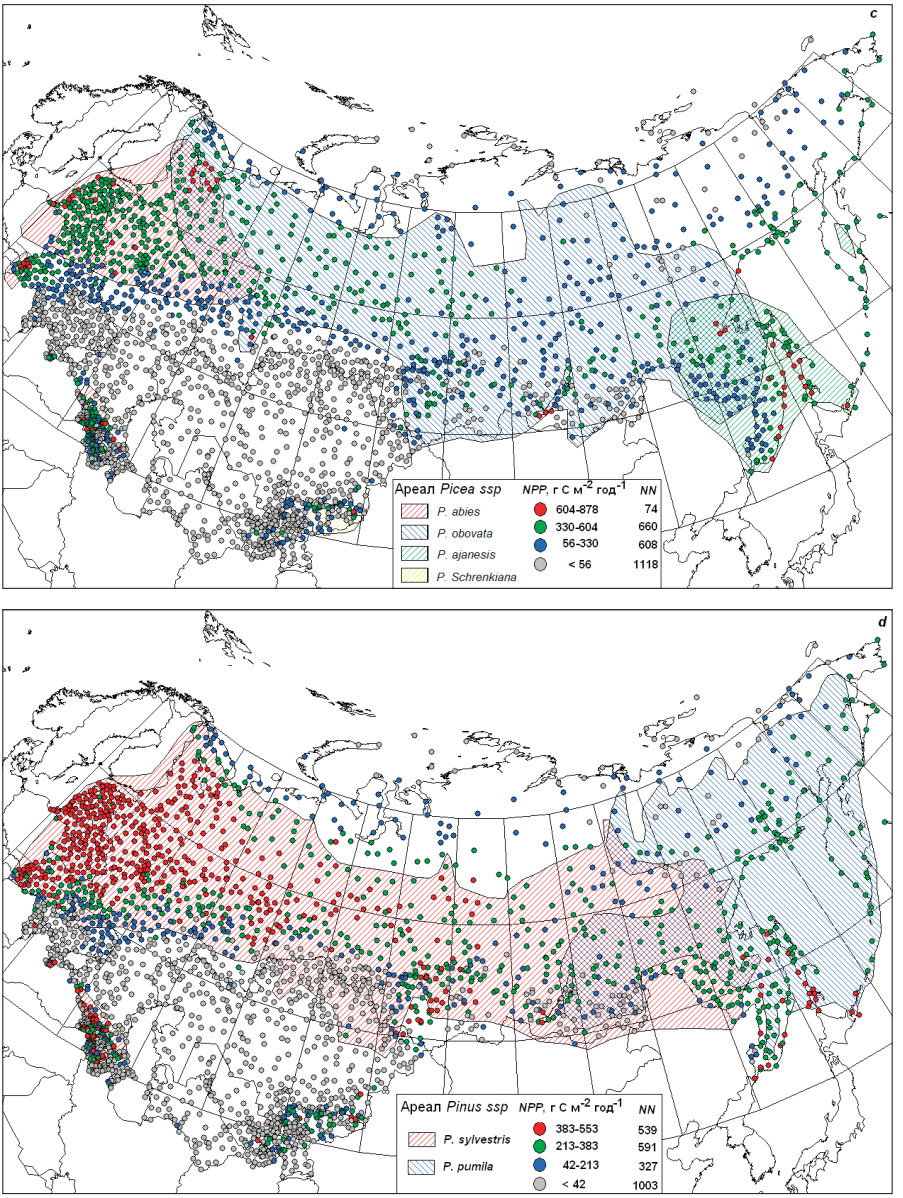


Рис. 1 (*c*–*d*). Ареалы распространения и рассчитанное по модели распределение нетто-продуктивности пород при современном климате. Диапазон [NPP_{crit}, NPPmax] разбит на три равных интервала с $\Delta NPP = (NPP_{max} - NPP_{crit})/3$, NN – число точек (метеостанций), попавших в интервал с высокой (●), средней (●) и низкой (●) продуктивностью; (●) – точки с $NPP \le NPP_{crit}$. ***c*** – ель, ***d*** – сосна.

Расчётные ареалы удовлетворительно совпадают с наблюдаемыми. Несовпадения (по числу точек), при которых порода по модели могла бы существовать вне ареала распространения, составили 7–18 %.

Средние значения NPP

Результаты расчётов для основных переменных даны в таблице 3, *a*, а в таблице 3, *b* – короткий обзор типичных литературных оценок, полученных сочетанием расчётов и прямых измерений. Следует отметить, что использование числа станций, попавших внутрь, N^+ (условие (7)), и вне, N^-, теоретического ареала ($N^+ + N^- \equiv 2460$) даёт лишь приблизительную оценку площадей ареалов и их изменения; точное сравнение площадей должно проводиться с учётом площади, приходящейся на каждую станцию. Как видно, наши оценки *NPP* хорошо согласуются с опубликованными; исключение составляют данные Базилевич (1993).

Влияние широты места произрастания на продуктивность

Зависимость *NPP* от широты места произрастания изображена на рис. 2, *a*–*d*. Все четыре изучаемых вида имеют разорванные ареалы, состоящие из южной, около 40° с.ш. – преимущественно горной, и северной, в районе 50–70° с.ш. – преимущественно равнинной части (рис. 1, *a*–*d*). Соответственно, широтное распределение имеет провал около 45° с.ш.; для нас наиболее интересна северная часть, где можно пренебречь зависимостью климата от высоты расположения метеостанции. Три породы (береза, лиственница, сосна) имеют характерный максимум продуктивности в районе 55° с. ш., величина которого (усреднённая с шагом в 5°) лежит в типичных для изучаемых пород пределах. Эта широта соответствует в России зоне южной тайги. Высокие значения *NPP* отмечаются также и в южном субареале. Интересно отметить, что максимальные значения *NPP* в двух субареалах практически одинаковы. Причины явления – непонятны.

В целом, сравнение наших величин *NPP*(lat) с литературными оценками общей для всей растительности *NPP*(lat) весьма удовлетворительно. Два уточнения. Во-первых, все южные части ареалов имеют пониженную продуктивность (и наши породы замещаются другими), поэтому сравнивать имеет смысл центральные части ареалов. Во–вторых, там, где наши породы являются преобладающими и произрастают вместе, аккуратная оценка среднего *NPP* должна проводиться с учётом их представленности в лесном фонде, что выходит за рамки настоящей работы.

В целом, глобальные модели дают для бореальных лесов близкое к нашему распределение *NPP*(lat) с несильно выраженным максимумом *NPP* ~ 420–480 гС м$^{-2}$ год$^{-1}$, который приходится на 50–55° с. ш.

Таблица 3, a.

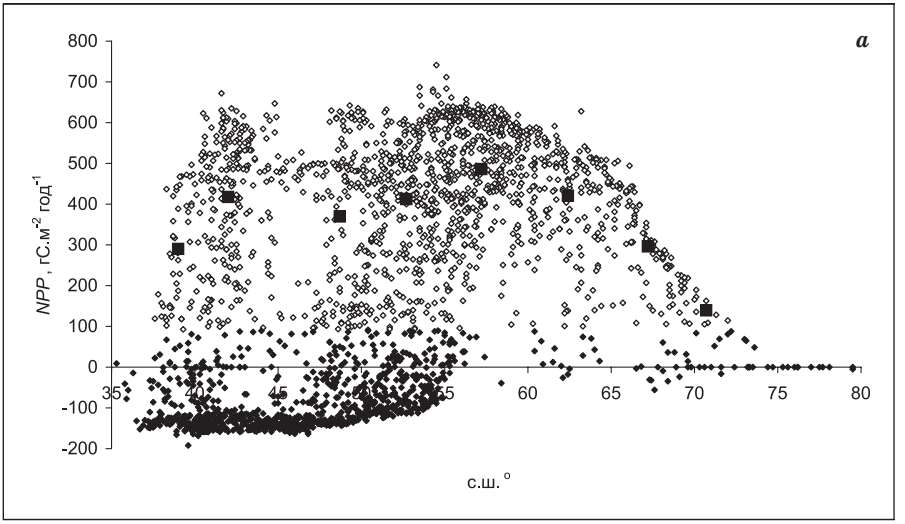
Текущий климат. Средние по ареалам значения *NPP*, *GPP*, R_{Σ}, *CUE*, и число точек (метеостанций) внутри и вне теоретического ареала, N^{+}, N^{-}. Текущий климат, $\delta T = 0$.

Переменная	Береза	Лиственница	Ель	Сосна
N^{+} ($NPP > NPP_{crit}$) N^{-} ($NPP \le NPP_{crit}$)	1496 964	1333 1127	1342 1118	1457 1003
NPP, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	416	234	353	320
GPP, гСм$^{-2}$ год$^{-1}$	874	496	835	774
R_{Σ}, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	458	262	482	454
CUE, безразм.	0.466	0.469	0.409	0.406

Таблица 3, b.

Обзор литературных значений *NPP* и *GPP*.

Переменная	Значение, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	Регион/ растительная зона/ порода	Источник	Комментарий
NPP	370–430 830 420	сосновые леса еловые леса лиственничные леса	Базилевич, 1993	см. критику в Швиденко и др. (2008)
NPP	297 285 391	леса России в целом хвойные мягколиственные	Швиденко и др., 2008	*NPP* включает напочв. ярус (~ 10 %)
NPP	351	бореальные леса	Cao and Woodward, 1998	
NPP	300–500	бореальная зона	Cramer et al., 1999	среднее по 19 моделям
NPP	290	среднее для бореальной зоны	Foley, 1995	
NPP	500	бореальные леса	Gifford, 2003	
NPP	190	среднее для бореальной зоны	Grace, 2004	
GPP	600–1300	северо-запад Евр. части РФ	Jung et al., 2008	
NPP	310	среднее для лесов СССР	Kolchugina and Vinson, 1993	
NPP	200–500	бореальная зона	Running et al., 2004	



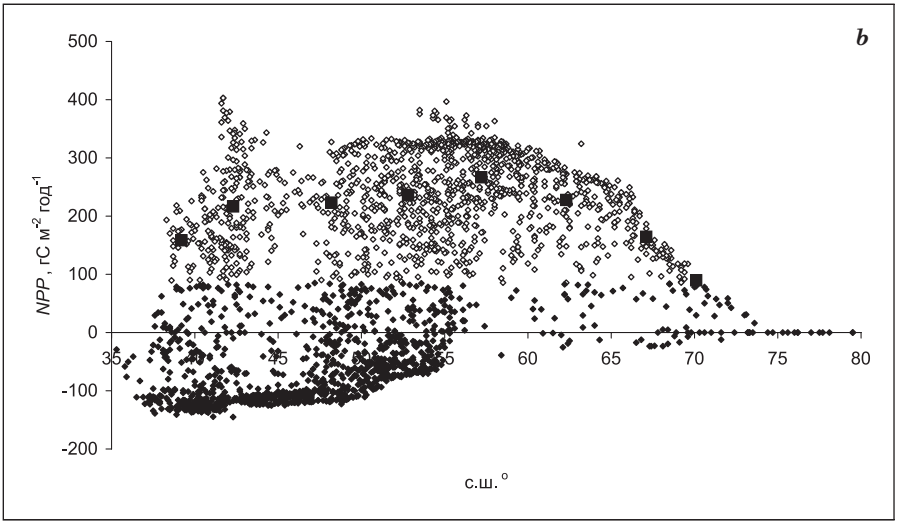
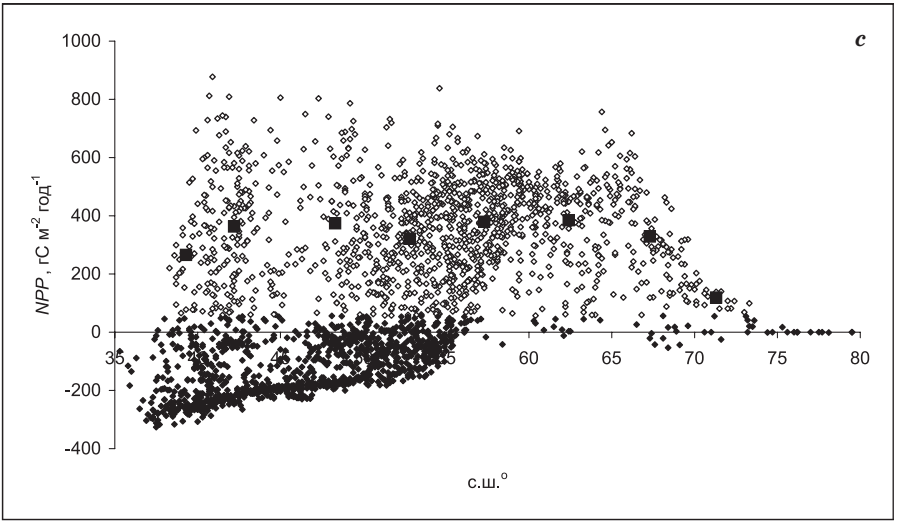


Рис. 2 (*a*–*b*). Зависимость нетто–продуктивности видов от географической широты места произрастания.

◆ – для точек, принадлежащих ареалу ($NPP > NPP_{crit}$), ◇ – для точек вне ареала, ■ – средние значения *NPP* в интервалах по 5°. ***a*** – берёза, ***b*** – лиственница.



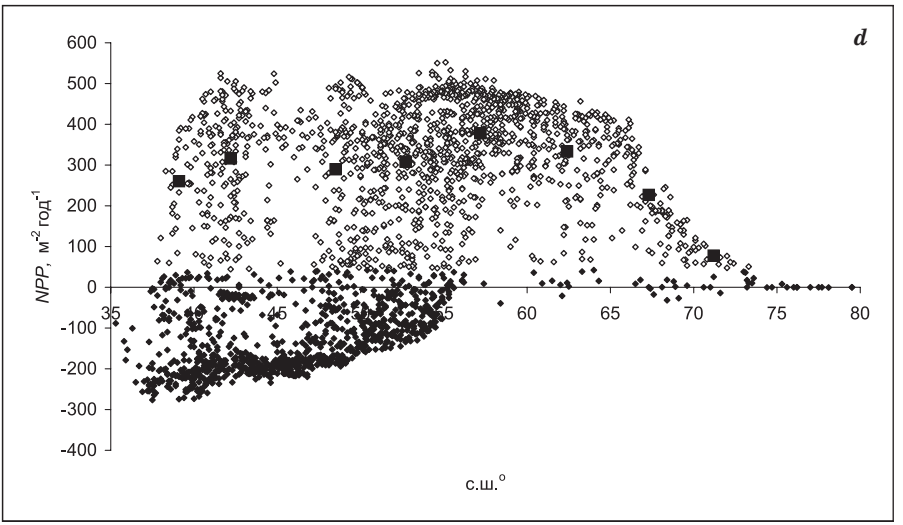


Рис. 2 (*c*–*d*). Зависимость нетто-продуктивности видов от географической широты места произрастания.

◆ – для точек, принадлежащих ареалу ($NPP > NPP_{crit}$), ◇ – для точек вне ареала, ■ – средние значения *NPP* в интервалах по 5°. ***c*** – ель, ***d*** – сосна.

(Моисеев, Алябина, 2007; Foley, 1996; Cao and Woodward, 1998; Kicklighter et al., 1999; Kucharik et al., 2000; Knorr and Heimann, 2001; Kaminski et al., 2002; Krinner et al., 2005; Matthews et al., 2007).

Сила влияния факторов на продуктивность

С экологической точки зрения, представляет определённый интерес сравнение видов по чувствительности к изменениям факторов среды. Для решения этой задачи были численно найдены частные производные по каждому фактору при текущем климате, $\partial NPP/\partial \Phi_k$, позволяющие сравнить виды по реакции на изменение Φ_k, и тем самым найти сравнительную значимость факторов в отношении влияния на продуктивность (табл. 4). (Следует помнить, что это производные от средних по ареалу с большим разбросом климатических параметров.) За исключением $\partial NPP/\partial Tsoil$, каждая производная имеет один знак: для всех видов NPP растёт при потеплении, увлажнении воздуха (соответствует падению D), увлажнении почвы, и увеличении ФАР (соответствует падению Cl). Разный знак реакции на изменение $Tsoil$ необъясним, в частности, непонятна разница между березой и сосной, имеющих близкие параметры. Что касается силы влияния факторов, то на первом месте по общей чувствительности стоит ель, имеющая наибольшие по модулю производные по всем факторам (кроме освещённости, для которой реакция по видам примерно одинакова). Особо отметим её сильную чувствительность к сухости воздуха.

Таблица 4.

Реакция видов на вариацию экологических факторов.

Чувствительность	береза	лиственница	ель	сосна
$\partial NPP/\partial Tair$, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$ К$^{-1}$	1.9	5.7	11.2	1.9
$\partial NPP/\partial Tsoil$, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$ К$^{-1}$	−9.0	0.9	−16.1	3.7
$\partial NPP/\partial D$, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$ гПа$^{-1}$	−9.1	−8.1	−32.7	−7.2
$\partial NPP/\partial Ws$, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$ мм$^{-1}$	2.2	0.5	6.1	1.4
$\partial NPP/\partial Cl$, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$ Cl^{-1}	−2.3	−1.0	−1.5	−2.0

Изменение NPP и ареалов при вариации температуры

В качестве примера применения модели для нахождения вариации ареалов и продуктивности при возможном изменении климата, мы увеличили температуру воздуха на $\delta T = +2^{\circ}$C, т.е. $T_a \rightarrow T_a + 2^{\circ}$C. (Не трудно было проварьировать и осадки, но их прогноз для Евразии на предстоящие десятилетия (Sitch et al., 2008) предсказывает слабые изменения, порядка 0,1 мм день$^{-1}$ К$^{-1}$, которыми можно пренебречь.)

Некоторые пояснения к этому модельному эксперименту. Он не включает в себя нескольких компонент, существенных для проведения прогноза, претендующего на статус «реального». Прежде всего, оставлена постоянной [CO_2], вариации которой по тому или иному сценарию часто включаются в расчёт. Во–вторых, мы вообще не рассматриваем динамику климатических факторов, а просто берём их новое стационарное значение (в этом отношении наш эксперимент методически подобен проведённому Gerber et al., 2004). Перечень можно продолжить. Таким образом, вариацию температуры и зависящих от неё величин следует рассматривать как факторное исследование, обычное при разработке моделей.

Помимо прямого влияния на скорость ассимиляции в модели Фаркуара, $A_{\mathrm{netL}} = A_{\mathrm{netL}}(T_{\mathrm{a}})$, из зависящих от T_{a} величин были пересчитаны сроки начала и конца вегетации, и траектория почвенной влаги W_S(JD), зависящая от температуры через испаряемость, E_0(JD) = $B \times T_{\mathrm{a}}^{\mathrm{mean}}$(JD). Изменённый дефицит влажности воздуха D находился путём комбинации метода McMurtrie et al. (1990) и нашего подхода, использующего исходные значения $D(T_{\mathrm{a}})$.

Для каждой точки (метеостанции) при вариации температуры возможны четыре перехода:

$$N^+ \to N^+,\ N^+ \to N^-,\ N^- \to N^+,\ N^- \to N^-, \qquad (9)$$

при первом и четвёртом статус точки не меняется. В целях аккуратного сравнения, нам показалось полезным найти значения NPP для исходного ($\delta T = 0^{\circ}$C) и конечного ($\delta T = +2^{\circ}$C) ареалов, а также для их пересечения, последнее – для оценки изменения NPP у точек, оставшихся «положительными» при изменении температуры. Численные результаты приведены в таблице 5, карты с вариацией ареалов – на рис. 3, *a*–*d*. Индекс «tot» относится ко всему ареалу, «comm» – к общей части исходного и изменённого ареала ($N^{+\mathrm{comm}}$ равно числу точек в переходе $N^+ \to N^+$).

Для всех пород очевидно сокращение ареалов и уменьшение среднего NPP. Изменение ареалов однотипно: заметный сдвиг южной границы к северу в Европейской и Западно-Сибирской частях ареала (для лиственницы этот сдвиг – фиктивен), и появление «рассеянных» необитаемых точек в Восточной Сибири. Ареал ели в Европейской части заметно приблизился к наблюдаемому. Относительные изменения NPP по породам ранжируются (от наибольшего) как [ель, сосна, береза, лиственница].

Несложный численный эксперимент позволяет найти вклад каждого фактора в общее уменьшение NPP (табл. 6). (Длительность вегетационного периода увеличивается на 8–10 дней без существенного влияния на результат, поэтому не варьировалась как независимый фактор.) Выясняется, что для березы, лиственницы и сосны основная причина

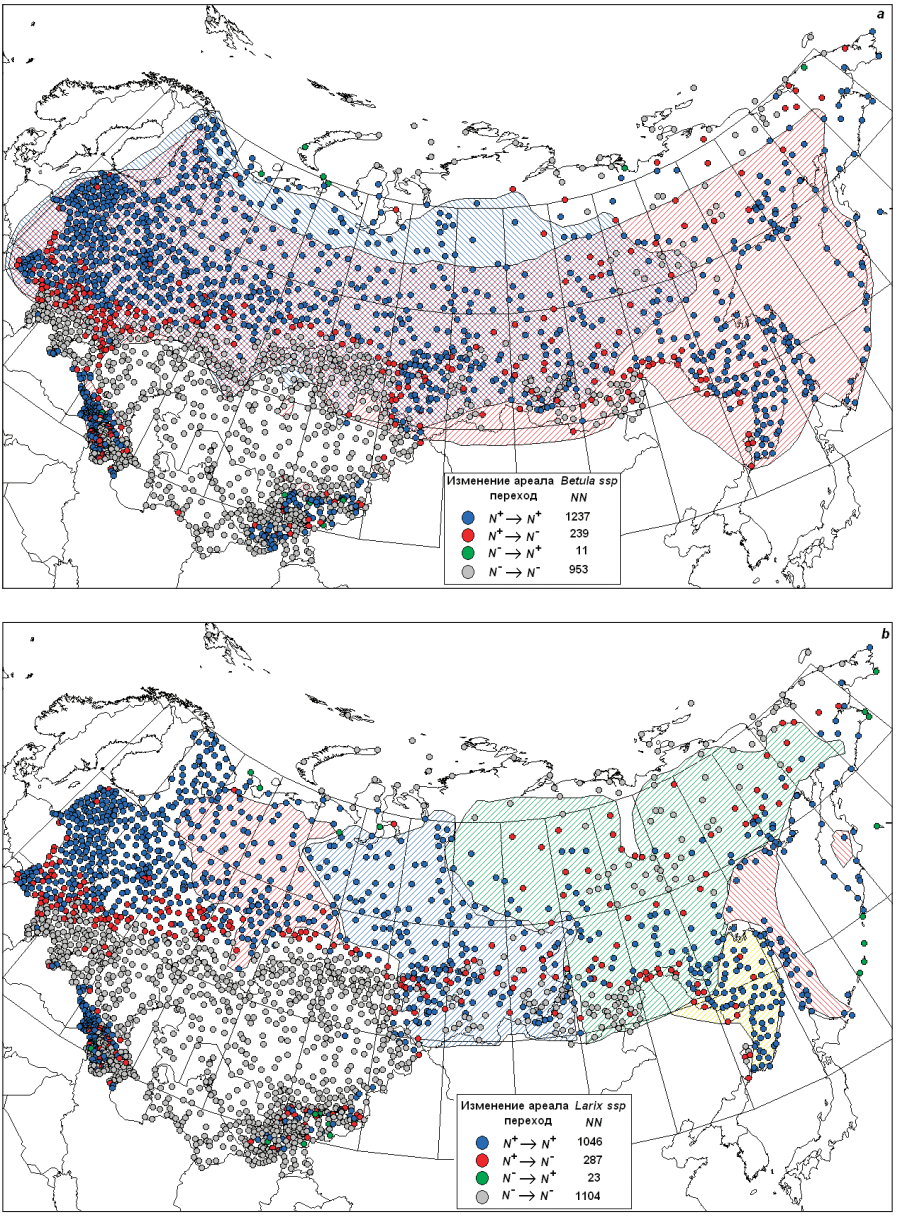


Рис. 3 (*a*–*b*). Ареалы распространения (обозначения видов см. на рис. 1) и рассчитанное по модели их изменение при повышении температуры на 2°С. *NN* – число точек (метеостанций), сменивших (●, ●) и не сменивших (●,●) свой статус (в смысле принадлежности к ареалу, см. текст). ***a*** – берёза, ***b*** – лиственница.

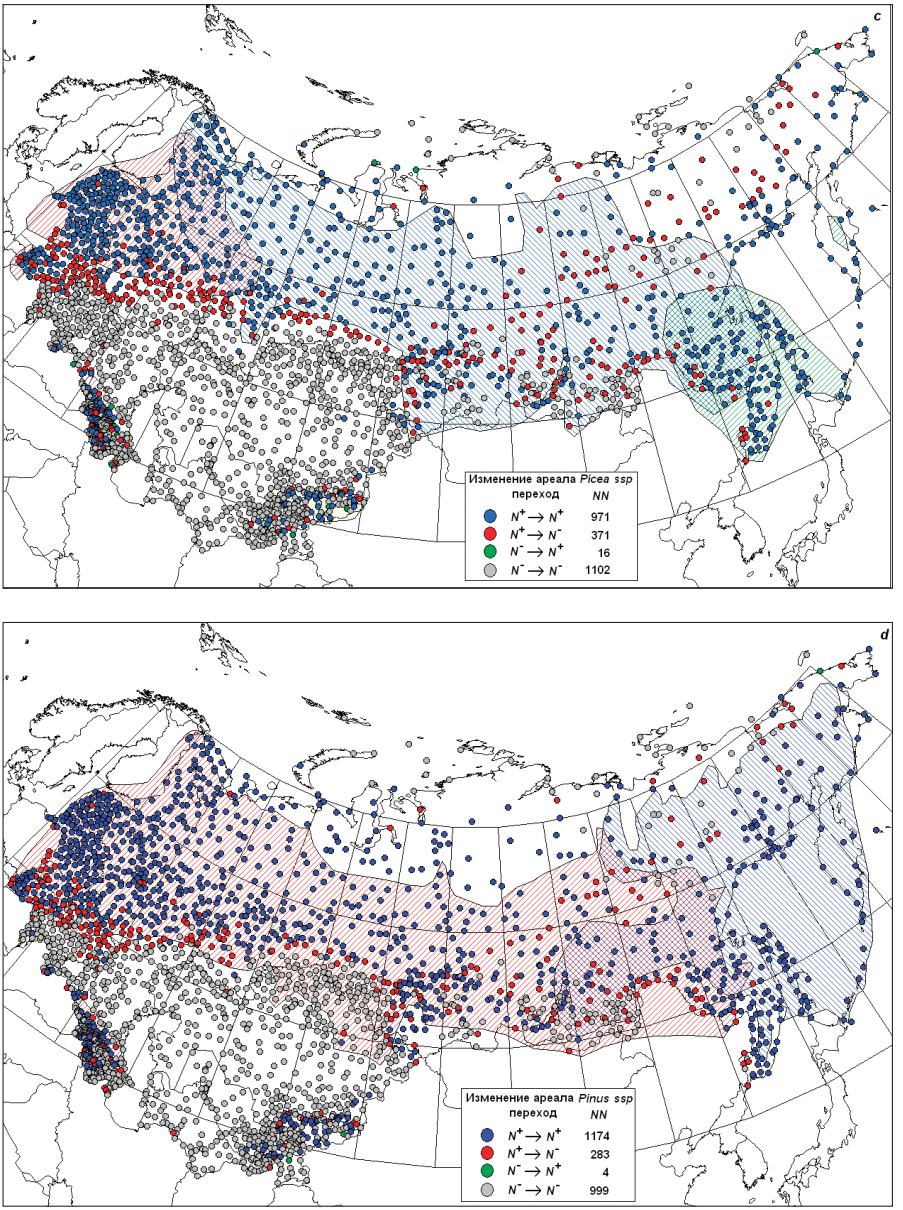


Рис. 3 (*c*–*d*). Ареалы распространения (обозначения видов см. на рис. 1) и рассчитанное по модели их изменение при повышении температуры на 2°С. *NN* – число точек (метеостанций), сменивших (●,●) и не сменивших (●,●) свой статус (в смысле принадлежности к ареалу, см. текст). ***c*** – ель, ***d*** – сосна.

падения NPP – уменьшение влажности почвы за счёт увеличения испаряемости из-за повышения температуры; для ели основная причина – увеличение сухости воздуха. Эти эффекты перекрывают прямое положительное влияние температуры на скорость ассимиляции.

Таблица 5.

Параметры, описывающие изменение ареалов пород при вариации температуры: средние по ареалу значения NPP, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$, и число точек внутри исходного, изменённого и общей части ареалов. Индексы «abs» и «rel» обозначают абсолютное и относительное изменение начальной величины

Параметр ареала	Береза	Лиственница	Ель	Сосна
$N^{+}(\delta T = 0^{\circ}\mathrm{C})$	1496	1333	1342	1457
$N^{+}(\delta T = 2^{\circ}\mathrm{C})$	1248	1069	987	1178
$\delta N^{+}_{\mathrm{abs}} // \delta N^{+}_{\mathrm{rel}}$	−248//−0.17	−264//−0.20	−355//−0.26	−273//−0.19
$NPP^{\mathrm{tot}}(\delta T = 0^{\circ}\mathrm{C})$	416	233	353	320
$NPP^{\mathrm{tot}}(\delta T = 2^{\circ}\mathrm{C})$	381	221	310	278
$\delta NPP^{\mathrm{tot}}_{\mathrm{abs}} // \delta NPP^{\mathrm{tot}}_{\mathrm{rel}}$	−35//−0.084	−12//−0.052	−43//−0.12	−42//−0.13
$NPP^{+\mathrm{comm}}$	1237	1046	971	1174
$NPP^{\mathrm{comm}}(\delta T = 0^{\circ}\mathrm{C})$	459	250	416	360
$NPP^{\mathrm{comm}}(\delta T = 2^{\circ}\mathrm{C})$	383	223	314	279
$\delta NPP^{\mathrm{comm}}_{\mathrm{abs}} // \delta NPP^{\mathrm{comm}}_{\mathrm{rel}}$	−76//−0.17	−27//−0.11	−102//−0.25	−81//−0.23

Таблица 6.

Исследование вклада трёх факторов в суммарное изменение NPP. Дано отклонение от базового значения, т.е. величина $\delta NPP = NPP(\delta T = 0) - NPP(\partial T, \partial D, \partial W_S)$. Вариация с индексом «0»: фактор равен базовому значению при $\delta T = 0$; индекс «2»: фактор взят при значении при $\delta T = +2^{\circ}\mathrm{C}$.

Сценарий	Береза	Лиственница	Ель	Сосна
∂T0 ∂D0 $\partial W_S 0$	0	0	0	0
∂T2 ∂D2 $\partial W_S 2$	−35	−12	−43	−42
∂T2 ∂D0 $\partial W_S 2$	−16	−1	−8	−30
∂T2 ∂D0 $\partial W_S 0$	+31	+20	36	13
∂T0 ∂D0 $\partial W_S 2$	−45	−18	−41	−39
∂T0 ∂D2 $\partial W_S 0$	−16	−14	−53	−13

Результаты модельных прогнозов глобальной и региональной продуктивности при изменении глобального климата несколько противоречивы. Аккуратное сравнение результатов затруднительно из-за различия включаемых в рассмотрение факторов и механизмов. Из существенных для нас результатов отметим прогнозируемый сдвиг

к северу и уменьшение площади зоны бореальных лесов; сдвиг южной границы происходит из-за уменьшения влажности. *NPP* может как расти, так и падать (Nemani et al., 2003; Lucht et al., 2006; Sitch et al., 2008). Более тонкий анализ (Lapenis et al., 2005), учитывающий адаптивные реакции деревьев (и предполагающий рост осадков) предсказывает рост *NPP*.

Обсуждение

Современные представления и их модельная формализация позволяют установить связь климатических параметров с чистой первичной продукцией (*NPP*) древесных растений, и использовать её для изучения существенных экологических характеристик лесных пород. В частности, можно найти реакцию *NPP* на вариацию климатических факторов по-отдельности, что ранжирует их по значимости, а также реакцию при каких-либо климатических сценариях.

По существу, мы пытаемся дать экофизиологическое обоснование того, где вид может произрастать сейчас, а также того, как изменится его ареал и продуктивность при вариациях климата (связанных с изменением температуры воздуха).

Построенные карты показывают приемлемое визуальное соответствие наблюдаемых и расчётных распределений для березы и сосны, и среднее по качеству для лиственницы и ели (рис. 1, *a*–*d*). Области заметных несовпадений ареалов заслуживают специального экологического анализа, причём это относится как к самой модели, так и к наблюдаемым ареалам, выделение которых зависит от принятых критериев принадлежности. Вообще говоря, каждая такая область имеет свой «механизм несоответствия». Для нескольких сильных расхождений можно предложить правдоподобные причины. Для лиственницы модель указывает большу́ю, реально не заселённую территорию в Европейской части России. Лиственница в культурах растёт здесь хорошо, а отсутствие её объясняется не малой продуктивностью (и, как следствие, плодовитостью), а трудностью прорастания семян (Усольцев, 2008). Большой регион на севере Казахстана, заходящий в Россию, указан моделью как необитаемый для березы и сосны, но охватывается их эмпирическими ареалами. По крайней мере для березы известно, что она обитает здесь на очень небольшой части территории, приуроченной к понижениям, собирающим воду (Ткаченко, 1952). Возможно, что аналогичная ситуация имеет место в центральной части восточной Сибири и вокруг Байкала и в Забайкалье: для лиственницы, ели и сосны модель даёт слабо обитаемую территорию, которая принадлежит эмпирическому ареалу. Реальная представленность ели и сосны в этом регионе очень мала. По данным Гослесфонда на территории, например, Якутии,

лиственницей как преобладающей породой занято 76% лесных земель, а береза, ель и сосна занимают, соответственно, 1,3%, 0,25%, 6,8%. В Забайкальском крае ель отсутствует, а береза, лиственница и сосна занимают, соответственно, 10%, 59%, 10 %. Расчёт для ели показывает большую потенциально обитаемую территорию вне эмпирического ареала на северо–востоке Восточной Сибири; вполне возможно, что это несовпадение устранится при включении в модель вечной мерзлоты.

Строгого совпадения наблюдаемых и расчётных ареалов нельзя было ожидать по ряду причин.

Во-первых, заведомо не полон список климатических факторов, учтённых в модели (например, отсутствует вечная мерзлота и другие параметры почв).

Во-вторых, ко всем громадным ареалам применены значения параметров, найденные для лиственницы, ели, сосны по измерениям в одном месте – Предбайкалье. Несомненно, что каждый вид имеет определённый диапазон возможной адаптации, которая осуществляется в зависимости от местных условий произрастания; в модельных терминах это означает изменение видовых параметров.

И наконец, наш подход даёт оценку аутоэкологического, а не синэкологического ареала; фактическая распространённость породы зависит от конкурентных взаимодействий с видами, чьи аутоэкологические ареалы перекрываются с данным.

Что касается факторов, определяющих северную и южную границы обитания, то возникновение первой общепринято объяснять низкими температурами и малым количеством радиации, а второй – сухостью почвы и воздуха. Последнее подтверждается найденным выше сдвигом южных границ из-за уменьшения влажности почвы.

Результат эксперимента с увеличением температуры в случае елью говорит, по-видимому, о том, что параметры температурных зависимостей требуют изменения для лучшего описания Европейской части ареала. Подстройка параметров возможна и для других пород.

Что касается прогнозных расчётов *NPP*, то мы должны ожидать изменения *NPP* даже при постоянном климате из-за неравновесного возрастного состояния лесов в начальный момент расчёта. Наши предварительные расчёты с использованием данных государственного учёта лесного фонда (неопубл.) говорят о примерно 20% увеличении запаса углерода в лесах РФ к 2050 году за счёт лесной динамики как таковой (величину 0,2 можно считать мерой неравновесности нынешнего состояния). Расчёт по совместному сценарию «лесная + климатическая динамика» был проведён, например, Кокориным и др. (2000) и может быть, в принципе, воспроизведён с использованием нашей модели.

Заключение

С помощью математической модели была вычислена продуктивность четырех древесных пород, типичных представителей бореальных лесов России. Определены точки, в которых эти виды могут существовать при современном климате и дан прогноз сдвига изменений продуктивности при повышении температуры воздуха на 2°С. Потенциальные ареалы для берёзы, лиственницы, ели и сосны (часть географического пространства, где *NPP* превышает минимально допустимые значения), найденные с помощью модели, удовлетворительно совпали с реально существующими ареалами распространения пород. Наивысшая продуктивность пород отмечена около 55° с. ш., а также в горных лесах около 40° с. ш. При повышении температуры прогнозируется сдвиг южной границы распространения пород к северу, а также общее снижение продуктивности по всему ареалу.

Исчезновение или же нежелательное сокращение/сдвиг ареалов древесных растений основных лесообразующих пород может служить одним из критериев для оценки критических (предельно–допустимых) изменений концентраций парниковых газов и климата. С этой точки зрения дальнейшее развитие исследований сулит определённые перспективы для прогноза влияния различных антропогенных факторов на состояние растительности.

Благодарность

Авторы глубоко благодарны Э.Я. Раньковой за помощь в получении и интерпретации метеоданных, и С.М. Семёнову за постановку задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас лесообразующих пород СССР. М.: Лесная промышленность, 1988, 152 С.

Базилевич Н. А. 1993. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука. 293 С.

Барашкова Е. П., Гаевский В. Л., Дьяченко Л. Н., Лугина К. М., Пивоварова З. И. 1961. Радиационный режим территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 528 С.

Ванин А. И. 1960. Дендрология. М., Л.: Гослесбумиздат. 247 С.

Варлыгин Д. Л., Базилевич Н. И. 1992. Связи продукции зональных растительных формаций мира с некоторыми параметрами климата. Известия РАН, серия географическая. № 1. С. 23–32.

Голубятников Л. Л, Денисенко Е. А. 2007. Модельные оценки влияния изменений климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России. Известия РАН. сер. геогр. № 2. С. 212–228.

Израэль Ю. А. 2004. О концепции опасного антропогенного воздействия на климатическую систему и возможностях биосферы. Метеорология и гидрология. № 4. С.30–37.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Анисимов О. А., Анохин, Ю. А., Величко А. А., Ревич Б. А., Шикломанов И. А. 2007. Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата: вклад Рабочей группы II. Метеорология и гидрология. № 9. С. 5–13.

Кокорин А. О., Лелякин А. Л., Назаров И. М. 2000. Моделирование углеродного цикла в лесных экосистемах России. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. т. XVII. СПб.: Гидрометеоиздат. С. 142–157.

Корзухин М. Д., Выгодская Н. Н., Милюкова И. М., Татаринов Ф. А., Цельникер Ю. Л. 2004. Применение объединённой модели фотосинтеза и устьичной проводимости к анализу ассимиляции углерода елью и лиственницей в лесах России. Физиология растений. Т. 51, вып. 3. С. 341–354.

Коропачинский И. Ю. 1983. Древесные растения Сибири. Новосибирск: Наука, СО. 382 С.

Моисеев Б. Н., Алябина И. О. 2007. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России. Изв. РАН. Сер. географическая. № 5. С. 1–12.

Нильссон С., Ваганов Е. А., Швиденко А. З., Столбовой В., Рожков В. А., Мак-Каллум И., Йонас М. 2003. Углеродный бюджет растительных систем России. ДАН. Т. 393, №.4. С. 541–543.

Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. 1986. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, СО. 226 С.

Попов Л. В. 1982. Южнотаежные леса Средней Сибири. Иркутск: Изд-во Иркутского Университета. 330 С.

Ткаченко М. Е. 1952. Общее лесоводство. М., Л.: Гослесбумиздат. 599 с.

Молчанов А. Г. 2007. Баланс CO_2 в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. М.: ЗАО «Гриф и Ко». 283 С.

Соколов С. И., Связева О. А., Кубли Б. А. Ареалы деревьев и кустарников СССР. Л.: Наука 1977. 164 С.

Суворова Г. Г., Щербатюк А. С., Янькова Л. С. 2004 а. Особенности изменения дневной фотосинтетической продуктивности у хвойных. I. Лиственница сибирская. Сибирский экологический журнал. № 1. С. 67–72.

Суворова Г. Г., Щербатюк А. С., Янькова Л. С. 2004б. Особенности изменения дневной фотосинтетической продуктивности у хвойных. II. Ель сибирская и сосна обыкновенная. Сибирский экологический журнал. № 1. С. 73–79.

Усольцев В. А. 2002. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН. 762 С.

Усольцев В. А. 2007. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН. 640 С.

Усольцев В. А. 2008. Этюды о наших лесных деревьях. Екатеринбург: Банк культурной информации. 183 С.

Цельникер Ю. Л., Малкина И. С., Завельская Н. А. 2002. Географические аспекты фотосинтеза у лесных деревьев России. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. т XVIII. СПб: Гидрометеоиздат. С. 91–108.

Цельникер Ю. Л., Корзухин М. Д., Суворова Г. Г., Янькова Л. С., Копытова Л. Д., Филиппова А. К. 2007. Анализ влияния факторов среды на фотосинтез хвойных Предбайкалья. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXI. СПб.: Гидрометеоиздат. С. 265–292.

Швиденко А .З., Щепаченко Д. Г., Ваганов Е. А., Нильсон С. 2008. Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка. Доклады Академии Наук. Т. 421, №.6. С. 822–825.

Berthelot M., Friedlingstein P., Ciais P., Monfray P., Dufresne J. L., Le Treut H., Fairhead L. 2005. Global response of the terrestrial biosphere to CO_2 and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. Global Biogeochemical Cycles. V. 16, №4, P. 959–970.

Cai T., Dang Q.-L. 2002. Effects of soil temperature on parameters of a coupled photosynthesis stomatal conductance model. Tree Physiology. V. 22, №8. P. 819–828.

Cao M., Woodward F. I. 1998. Net primary and ecosystem production and carbon

stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Global Change Biology. V. 4, №2. P. 185–198.

Chytrý M., Danihelka J., Ermakov N., Hájek M., Hájková P., Kočí M., Kubesová S., Lustyk P., Otýpková Z., Popov D., Řoleček J., Rezníková M., Smarda P., Valachovič M. 2007. Plant species richness in continental southern Siberia: effects of pH and climate in the context of the species pool hypothesis. Global Ecology and Biogeography. V. 16, № 5. P. 668–678.

Cramer W., Kicklighter D. W., Bondeau A., Iii B. M., Churkina G., Nemry B., Ruimy A., Schloss A. L., The Participants of The Potsdam NPP Model Intercomparison. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. Global Change Biology, v. 5 S1. P. 1–15.

Cramer W., Bondeau A., Woodward F. I., Prentice I.C., Betts R. A., Brovkin V., Cox P. M., Fisher V., Foley J. A., Friend A. D., Kucharik C., Lomas M. R., Ramankutty N., Sitch S., Smith B., White A., Young-Molling C. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO2 and climate change: results from six dynamic global vegetation models. Global Change Biology. V. 7, № 4. P. 357–373.

Dang Q.-L., Cheng S. 2004. Effects of soil temperature on ecophysiological traits in boreal trees. Forest Ecology and Management. V. 194. P. 379–387.

De Lucia E. H., Drake J. E., Thomas R. B., Gonzalez-Meler M. 2007. Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production? Global Change Biology. V. 13, №6. P. 1157–1167.

Farquhar G. D., von Caemmerer S., Berry J. A.. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. Planta. V. 149. P. 78–90.

Foley J. A. 1995. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. Tellus. V. B 47, №3. P. 310–319.

Foley J. A., Prentice I. C., Ramankutty N., Levis S., Pollard D., Sitch S., Haxeltine A. 1996. An Integrated Biosphere Model of Land Surface Processes, Terrestrial Carbon Balance, and Vegetation Dynamics. Global Biogeochemical Cycles. V. 10, №4. P. 603–628.

Gerber S., Joos F., Prentice I. C. 2004. Sensitivity of a dynamic global vegetation model to climate and atmospheric CO_2. Global Change Biology. V. 10, №8. P. 1223–1239.

Gifford R. M. 2003. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon–cycle research. Functional Plant Biology. V. 30, №2. P. 171–186.

Grace J. 2004. Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology. V. 92, №2. P. 189–202.

Jarvis P. G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical Transactions of Royal Society of London, Ser. B. V. 273, №3. P. 693–610.

Jung M., Verstraete M., Gobron N., Reichstein M., Papale D., Bondeau A., Robustell M., Pinty B. 2008. Diagnostic assessment of European gross primary production. Global Change Biology. V. 14, №10. P. 2349–2364.

Kaminski T., Knorr W., Rayner P. J., Heimann M. 2002. Assimilating atmospheric data into a terrestrial biosphere model: A case study of the seasonal cycle. Global Biogeochemical Cycles. V. 16, №4. P. 1066.

Kicklighter D. W., Bondeau A., Schloss A. L., Kaduk J., Mcguire A. D. Participants of the Potsdam NPP Model Intercomparison. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. Global Change Biology. V. 5 (Suppl 1). P. 16–24.

Kimball J. S., Zhao M., McDonald K. C., Running S.W. 2006. Satellite Remote Sensing of Terrestrial Net Primary Production for the Pan-Arctic Basin and Alaska. Mitigation and Adaptation strategies for Global Change. V. 11, №4. P. 783–804.

Knorr W., Heimann M. 2001. Uncertainties in Global Terrestrial Biosphere Modeling, 1. A Comprehensive Sensitivity Analysis With a New Photosynthesis and Energy Balance Scheme. Global Biogeochemical Cycles. V. 15, №1. P. 207–225.

Kolchugina T. P., Vinson T. S. 1993. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomes in the Former Soviet Union. Water, Air, and Soil Pollution. V. 70, №1–4. P. 207–221.

Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., Ogée J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I. C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. Global Biogeochemical Cycles. V. 19. GB1015.

Kucharik C. J., Foley J. A., Delire C., Fisher V. A., Coe M. T., Lenters J. D., Young–Molling C., Ramankutty N., Norman J. M., Gower S.T. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. Global Biogeochemical Cycles. V. 14, №3. P. 795–825.

Lapenis A., Shvidenko A., Shepachenko D., Nilsson S., Aiyyer A. 2005. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate. Global Change Biology. V. 11, №12. P. 2090–2102.

Lucht W., Schaphoff S., Erbrecht T., Heyder U., Cramer W. 2006. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change. Carbon Balance and Management. V. 1. p. 1–7.

Matthews H. D., Eby M., Ewen T., Friedlingstein P., Hawkins B. J. 2007. What determines the magnitude of carbon cycle-climate feedbacks? Global Biogeochemical Cycles. V. 21: GB2012.

McMurtrie R. E., Rook D. A., Kelliher F. M. 1990. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen. Forest Ecology and Management. V. 31. P. 381–413.

Nemani R. R., Keeling C. D., Hashimoto H., Jolly W. M., Piper S. C., Tucker C. J., Myneni R. B., Running S. W. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science. V. 300(5625). P. 1560–1563.

Running S. W., Nemani R. R., Heinsch F. A., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H. 2004. A continuous satellite derived measure of global terrestrial primary production. BioScience. V. 54, №6. P. 547–560.

Sitch S., McGuire A. D., Kimball J., Gedney N., Gamon J., Engstrom R., Wolf A., Zhuang Q., Clein J., McDonald K. C. 2007. Assessing the carbon balance of circumpolar Arctic tundra using remote sensing and process modeling. Ecological Applications. V. 17, №1. P. 213–234.

Sitch S., Huntingford C., Gedney N., Levy P. E., Lomas M., Piao S. L., Betts R., Ciais P., Cox P., Friedlingstein P., Jones C. D., Prentice I.C., Woodward F. I. 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). Global Change Biology. V. 14, №9. P. 2015–2039.

Spitters C. J. T., Toussaint H. A. J. M., Goudriaan J. 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. Agricultural and Forest Meteorology. V. 38. P. 217–229.

Sutherst R. W. 2003. Prediction of species geographical ranges. Journal of Biogeography. V. 30. P. 805–816.

Tchebakova N. M., Gerald E. R., Parfenova I. E. 2006. Impacts of climate change on distribution of *Larix* spp and *Pinus sylvestris* and their climatypes in Siberia. Mitigation and Adaptation strategies for Global Change. V. 11, №4. P. 861–882.

Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. – Summary for Policymakers. 2007, http://www.ipcc.ch/.

ВРЕДНЫЕ САРАНЧОВЫЕ НА ЮГЕ РОССИИ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ РАЗМНОЖЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ

***Е.Н. Попова*[1], *И.О. Попов*[2]**

[1] Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29, Институт географии РАН, en_popova@mail.ru

[2] Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН

Реферат. Дана общая характеристика биологии, распространения и вспышек массового размножения вредных саранчовых на территории бывшего СССР. Выделены климатические факторы, влияющие на размножение и развитие основных видов вредных саранчовых, а также приведены некоторые способы прогнозирования вспышек массового размножения саранчовых с использованием климатических показателей. Исходя из данных об ареале одного из наиболее опасных и часто встречающихся в России видов саранчовых – итальянского пруса, рассчитаны оптимальные для этого вида климатические условия: годовая сумма среднесуточных температур воздуха, превышающих 10°С, должна быть от 2250 до 3500°С, а сумма осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) – от 100 до 280 мм. Показано, что в 1986–2005 гг. по сравнению с 1956–1975 гг. в регионах, главным образом подверженных нашествию саранчовых с конца 1980-х годов и по настоящий момент, первый индекс увеличился, а второй также увеличился или же остался неизменным. Предложена перспективная оценка массового размножения и распространения вредных саранчовых на территории России при условии дальнейшего потепления климата.

Ключевые слова. Вредные саранчовые, массовое размножение, распространение, изменение климата.

HARMFUL LOCUSTS OF SOUTH RUSSIA AND CLIMATIC FACTORS AFFECTING THEIR REPRODUCTION AND DISTRIBUTION

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

[1] Institute of Geography, Russian Academy of Science, 29, Staromonetny per., 109017, Moscow, Russia, en_popova@mail.ru

[2] Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str, 107258 Moscow, Russia, igor_o_popov@mail.ru

Abstract. An overview of biology, distribution and outbreaks of harmful locusts within the former USSR territory is presented. Climatic fac-

tors influencing the reproduction and development of major species of harmful locusts are identified. Some methodologies for the forecasting of locust outbreaks based on climatic predictors are given. On the basis of existing data on Italian locust (*Calliptamus italicus* L.) range the optimal climatic parameters for the species are quantified. Namely, a sum of daily mean surface air temperatures exceeding 10°C should be from 2250 to 3500°C, and precipitation total over the vegetation period (April-September) should be from 100 to 280 mm. It is found that for major regions subjected to invasions of locusts since late 1980s to present the former index increased in 1986–2005 vs. 1956–1975, while the latter one increased or remained unchanged. A projection of mass reproduction and distribution of harmful locusts under further climate warming in Russia is proposed.

Keywords. Harmful locusts, mass reproduction, distribution, climate change.

Введение

Все живые организмы в той или иной степени зависят от климатических факторов. Изменения глобального климата, произошедшие за последние полтора века, в особенности во второй половине XX века, неизбежно должны приводить к изменению ареалов и численности видов. Подобные изменения могут иметь как положительный, так и негативный характер для человека. Расширение ареалов к северу и увеличение численности сельскохозяйственных вредителей, связанное с изменением климатических условий в благоприятную для их жизнедеятельности сторону, может наносить существенный ущерб сельскохозяйственным растениям, значительно снижать их урожай. Так, массовое размножение саранчовых в России в последнее десятилетие XX века приобрело настолько серьезный масштаб, что заставило ученых и практиков защиты растений вплоть до Министерства Сельского Хозяйства России снова обратить внимание на эту серьезную, но отчасти забытую проблему. Текущая вспышка массового размножения охватывает фактически все степные регионы юга России и во многом вызвана климатическими факторами, связанными с общим потеплением климата. В связи с этим, целью настоящей работы стало выявление климатических изменений, произошедших в последние десятилетия, которые могли стать причиной столь существенного подъема численности и расширения территории массового распространения вредных саранчовых насекомых.

Метод

По литературным данным были составлены разделы о распространении и вспышках массового размножения вредных саранчовых на территории России, и о климатических факторах, влияющих на их распространение, размножение и развитие.

На основе отобранных климатических параметров (годовая сумма активных среднесуточных температур воздуха, превышающих 10°С, и количество осадков (мм) за вегетационный период (апрель-сентябрь)) были построены соответствующие временные ряды климатических данных для различных регионов России. При этом в качестве исходной метеорологической информации использовали ряды суточных данных измерений температуры воздуха и количества осадков (мм), полученных из сети 223 метеорологических станций международного обмена, расположенных на территории бывшего СССР. Такие ряды были депонированы Всероссийским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета) в сети INTERNET для свободного использования (http://www.meteo.ru). Результаты изменений климата и методика их выделения представлены в следующих работах: (Семенов, Гельвер, 2002, Семенов и др., 2006).

Далее полученные ряды использовали для построения климатических карт с помощью программы MapInfo Professional 7.0 SCP. Построенные карты позволили выявить изменения климатических параметров, влияющих на размножение и развитие вредных саранчовых, за выделенные периоды, а именно в 1986–2005 гг. по сравнению с 1956–1975 гг.

Результаты и обсуждение

Общая характеристика саранчовых, распространение и массовые вспышки численности наиболее опасных из них на территории России

Надсемейство саранчовых составляет самую многочисленную группу среди прямокрылых насекомых и насчитывает около 10 тыс. видов, обитающих на всех пяти материках. В России и других странах СНГ известно до 485 видов. Жизненные формы саранчовых могут быть объединены в два класса: обитатели растений, или *фитофилы*, и обитатели открытых участков поверхности почвы, или *геофилы*. Среди фитофилов различают *хортобионтов* – обитают в толще травянистого покрова и питаются преимущественно травянистыми растениями (именно они являются вредителями сельскохозяйственных растений), и *тамнобионтов*, живущих на кустарниках и деревьях. По образу жизни вредные саранчовые представлены следующими формами: стадными (называемыми собственно саранчой) и нестадными (именуемыми кобылками). Стадные виды при массовом размножении живут скрыто, группируясь в кулиги (скопления личинок) или стаи (скопления взрослых). У стадных саранчовых наблюдается явление так называемой фазовой изменчивости, сущность кото-

рой заключается в изменении внешнего облика и физиологических функций насекомого в зависимости от степени скученности и других условий в процессе развития. При высокой скученности развивающихся особей данного вида возникает стадная фаза, а при развитии в разреженной популяции – одиночная (Правдин, 1969).

Годы массового размножения саранчи надолго остаются в памяти людей как стихийное бедствие. Саранча практически всеядна. В старых источниках говорится, что «немногие только растения остаются ею нетронутыми, а при недостатке пищи она довольствуется даже древесной корою и набрасывается на соломенные крыши и паруса» (цит. по: Бондарев, 2003). Она не только пожирает растения в огромных количествах, но, повреждая их, создает «ворота», через которые в организм растения проникают возбудители инфекции и паразиты. От этого погибает в 5 – 10 раз больше живой фитомассы, чем пожирают ее насекомые (Бондарев, 2003).

Среди распространенных на территории бывшего СССР видов свыше 100 в той или иной мере могут вредить сельскохозяйственным культурам. Основной вред сельскохозяйственным растениям наносят стадные формы. Из них наиболее опасны – перелетная саранча *(Locusta migratoria* L.), мароккская саранча *(Dociostaurus maroccanus* Thunberg*)*, прус итальянский *(Calliptamus italicus* L.) и прус туранский *(C. turanicus* Tarbinski*)*, а также залетающая в некоторые годы из Ирана и Афганистана пустынная саранча (*Schistocerca gregaria* Forskal). Наибольший вред сельскому хозяйству на территории России из стадных форм наносят перелетная саранча и итальянский прус (Цыпленков, 1970; Липчанская, 2000; Столяров, 2005; Бондарев, 2003), а из нестадных – атбасарка (*Dociostaurus kraussi* Ikonnikov) и кобылки – крестовая (*Pararcyptera microptera* F.-W.), белополосая (*Chorthippus albomarginatus* De Geer) и чернополосая (*Oedaleus decorus* Germar) (Гриньков, Идрисхаджиев, 1994).

В России и других странах СНГ ареал перелетной саранчи, представленной здесь двумя подвидами – среднерусской *(Locusta migratoria rossica)* и азиатской *(Locusta migratoria migratoria)*, охватывает территории, простирающиеся на север примерно до 58–60° с. ш. Среднерусская саранча обитает в лесной и лесостепной зонах европейской части территории бывшего СССР. Она в массе размножается в жаркие и сухие годы. Однако наибольшую опасность представляет азиатская саранча. Зона вредоносности этой саранчи обычно не выходит на севере за пределы 55° с. ш., а зона постоянного массового размножения находится в пределах 40–48° с.ш. Однако от северной границы ареала и до 51° с.ш. азиатская саранча встречается редко и в массе не размножается, стадная фаза здесь отсутствует (Цыпленков, 1970). Постоянные гнездилища ее находятся в плавнях низовьев таких крупных рек, как Волга, Урал, Дон, Терек, Амударья, Сырда-

рья, а также по берегам крупных озер – Балхаша, Алаколя и Зайсана (рис. 1). Здесь она предпочитает заболоченные участки с густыми зарослями тростника, который становится излюбленной пищей азиатской саранчи в местах ее отрождения. Во время движения она вредит многим растениям, предпочитая культурные и дикорастущие злаки, а также, по мере взросления, может наносить большой вред капусте, арбузам, подсолнечнику и другим растениям (Правдин, 1969). Азиатская саранча одна из самых прожорливых. Подсчитано, что каждый экземпляр ее в течение своей жизни съедает 300 г зеленого корма. Потомство одной самки саранчи за лето уничтожает столько корма, сколько хватило бы для двух овец.

Ареал итальянского пруса значительно шире и занимает весь юг европейской части России, Среднее Поволжье, Кавказ и Закавказье, Среднюю Азию, Казахстан, юг Западной Сибири и западную часть Алтайского края. Однако зоны его массового размножения и вредоносности в центральных частях ареала ограничены типчаково-полынными, полынно-злаковыми растительными формациями, а на юге – оазисами и зонами поливного земледелия, где он в основном вредит техническим культурам. В южных районах Казахстана и Средней Азии встречается также туранский прус, однако, в отличие от итальянского пруса он в этих районах живет преимущественно на богаре и вредит злаковым культурам (Правдин, 1969; Цыпленков, 1970).

Мароккская саранча распространена в Средней Азии, Казахстане, на Кавказе, в Закавказье, Крыму, а за пределами бывшего СССР – в странах, окружающих Средиземное море, в Иране и Афганистане. Она повреждает многие растения, но особенно сильно вредит хлопчатнику, хлебным злакам, люцерне, огородным и бахчевым культурам.

Виды саранчовых, имеющие широкий ареал, охватывающий различные ландшафтные зоны, в разных частях области своего распространения заселяют разные места обитания (стации). Это явление получило название принципа зональной смены стаций (принцип Г. Я. Бей-Биенко, 1980). Оно объясняется, в основном, спецификой температурного режима и режима влажности в различных зонах. Выявлена следующая закономерность: такие виды в северной части своего ареала населяют более сухие (ксерофитные) стации, а по мере продвижения на юг они последовательно перемещаются в более влажные места обитания – сначала в мезофитные (со средним увлажнением), а затем в гигрофитные (сильно увлажненные). Так, например, перелетная саранча в Центрально-черноземной области и на юге Западной Сибири обитает на песчаных участках, а в пустынях Средней Азии и Казахстана – на побережьях рек, озер и морей в зарослях тростника. Итальянский прус на юге лесной зоны поселяется на меловых обнажениях с разреженным растительным покровом, а в Средней Азии – в долинах рек, оазисах и предгорьях, почему его и называют там оазисным пру-

сом (Правдин, 1969). Зоны очагов размножения стадных саранчовых и путей их залета в XX веке приведены на рис. 1 (Правдин, 1969).

Массовые размножения саранчовых сопутствовали земледелию на территории России, особенно в южных ее регионах, с древнейших времен. Первое сообщение о саранче в русских летописях относится к 1008 г.; в дальнейшем она регулярно упоминается с XVI в. (Борисенков, Пасецкий, 1988, цит. по: Бондарев, 2003). Последствия нашествий саранчовых периодически, 10–15 раз за столетие, становились катастрофой для земледельцев, хотя до середины – конца XIX века из письменных сообщений трудно определить, появление какого конкретного вида саранчи в те или иные периоды принимало характер стихийного бедствия (Столяров, 2000). Особенно частое упоминание о саранчовых нашествиях стало появляться после смещения территориальных границ Российского государства к югу, когда в пределы России включались земли, часто подверженные этому бедствию. Так, почти все случаи появления саранчи в XIX в. приходятся на Бессарабию, Таврическую и Екатеринославскую губернии, которые были включены в состав России во второй половине XVIII в. Вместе с тем иногда саранча проникала далеко на север от ее обычного местонахождения. В 1531 г. она появилась в Западной Белоруссии, в 1646 г. – в Новгороде-Северском, в следующие два года распространилась на всю Украину, а в 1649–1650

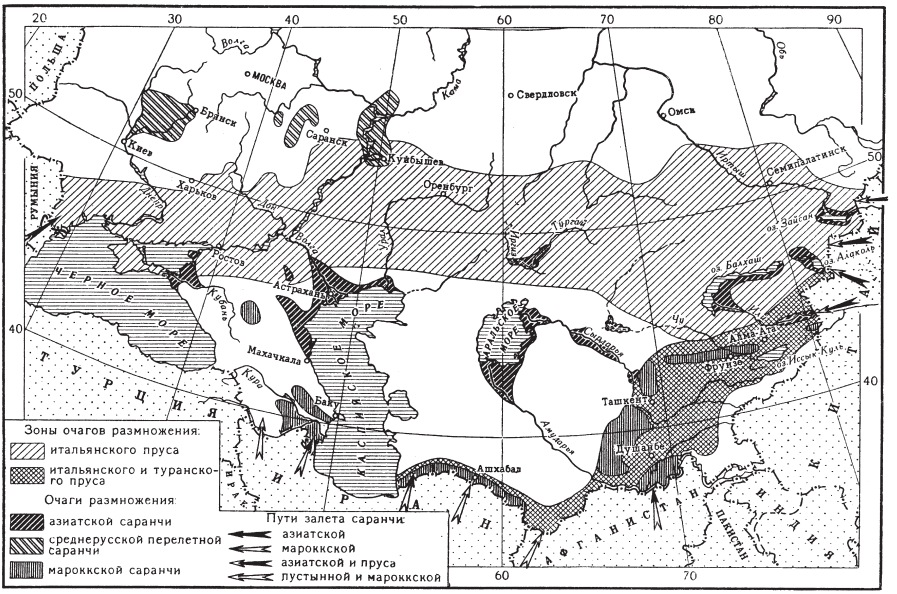


Рис. 1. Основные очаги массового размножения стадных форм саранчовых на территории СССР и путей их залета из сопредельных стран (Правдин, 1969).

гг. дошла до Тулы и Алексина. В 1799 г. под Черниговом насекомые местами покрывали землю слоем толщиной более аршина. В 1814 г. саранча наблюдалась в Смоленской губернии (Бондарев, 2003).

Начиная с конца 1980-х – начала 1990-х годов фактически во всех степных регионах юга России наблюдалось массовое размножение саранчовых. Появление саранчи отмечается в Среднем и Нижнем Поволжье (Саратовская, Астраханская, Волгоградская области), в Калмыкии, на Северном Кавказе и прилегающих к нему территориях. В 1993 г. после почти тридцатилетнего затишья вновь подвергся нашествию саранчи Ставропольский край. С 1997 г. нашествию саранчовых подверглись 16 субъектов Российской Федерации. Вредителями было заселено 924 тыс. га. Массовые очаги появились, в том числе, в Ростовской и Оренбургской областях, в Краснодарском крае, на юге Сибири (Столяров, 1998, 2000; Дентелинова, 2000; Липчанская, 2000; Полищук, Маленкова, 2001; Вошедский, Гаврилова, 2004; Сергеев, Ванькова, 2006). В 1999 г. в России общая площадь, где отмечались кулиги и стаи стадных саранчовых, составляла около 1 млн. га, а в Казахстане (с западными районами которого в годы инвазий происходит интенсивный «обмен» стаями пруса) достигла 3 млн. га (Столяров, 2000). При этом общая сумма прямых затрат на борьбу с саранчовыми только в Ставропольском крае за 1997 год составила около 2,8 млрд. руб. (Никитенко, 1998).

Следует отметить, что массовое размножение саранчовых подобного масштаба в России не отмечалось в течение многих десятилетий до текущей вспышки, хотя это явление на относительно ограниченных территориях в ряде очагов фиксировалось регулярно. При этом если до 1998 – 1999 гг. отмечались кулиги и стаи лишь итальянского пруса, то в последние годы активизировались и очаги перелетной (азиатской) саранчи (Столяров, 2000, 2005). В большинстве районов ареала наблюдается повышение численности и нестадных саранчовых.

Одной из причин такого массового и продолжительного размножения саранчовых, помимо экономических и региональных причин (сокращение и изменение структуры посевов, увеличение количества заброшенных земель, снижение поголовья овец и т.п.), ряд авторов считает общее потепление климата и увеличение числа жарких и засушливых лет в южных регионах России (Столяров, 1998, 2000, 2005; Вошедский, Гаврилова, 2004).

Так, в Поволжье и на Северном Кавказе выявлена достаточно четкая зависимость между массовыми размножениями перелетной саранчи *(L. migratoria* L.) и итальянского пруса *(Calliptamus italicus* L.) и значительными засухами в регионе (Захаров, 1950, цит. по: Столяров, 2000; Столяров, 2000, 2005). В табл. 1. представлены годы, сопровождающиеся засухами в Поволжье, и периоды массовых размножений перелетной саранчи и итальянского пруса на юге России за последние 100 лет.

Таблица 1.

Вспышки массовых размножений перелетной (азиатской) саранчи и итальянского пруса на юге России с начала XX века по настоящее время (Захаров, 1950, цит. по: Столяров, 2000; Столяров, 2005).

Годы значительных засух в Поволжье	Годы массовых размножений на юге России			
	перелетной (азиатской) саранчи		итальянского пруса	
	Период вспышки	Продолжительность вспышки, лет	Период вспышки	Продолжительность вспышки, лет
1911–1912	1912–1914	3	1911–1914	3
	1917–1919	3		
1920–1921	1921–1924	4	1920–1923	4
1927–1931	1927–1931	5	1931–1934	4
1936–1938	1936–1939	4	1940–1943	4
1944–1949	1943–1949	7	1954–1957	4
	1959–1962	4	1959–1962	4
			Стадная фаза лишь на Северном Кавказе и в прилегающих к нему районах	
			1972 –1974	3
			1982–1984	3
	1998–2002	5	1990-92–2002	10–12

Как видно из представленных в табл. 1 данных, интенсивным засухам в большинстве случаев сопутствовали и массовые размножения рассматриваемых видов вредителей. Следует также отметить беспрецедентную продолжительность вспышки массового размножения итальянского пруса на Северном Кавказе и в прилегающих к нему районах в 1990-92 – 2002 гг. Здесь мы вплотную подошли к вопросу о климатических факторах, оказывающих влияние на развитие, распространение и численность вредных саранчовых. Однако прежде, чем перейти к этому разделу, хотелось бы несколько подробнее остановиться на жизненном цикле саранчовых, который тесно связан с климатическими параметрами и сезонными изменениями.

Краткое описание жизненного цикла саранчовых

Все распространенные на территории бывшего СССР саранчовые имеют в году одну генерацию, причем большинство из них зимует в фазе яйца. Саранчовые – раздельнополы. Преобладающее большинство видов откладывает яйца в поверхностный слой почвы, прокапывая в нем с помощью короткого, состоящего из четырех створок яйцеклада, ход. При этом самка глубоко погружает брюшко в землю и выпускает порцию яиц, взвешенных в особой пенистой жидкости. Эти пенистые выделения, застывая, нередко цементируют частицы земли, окружающей кладку, вследствие чего формируется так называемая кубышка, представляющая собой капсулу, часто с твердыми землистыми стенками, внутри которой помещаются яйца (Правдин, 1969).

Развитие зародыша начинается сразу после откладки яиц, но затем у большинства видов на территории России прекращается еще до наступления холодов и возобновляется весной после перезимовки, т.е. имеет место эмбриональная диапауза. Период диапаузы в природных условиях обычно длится 8-9 месяцев. Отрождение саранчовых начинается весной после стаивания снега и достаточного прогревания почвы. У разных видов сроки отрождения несколько различаются между собой. Личинки перелетной саранчи отрождаются весной в первой половине мая; развиваются они в течение 35–40 дней, после чего происходит окрыление. Личинки прусов отрождаются в середине мая, а развитие их длится в течение 40–45 дней.

В Средней Азии в зоне пустынь личинки мароккской саранчи отрождаются в конце марта – начале апреля, а весь срок личиночного развития не превышает 25– 35 дней. Уже через 3–10 дней после окрыления начинается спаривание и откладка яиц. В это время мароккская саранча в течение суток совершает миграции, перелетая с мест откладки яиц – в предгорьях и нижней части склонов гор на сухих участках, где произрастают в основном эфемерные растения, – на пониженные, хорошо увлажненные участки с обильной растительностью, которая служит ей пищей. Установлено, что основным условием, благоприятствующим ее массовому размножению, является выпадение весенних осадков в сумме около 100 мм в период развития перезимовавших яиц и отрождения личинок.

Выходящая из яйца личинка имеет червеобразную форму. У нее есть особый кратковременно функционирующий орган – пульсирующий пузырь, с помощью которого она раздвигает частицы почвы и, совершая червеобразные движения, выходит на ее поверхность, где сразу линяет и превращается в личинку первого возраста. Отродившиеся личинки сначала имеют молочно-белую окраску тела, а затем, часа через 2–3, темнеют и становятся похожими на взрослое саранчо-

вое, отличаясь от него меньшими размерами, отсутствием крыльев и уменьшенным числом члеников усиков.

Личиночное развитие в зависимости от вида саранчового и условий среды длится 25–45 дней. За это время личинки линяют 4–5 раз, причем с каждой линькой у них увеличиваются размеры тела и крыловых зачатков, а также нарастает количество члеников усиков (рис. 2).

Всем саранчовым в той или иной мере свойственны различного типа миграции, осуществляемые путем переходов или перелетов. Хортобионты регулярно совершают вертикальные миграции, передвигаясь по растениям вверх и вниз в утренние и вечерние, а нередко

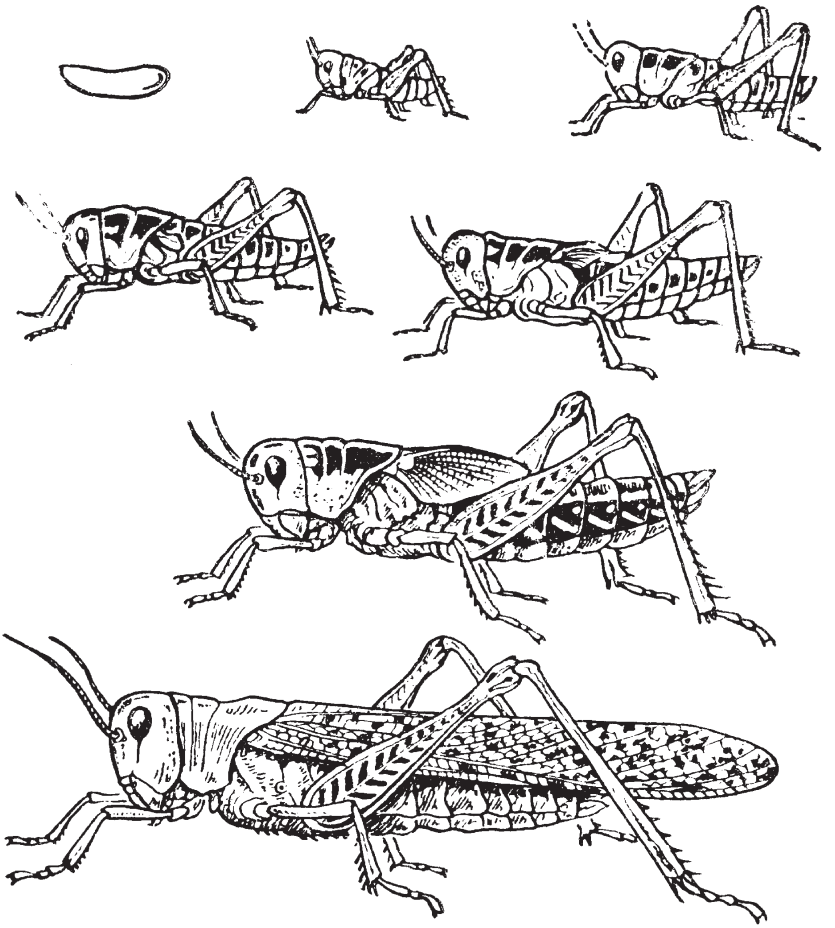


Рис. 2. Развитие перелетной саранчи (Правдин, 1969).

и в дневные часы суток. Мигрируют саранчовые и с участков, где они кормятся, в места, удобные для откладки яиц. Однако миграционные инстинкты особенно развиты у стадных видов, у которых активные переходы и перелеты осуществляются кулигами и стаями на большие расстояния. Как личинки, так и взрослые саранчовые ночуют обычно на верхних частях растений, где они пребывают в ночное время в состоянии холодового оцепенения. После восхода солнца по мере прогрева воздуха личинки становятся активными и концентрируются на освещенных участках почвы или иногда на растениях, образуя так называемые «солнечные кулижки». Это плотные скопления неподвижно сидящих личинок, в которых каждая особь тесно прижимается к соседним. Первичные «солнечные кулижки» образуются личинками, отрождающимися из одной кубышки. Как только температура тела находящихся совместно особей поднимается выше 40°С, кулижки рассеиваются и начинается пешая миграция, которая прекращается вечером, когда личинки опять впадают в состояние покоя. В жаркое время дня, в случае если температура тела насекомого поднимается выше 50°С, наступает дневной период тепловой депрессии, в котором также наблюдается состояние относительного покоя (Правдин, 1969).

В годы массового размножения образуются настолько крупные кулиги, что занимаемая ими площадь может достигать размеров сотен и тысяч гектаров. В период личиночного развития кулиги все время находятся в состоянии миграционной активности, передвигаясь с мест отрождения в сторону участков с более благоприятными условиями температуры, влажности и питания. В результате за период личиночной жизни стадные саранчовые могут проходить очень большие расстояния – до 30 км и больше, как это имеет место, например, у азиатской саранчи. Характерно, что движение кулиги имеет определенное направление и осуществляется обычно в сторону, противоположную направлению ветра. Оптимальные условия для движения создаются при небольшом ветре (3–5 м/сек); при порывистом или сильном ветре, превышающем 10 м/сек, движение кулиг прекращается. После окрыления саранчи ее передвижения принимают вид миграционных полетов, когда стаи перелетают за день расстояние в несколько десятков километров (Правдин, 1969).

Климатические факторы, влияющие на размножение, развитие и распространение вредных саранчовых

Массовые размножения саранчовых тесно связаны с климатическими факторами – температурой, солнечной активностью и влажностью, хотя влажность имеет несколько меньшее значение (Цыпленков, 1970).

Стимулом для начала массового размножения вредных саранчовых на юге России являются повышенные температуры и пониженное количество осадков весенне-летних периодов по сравнению со средними многолетними. Однако масштабы самой вспышки в основном определяются спецификой местных условий, сложившихся на конкретной территории в определенный период: количеством и сроками выпадения осадков, динамикой температурного режима, особенностями развития травостоев, деятельностью паразитов и хищников, интенсивностью антропогенных воздействий и т.п. (Столяров, 2000).

Активная жизнедеятельность саранчовых проходит при определенной температуре, которая меняется в пределах 10–55°С для разных видов при оптимуме около 30–40°С. Для сибирской кобылки и некоторых других видов кобылок оптимальные температуры находятся в диапазоне 20-30°С (Винокуров, 1949). Температуры менее –5°С и более 70°С обычно вызывают гибель саранчовых (Цыпленков, 1970).

Нижний температурный порог развития саранчовых – около 10°С (Цыпленков, 1970; Гаппаров, 1987). Однако он варьирует у разных видов. Нижний температурный порог развития отдельных представителей саранчовых можно определить с помощью правила суммы температур, применяющегося для выражения закономерностей развития у насекомых. Однако оно действует в пределах оптимальной температурной зоны их развития. Это правило выражается в виде следующей формулы (Винокуров, 1949):

$$(T - k) \cdot n = (T' - k) \cdot n' = const,$$

где T и T' – активные температуры, n и n' – продолжительность развития при этих температурах соответственно, k – нижний, холодовой порог развития. Разности между активными температурами и порогом развития называются эффективными температурами. Таким образом, правило суммы температур можно сформулировать так:

произведение эффективной температуры на продолжительность эмбрионального развития есть величина постоянная для данного вида насекомого или тепловая константа, иначе называемая суммой тепла.

Определив экспериментальным путем продолжительность развития выбранного вида саранчи при двух заданных температурах, можно рассчитать нижний температурный порог развития этого вида по формуле (Винокуров, 1949):

$$k = \frac{T \cdot n - T' \cdot n'}{n - n'}.$$

На основе составленной им формулы Винокуров (1949) вычислил температурные критерии для сибирской кобылки – нижний температурный предел развития которой оказался равен 10,8°С, а сумма

тепла, необходимая для ее эмбрионального развития (от прерывания диапаузы до вылупления яиц) составила 2785°С · час. Эти же критерии применимы и к некоторым другим видам вредных кобылок – темнокрылой, белополосой, крестовой, бескрылой (Винокуров, 1949).

В соответствии с этим же правилом Сафаровой (1987) было рассчитано, что нижний температурный порог развития яиц итальянского пруса равен 12°С, а соответствующая сумма эффективных температур, необходимых для развития эмбриона после зимовки – 4560°С · час (Сафарова, 1987).

Сумма эффективных температур является одним из наиболее часто применяемых прикладных климатических индексов при описании температурных критериев для насекомых. Он вычисляется как интеграл от превышения текущей температурой воздуха T некоторого порогового значения T_{tr} за календарный год – $\int \max\left((T-T_{tr}),0\right)dt$. Размерность этой величины есть °С · время. Однако в том случае, если этот прикладной климатический индекс вычисляется, исходя из среднесуточных значений температуры (т. е. интеграл заменяется суммой), то по традиции сумма эффективных температур часто дается просто в °С. То же самое относится и к сумме активных температур, под которой подразумевается сумма среднесуточных температур за заданный временной период.

Для разных регионов и видов для развития особей до появления личинок необходима сумма среднесуточных положительных температур (при пороге выше 10°С) от 220 до 440°С, до окрыления личинок – от 805 до 1540°С, до откладки яиц – от 1330 до 2490°С (Ермаков, 1998).

Для развития личиночной фазы мароккской саранчи требуется сумма эффективных температур с порогом 10°С, равная 250–260°С, а развитие зародыша завершается при наступлении суммы эффективных температур 130–150°С (Гаппаров, 1987). По данным Глушенкова и Лимоенкова (1935, цит. по: Винокуров, 1949), отрождение мароккской саранчи происходит при среднесуточной температуре воздуха около 15°С, причем этому должны предшествовать 3–4 пятидневки со среднесуточной температурой воздуха выше 10–11°С.

Личинки азиатской саранчи, нижний порог развития которой находится около 16,7°С (Кожанчиков, 1956, цит. по: Цыпленков, 1970), отрождаются при температуре почвы 20–40°С (Никольский, 1925, цит. по: Цыпленков, 1970). При температуре их тела около 25–30°С личинки азиатской саранчи начинают питаться и питаются, пока температура тела не поднимется до 38° или не упадет ниже 19°С (Стрельников, 1935, цит. по: Цыпленков, 1970). Если же личинки ощущают недостаток влаги или голодают они продолжают питаться и ночью при температуре воздуха около 15–16°С (Захаров, 1950, цит. по: Цыпленков, 1970).

Диапаузирующие яйца саранчовых имеют свой температурный оптимум, лежащий ниже холодового порога развития. Для яиц азиатской саранчи таким оптимумом является температура в пределах

0–4°С. Яйца азиатской саранчи теряют жизнеспособность при промораживании их до (–17)–(–21)°С. Критической положительной температурой для яиц является температура около 60°С (Цыпленков, 1970).

Проявление активности саранчовых наблюдается в ясные летние дни при температуре воздуха выше 10–12°С. С повышением температуры воздуха до 20°С активность саранчовых резко увеличивается, при температуре почвы выше 38°С начинаются миграции вначале отдельных особей, а затем и всей стаи саранчи. Миграции саранчи начинаются в то время, когда температура их тела находится в пределах 40–55°С. При температуре тела ниже 20°С саранча полетов не совершает и находится в состоянии относительного покоя на растениях или на почве. При температуре воздуха выше 40°С, а температуре почвы – выше 60°С, наступает период тепловой депрессии (Цыпленков, 1970). Здесь важно отметить, что температура воздуха и температура почвы отличаются друг от друга, особенно в дневные часы, когда открытые участки поверхности земли прогреваются значительно сильнее. Особенное влияние это оказывает на эмбриональное развитие саранчовых, которое может происходить при более низких, чем пороговые значения, среднесуточных температурах воздуха (Винокуров, 1949).

Некоторые публикации указывают также на важность фактора солнечной активности. Так, начала массового размножения азиатской саранчи в основных ее гнездилищах следует ожидать с момента наступления максимума солнечной активности. По мере спада солнечной активности вспышка усиливается и достигает своего наибольшего предела ко времени минимальной активности солнца, после чего она довольно резко регрессирует (Цыпленков, 1970; Столяров, 2005).

Влажность оказывает влияние на изменение содержания воды в тканях насекомого и тем самым сказывается на поведении саранчовых, их выживаемости и плодовитости. Саранчовые относятся к сухолюбивым насекомым. В годы с обильными осадками, сопровождающимися обычно холодной пасмурной погодой, эмбриональное развитие замедляется, а период отрождения сильно растягивается. При излишней влажности у саранчовых возникают грибные болезни, которые вызывают их массовую гибель. На эмбриональное развитие саранчовых непосредственное влияние оказывает влажность почвы: в сухой почве яйца высыхают, в сильно влажной – гибнут от загнивания. Однако небольшое увлажнение сухой почвы ускоряет развитие и усиливает отрождение. Недостаток влаги в период засух приводит саранчовых к гибели (Винокуров, 1949, Цыпленков, 1970).

Приведенные выше требования саранчовых к условиям среды обитания позволяют очертить их потенциальный ареал, определяемый климатом, а также помогают соотнести конкретные эпизоды массового размножения и миграции саранчи с наступлением определенных погодных условий.

Прогнозирование массового размножения и распространения вредных саранчовых при различных агроклиматических условиях

Миграция и массовое размножение саранчовых – процессы, существенно зависимые от погоды. Их ареал, долговременный уровень численности, цикличность вспышек массового размножения и депрессий в значительной степени определяются климатом и меняются вместе с ним. Проблема «погода – состояние популяций саранчовых» детально изучалась отечественными специалистами (Предтеченский, 1930; Рубцов, 1935; Винокуров, 1949; Цыпленков, 1970; Ермаков, 1998; Столяров, 2000, 2005).

Для прогнозирования численности саранчовых в зависимости от метеорологических условий мест обитания было предложено несколько методик. Важно отметить, что для массового размножения и появления вспышки численности вредных саранчовых в период длительной депрессии, особенно для таких видов, как итальянский прус и перелетная азиатская саранча, один, даже очень благоприятный для их развития по погодным условиям год не может привести к вспышке массового размножения. Однако это является четким сигналом для тщательных обследований в последующем, особенно в очагах обитания этих видов (Столяров, 2005).

Так, С. А. Предтеченским была разработана схема для учета численности перелетной среднерусской саранчи (*L. migratoria rossica* Uv. et Zol.), в которой учитываются погодные условия трех идущих друг за другом лет. Критериями прогноза начала массового размножения этого подвида саранчи в европейской части России могут быть годы со средней среднесуточной температурой воздуха за апрель – сентябрь выше 13,6°С и количеством осадков за тот же период около или менее 320 мм; эти условия являются благоприятными для размножения среднерусской перелетной саранчи. Напротив, резкому снижению их численности способствуют годы со средней среднесуточной температурой за апрель – сентябрь ниже 13,6°С и со значительно повышенным относительно 320 мм количеством осадков, особенно в весенний и позднелетний периоды (Предтеченский, 1930).

В качестве характеристики степени пригодности климата данного географического района для обитания нестадных саранчовых И. А. Рубцовым (1935) был предложен специальный индекс аридности:

$$A = \frac{r}{\Sigma T_{+} - 36}$$

Здесь r – годовая сумма осадков (мм), а ΣT_{+} есть сумма положительных среднемесячных значений температуры воздуха (°С) за теплое время года (апрель–сентябрь).

По данным И. А. Рубцова (1935), рассчитанным на основе предложенной им формулы, ареал наиболее постоянных резерваций сибирской кобылки характеризуется индексом аридности 6–8, временных резерваций 10–12; для белополосой и темнокрылой кобылок – выше на 2–3 единицы; для крестовой кобылки и пруса – около 5.

Размножение саранчовых находится в прямой зависимости от гидротермического режима мест их обитания. В благоприятные годы для развития наиболее распространенных видов саранчовых среднесуточная температура воздуха за май – август изменяется от 15,1 до 22,6°С, за июль – август (период откладки яиц) от 22 до 27°С, гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) – от 0,25 до 0,7. В неблагоприятные годы ГТК колеблется от 0,7 до 2,1 (Ермаков, 1998). По данным отдельных авторов (Ермаков, 1998; Столяров, 2005), благоприятными для развития итальянского пруса в большинстве районов являются годы с ГТК 0,3-0,5 при годовом количестве осадков 150–200 мм и сумме активных среднесуточных температур 2500–3000°С (при пороге 10°С). Два подобных года, следующих один за другим, обычно приводят к повышению численности итальянского пруса и формированию стадной фазы в очагах размножения. Умеренные численность и вред отмечены при ГТК 0,5–0,7, годовой сумме осадков 200–250 мм и сумме активных среднесуточных температур 2250–2500°С (при пороге 10°С). Однако следует отметить, что на территории России площадь районов с годовой суммой осадков ниже 200 мм ничтожно мала (рис. 3). Очевидно, здесь, также как у С. А. Предтеченского (1930), речь идет о сумме осадков за вегетационный период (апрель–сентябрь), что имеет первостепенное значение для саранчовых.

Изменения климата и распространение саранчовых

Изучив основные климатических параметры, влияющие на вредных саранчовых на территории нашей страны и их массовое размножение в последние годы, мы поставили перед собой задачу выяснить масштабы изменения этих параметров, которые могли бы оказать влияние на вспышки массового размножения саранчовых в последние десятилетия. Для оценки климатических факторов, влияющих на распространение и массовое размножение саранчовых, из перечисленных в предыдущих главах критериев, были выбраны годовая сумма активных среднесуточных температур воздуха (применялся порог 10°С) и количество осадков (мм) за вегетационный период (апрель-сентябрь). За основу был взят ареал массового размножения итальянского пруса, как наиболее опасного и занимающего наибольшую площадь вида на территории России. На рис. 1 в числе прочих представлен ареал массового размножения этого вида, наблюдавшийся к 1969 году (Правдин, 1969).

Рис. 3. Годовое количество осадков (мм) на территории России за период с 1946 по 1975 гг.

Чтобы выяснить, какими конкретными значениями климатических параметров обусловлен ареал массового размножения итальянского пруса, нами был составлен ряд карто-схем, где показаны части географического пространства с годовой суммой среднесуточных активных температур воздуха, превышающих 10°С, от 2250 до 3700°С и количеством осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) от 80 до 300 мм. Были использованы данные для периода 1956–1975 гг. – период составления карты (Правдин, 1969). Наилучшим образом ареал массового размножения итальянского пруса характеризовало сочетание следующих критериев: годовая сумма среднесуточных температур воздуха, превосходящих 10°С, должна находиться в интервале 2250–3500°С (рис. 4, 6), а количество осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) находится в интервале от 100 до 280 мм (рис. 5, 6). Далее, используя эти найденные параметры, мы рассчитали ареал массового размножения итальянского пруса по данным 1986–2005 гг. Оба расчетных ареала были нанесены на карту и проанализированы возникшие изменения (рис. 4–6).

На рис. 4 видно, что вследствие потепления изолиния годовой суммы активных температур 2250°С сместилась к северу (рис. 4), что стало благоприятным для итальянского пруса. Это характерно для юга европейской части России, Поволжья, юга Сибири (Алтайского края, Омской, Новосибирской и Оренбургской областей) и Республики Тыва. Именно в этих районах наблюдаются или прогнозируются вспышки массового размножения вредных саранчовых (Вошедский, Гаврилова, 2004; Дентелинова, 2000; Ермаков, 1998; Никитен-

ко, 1998; Липчанская, 2000; Полищук, Маленкова, 2001; Сергеев, Ванькова, 2006; Столяров, 1998, 2000, 2005). Смещение изолинии 3500°С·сут суммы активных среднесуточных температур к северу, по-видимому, оказывает незначительное влияние на саранчовых, т.к. они продолжают размножаться в более южных регионах (рис. 4).

При оценке изменения количества осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) была отмечена обратная тенденция. Для большинства «прусовых» районов в среднем за период 1986–2005 гг. количество осадков либо осталось неизменным, либо увеличилось по сравнению с 1956–1975 гг. (рис. 5). Возможно, это связано с тем, что увеличение числа засушливых лет, например, на Северном Кавказе, на которое указывает М. В. Столяров (2000, 2005), компенсируется годами с повышенным увлажнением. Также это может быть следствием меньшей зависимости саранчовых от влажности, чем от температурных условий, о чем упоминает Е. П. Цыпленков (1970) – небольшое увеличение количества осадков за вегетационный период при существенном повышении суммы активных температур не препятствует размножению и распространению вредных саранчовых.

В целом, изменение климатических параметров – увеличение годовой суммы активных температур и изменение количества осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) – привело к смещению границ модельного ареала итальянского пруса в 1986–2005 гг. по сравнению с 1956–1975 гг. (рис. 6). За период 1986–2005 гг. по сравнению с периодом 1956–1975 гг. северная граница модельного ареала значительно сместилась на север в Сибири и на Южном Урале.

Однако в западных областях на территории европейской части России и в некоторых южных регионах наблюдается сокращение площади модельного ареала итальянского пруса, что связано с увеличением количества осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) на европейской части России и с превышением годовой суммы активных температур воздуха выше 10°С порога 3500°С в южных областях.

В действительности же очаги массового размножения итальянского пруса в последние десятилетия наблюдаются и в Поволжье, и в Ставропольском и Краснодарском крае, и на юге Урала и Сибири, и в Казахстане (Столяров, 1998, 2000; Дентелинова, 2000; Липчанская, 2000; Полищук, Маленкова, 2001; Вошедский, Гаврилова, 2004; Сергеев, Ванькова, 2006 и др.). Таким образом, реальный ареал итальянского пруса продвинулся лишь на север. Это указывает на то, что верхние значения выявленных для временного интервала 1956-1975 гг. ограничивающих критериев – годовой суммы активных температур воздуха выше 10°С (3500°С) и количества осадков за вегетационный период (280 мм) – не являются лимитирующими факторами для массового распространения итальянского пруса и могут быть изменены в сторону некоторого увеличения.

Рис. 4. Области, где годовая сумма среднесуточных температур воздуха, превосходящих 10°С, находится в интервале 2250–3500°С: 1 – в период 1956–1975 гг.; 2 – в период 1986–2005 гг.; 3 – в оба периода. Точки, где значения показателя не входят в рассматриваемый интервал ни в один из указанных периодов, оставлены бесцветными – 0.

Рис. 5. Области, где количество осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь), находится в интервале 100–280 мм: 1 – в период 1956–1975 гг.; 2 – в период 1986–2005 гг.; 3 – в оба периода. Точки, где значения показателя не входят в рассматриваемый интервал ни в один из указанных периодов, оставлены бесцветными – 0.

Рис. 6. Области, где годовая сумма среднесуточных температур воздуха, превосходящих 10°С, находится в интервале 2250 – 3500°С и количество осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь), находится в интервале 100–280 мм: 1 – в период 1956–1975 гг.; 2 – в период 1986–2005 гг.; 3 – в оба периода. Точки, где значения показателей не входят в соответствующие интервалы ни в один из указанных периодов, оставлены бесцветными – 0.

Заключение

Потепление климата во многих обширных регионах Голарктики, в том числе и в России, особенно проявившееся в конце XX века и ожидаемое в XXI веке в соответствии со многими сценариями, способствует резким изменениям характера атмосферной циркуляции, колебаниям значений температуры и суммы осадков, способствует усилению частоты и продолжительности экстремальных метеорологических явлений (Climate Change 2007, 2007a, b).

И при аридном, и при гумидном потеплении на территории России в XXI веке темпы опустынивания (сейчас площадь пустынь ежегодно увеличивается на 6 млн. га) могут не снизится, как и продолжительность и интенсивность засух (Столяров, 2000, 2005; Золотокрылин, 2003, 2005). При сохранении подобных тенденций будет нарастать риск массовых размножений саранчовых. К тому же на юге России в ближайшее время вряд ли существенно уменьшится количество земель, выведенных из севооборота, а значит, и площадь вторичных очагов обитания стадных саранчовых в агроландшафтах существенно не уменьшится. При сохранении этих тенденций можно ожидать, что в последующее десятилетие риски для растениеводства, связан-

ные с саранчовыми, не исчезнут. Решающее значение в этом плане имеют природные, а не антропогенные факторы. Даже в отношении текущего размножения стадных саранчовых (которое происходит на фоне снижения обработок инсектицидами посевов, увеличения количества заброшенных и плохо обрабатываемых земель, сокращения объема овцеводства в степях и т.п. явлений, способствующих появлению дополнительных биотопов, благоприятных для обитания этих видов) доминирующее влияние хозяйственной деятельности на масштабы инвазии проблематично, поскольку началась она около 20 лет назад, когда сельское хозяйство на юге России было достаточно стабильным.

Существует также вероятность изменения ритмов динамики численности вредных саранчовых: увеличение продолжительности периодов массового размножения в циклах и сокращение периодов депрессии между вспышками. При таком развитии событий особое значение приобретает постоянный и качественный мониторинг (Столяров, 2000, 2005).

Имеющиеся предпосылки позволяют ожидать дальнейшего распространения и укоренения саранчовых не только в Ставропольском крае, Калмыкии, Волгоградской, Астраханской, Саратовской и Ростовской областях, но и в Омской и Читинской областях, Краснодарском и Красноярском краях, в Республике Тыва и ряде других регионов России (Ермаков, 1998).

Выводы

1. Ареал массового размножения итальянского пруса – одного из наиболее опасных и распространенных саранчовых на территории России – в целом описывается следующими климатическими критериями: годовая сумма среднесуточных температур воздуха, превосходящих 10°С, должна находиться в интервале 2250–3500°С, а количество осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) – в интервале 100–280 мм.

2. При оценке климатических изменений, оказывающих положительное влияние на размножение вредных саранчовых, отмечено смещение изолиний годовой суммы активных среднесуточных температур воздуха (при пороге 10°С) со значениями 2250 и 3500°С к северу в южных областях России в 1986–2005 гг. по сравнению с 1956–1975 гг.

3. Количество осадков за вегетационный период (апрель-сентябрь) 1986–2005 гг. по сравнению с 1956–1975 гг. на основных территориях, подверженных нашествию саранчи, увеличилось или осталось неизменным. Это может свидетельствовать как о значительных колебаниях данного показателя в различные годы на фоне увеличения

числа засушливых лет в последние два десятилетия, так и о том, что некоторое повышение количества осадков за вегетационный период при общем потеплении климата не оказывает значительного влияния на распространение и массовое размножение вредных саранчовых в южных областях России.

4. Выявленные изменения климатических параметров указывают на сокращение модельного ареала итальянского пруса на территории Северного Кавказа, Поволжья и других областей европейской части России, и на смещение его северных границ к северу в районе Южного Урала и Сибири. Однако реальный ареал этого вида саранчи увеличился лишь за счет продвижения его северных границ на север.

5. Дальнейшее потепление климата на территории России и при аридном, и при гумидном сценариях вероятнее всего будет способствовать массовому размножению вредных саранчовых и их продвижению в более северные регионы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бей-Биенко Г. Я. 1980. Общая энтомология. М.: Высшая школа. 416 С.

Бондарев Л. Г. 2003. Саранча в Европе. Вестник МГУ. сер.5, № 1. С. 67-70.

Винокуров Г. М. 1949. Метод прогноза начала отрождения вредных саранчовых Сибири. Тр. Алтайской краевой станции защиты растений. Т. 1, Барнаул. С. 5-34.

Вошедский Н. Н., Гаврилова Е. А. 2004. Саранчовые в Ростовской области. Защита и карантин растений. № 7. С. 30-31.

Гаппаров Ф. А. 1987. Влияние экологических факторов на поведение саранчовых. В кн.: Интегрированный метод защиты хлопчатника и сопутствующих культур от вредителей, болезней и сорняков. Ташкент: САНИИЗР Госагропрома СССР. С. 44-47.

Гриньков А. С., Идрисхаджаев Р. А. 1994. Саранча в наступлении, мы в обороне. Степные просторы. № 5. С. 16-17.

Дентелинова Т. Б. 2000. Азиатская саранча в Калмыкии. Защита и карантин растений. № 1. С. 13.

Ермаков А. В. 1998. Будет ли саранча в 1998 году? Защита и карантин растений. № 3. С. 18-19.

Золотокрылин А. Н. 2003. Климатическое опустынивание. Отв. Ред. А. Н. Кренке. М.: Наука. 246 С.

Золотокрылин А. Н. 2005. Мониторинг климатической составляющей опустынивания. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 20. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 105-123.

Липчанская Р. А. 2000. Саранча в Волгоградской области. Защита и карантин растений, № 5, с. 11.

Никитенко В. Г. 1998. Борьба с саранчой – дело государственное. Защита и карантин растений. № 4. С. 15-16.

Полищук А. И., Маленкова О. В. 2001. Саранча в Оренбургской области. Защита и карантин растений. № 2. С. 11.

Правдин Ф. Н., 1969. Подотряд короткоусые прямокрылые. В кн.: «Жизнь животных», Т. 3. М.: «Просвещение». С. 228-240.

Предтеченский С. А. 1930. Практические результаты экологического изучения саранчи в Средней России. Труды по защите растений. Сер. Энтомологическая. Т. 1, вып. 1., Л.: С. 149-159.

Рубцов И. А. 1935. Районирование резерваций саранчовых Сибири и прогноз массовых размножений по коэффициентам увлажнения. Труды по защите растений Восточной Сибири. Вып. 2(4). С. 4-24.

Сафарова И. Л. 1987. Особенности эмбрионального развития итальянской саранчи. В кн.: Саранчовые – экология и меры борьбы. Сб. науч. трудов. Л.: С. 75-83.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке.Доклады Академии наук. Геофизика. 2002. Т. 386, № 3. С. 389-394.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2006. Выявление климатогенных изменений. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.

Сергеев М. Г., Ванькова И. А. 2006. Динамика локальной популяции итальянской саранчи. Сибирский эколог. Журнал. Т. 13, № 4. С. 439-447.

Столяров М. В. 1998. Саранча на юге России. Защита и карантин растений. № 3. С. 16-17.

Столяров М. В. 2000. Проблема массовых размножений стадных саранчовых на юге России на рубеже столетий. В кн.: Актуальные вопросы биологизации защиты растений. / Под ред М. С. Соколова и Е. П. Угрюмова. Пущино. С. 94-100.

Столяров М. В. 2005. Некоторые особенности прогнозирования динамики численности стадных саранчовых. Надолго ли затихает их размножение? Защита и карантин растений. № 1. С. 38-41.

Цыпленков Е. П. 1970. Вредные саранчовые насекомые в СССР. Л.: Колос, 272 с.

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.

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.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

***В. В. Ясюкевич*[1)], *Б. А. Ревич*[2)]**

[1)]Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. victor_pemme@comcor.ru

[2)]Россия, 117418, Нахимовский пр-т, 47, Научно-исследовательский институт народно-хозяйственного программирования РАН, revich@ecfor.ru

Резюме. Суммирована информация о воздействии на здоровье населения России экстремальных температур (волн тепла и холода) и некоторых инфекционных и паразитарных заболеваний в связи с произошедшими в XX веке и ожидаемыми в XXI веке изменениями климата. Показано, что в результате воздействия экстремальных температур заметно повышаются заболеваемость и смертность в уязвимых группах населения. Изменение климата будет способствовать расширению нозоареалов клещевого весенне-летнего энцефалита, крымской геморрагической лихорадки, лихорадки западного Нила, геморрагической лихорадки с почечным синдромом и повышению заболеваемости этими инфекциями. В тоже время ухудшения эпидемиологической ситуации по малярии в целом по стране в связи с изменением климата не ожидается.

Ключевые слова. Изменение климата, нозоареал, возбудитель, членистоногий переносчик, экстремальные температуры, заболеваемость.

CLIMATE CHANGE IN RUSSIA AND HUMAN HEALTH

***V. V. Yasukevich*[1)], *B. A. Revich*[2)]**

[1)]Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, victor_pemme@comcor.ru

[2)]Institute of Forecasting RAS, 47, Nakhimovsky pr., 117418, Moscow, Russia, revich@ecfor.ru

Abstract. The paper summarizes information on the influence of extreme temperatures (waves of heat and cold) and some infectious and parasitic diseases on human health in Russia in connection with changes in climate observed in the 20th century and expected in the 21st century. It is shown that extreme temperatures lead to a discernible increase in morbidity and mortality in vulnerable groups of the population. Changes in climate may cause expansion of ranges of tick-borne spring-and-summer encephalitis, the Crimean hemorrhagic fever, a fever of the Western Nile, a hemorrhagic fever with a renal syndrome, and enhance the morbidity. At the same time, in a changing climate no deterioration of malaria epidemiological situation over the country as a whole is expected.

Keywords. Climate change, range, pathogen, arthropod vector, extreme temperatures, morbidity.

Введение

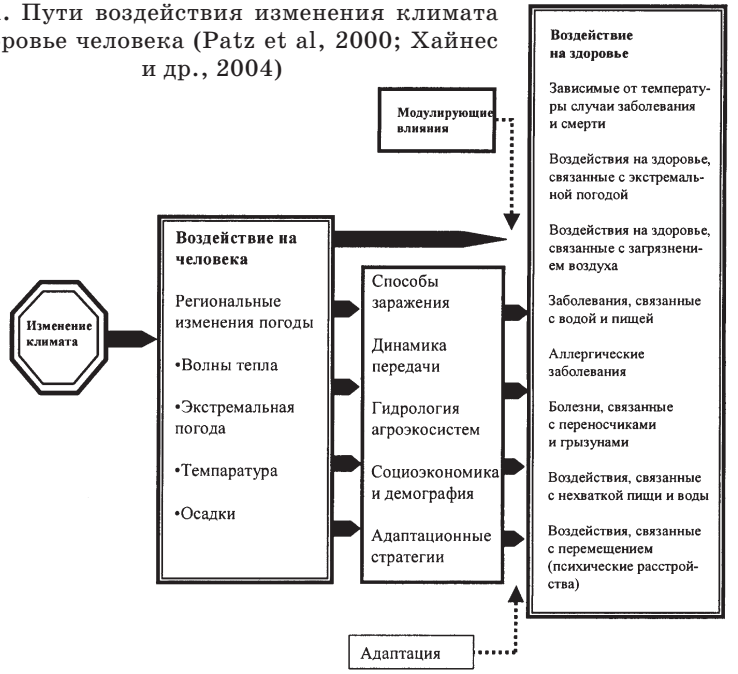
В последние годы изменение климата рассматривается как один из ведущих негативных факторов, оказывающих влияние на здоровье населения, наряду с такими традиционными факторами риска индустриальной эпохи, как загрязнение атмосферного воздуха и питьевой воды, стрессовые ситуации и другие негативные явления. Сезонные и региональные особенности изменения климата в сочетании с действием природных, социально-экономических, демографических и иных факторов приводят к различным количественным значениям рисков в различных странах и регионах. Большое значение при этом имеет уровень валового национального дохода на душу населения.

Влияние изменение климата на здоровье человека разнообразно. Прямое воздействие связано с увеличением числа дней с аномально высокими или низкими температурами, количества наводнений, штормов, тайфунов, косвенное воздействие проявляется в результате увеличения площадей засушливых земель, уменьшения объемов доброкачественной питьевой воды, в результате чего возрастает опасность инфицирования населения. Особенно осложняет задачу оценки климатогенных изменений здоровья населения его полифакторность, включая действие мощных неклиматических факторов – загрязнение окружающей среды, недостаток ресурсов. Их изменение во времени может искажать «климатический сигнал». Их совместное действие с климатическими факторами может быть неаддитивно – возможны эффекты ослабления или же усиления (синергидный эффект). На рис. 1 (Patz et al., 2000; Хайнес и др., 2004), схематически приведены возможные пути – прямые и косвенные – воздействия изменения климата на здоровье населения, происходящего на фоне действия других факторов неклиматической природы. Из всего многообразия приведенных на этом рисунке факторов в данном разделе будут обсуждаться лишь влияние экстремальных температурных условий на условия проживания и труда и влияние климатических условий на распространение инфекционных заболеваний человека.

Потепление климата приводит к изменению условий распространения инфекционных болезней человека, в том числе и трансмиссивных. При этом меняются условия существования популяций переносчиков трансмиссивных болезней и условия развития возбудителей в переносчике, что влечет за собой изменение возможностей передачи многих болезней человека и животных. Увеличение температуры ускоряет развитие возбудителя в организме переносчика, а сам процесс передачи делает более эффективным, облегчается передача забо-

левания и расширяется его нозоареал (Kramer et al., 1983; Watts et al., 1987; Geographical distribution..., 1989; Reisen et al., 1993, 1995; Martens et al., 1999; Lieshout et al., 2004; Хайнес и др., 2004).

Рис. 1. Пути воздействия изменения климата на здоровье человека (Patz et al, 2000; Хайнес и др., 2004)



Влияние изменения климата в XX веке на здоровье населения

Экстремально высокие и низкие температуры (волны тепла и холода)

Изменение климата сопровождается увеличением числа дней с аномально высокой и низкой температурой. Устойчивая, продолжительная жаркая погода вызывает увеличение смертности и заболеваемости сердечно-сосудистыми заболеваниями. К группам наибольшего риска относятся дети младшего возраста, люди пенсионного возраста, лица, профессиональная деятельность которых связана с пребыванием на открытом воздухе и лица с низким уровнем доходов. В крупных городах группой риска являются также люди, живущие или работающие в «островах тепла». Под этим термином понимается центральная часть города, характеризующаяся плотной многоэтаж-

ной застройкой, большими заасфальтированными пространствами, минимальным количеством зеленых насаждений и открытых водоемов. В таких условиях воздействие жары наиболее губительно.

Летом 2003 г. в Западной и Центральной Европе в результате экстремальной жары погибло, по различным оценкам, от 27 до 40 тысяч человек. Исследования причин смертности населения в периоды летней жары показали, что наиболее высоки показатели смертности среди пожилых людей, страдающих хроническими заболеваниями сердечно-сосудистой системы, органов дыхания, диабетом, госпитализированных лиц, людей, проживающих на верхних этажах, людей проживающих в городах, по сравнению с пригородом (Smoyer, 1998; Conti et.al., 2005; Vandentorren et.al., 2004; Grize et al., 2005; Johson et.al., 2005; Michelozzi et.al., 2004; Хайнес и др., 2004). Жаркий август 2003 г. стал причиной до 6,0 тыс. дополнительных смертельных исходов в Испании и 1,3 тыс. случаев в Лиссабоне. Наиболее детально эта ситуация была изучена в Париже, где во время жары 2003 г. число дополнительных случаев смерти составило 11 400, что на 60% больше, чем в этот же период времени в период 2000-2002 гг. (рис. 2).

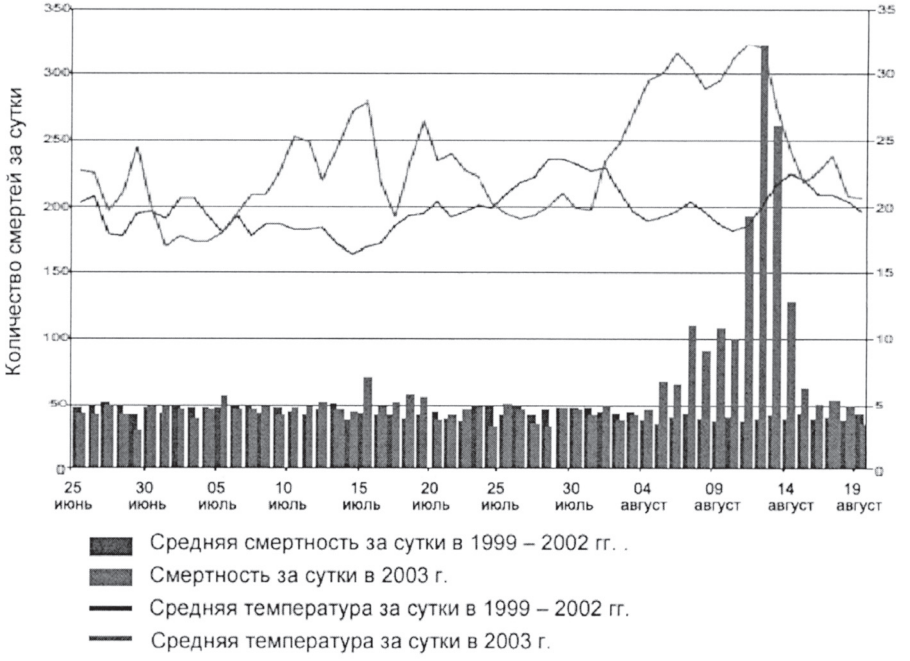


Рис. 2. Дополнительная смертность в Париже во время волны тепла в начале августа 2003 г. (INVS, 2003; Vandentorren et al., 2004).

В 1980 –1998 гг. в Индии было 18 волн тепла; волна тепла в 1988 г. унесла 1300 жизней (De, Mukhopadhyay, 1998; Mohanty, Panda, 2003; De et al., 2004). В штате Андхра-Прадеш, Индия, в 2002 г. во время волны тепла погибло 622 человека (Хайнес и др., 2004). Повышенная смертность отмечалась у лиц, относящимся к группам риска: бедным и пожилым людям, а также поденным сельскохозяйственным рабочим и рикшам, вынужденным работать вне помещений при любой погоде. Ситуация усугублялась тем, что конструкция крестьянских домов чаще всего такова, что не предохраняет от жары.

Первые работы в Европейской части России по оценке влияния повышенных температур воздуха на смертность населения, выполненные по методу временных рядов, были проведены в Твери. В этом городе установлена достоверная положительная корреляция между числом обращений за экстренной медицинской помощью, общей смертностью и смертностью от ряда причин (цереброваскулярные нарушения, травмы, утопления и самоубийства) и температурой воздуха в летний период. При увеличении максимальной дневной температуры на 10°С число обращений и смертность от отдельных причин возрастают на 100%, общая смертность – на 8% Установлено, что прирост максимальной суточной температуры на каждые 10°С даст примерно один случай дополнительной смерти в Твери ежедневно. В 1999 году – более жарком, чем 2002 г., – происходило больше самоубийств (Ревич и др., 2005). По расчетной оценке, в 1998–2002 гг. в городах России волны тепла стали причиной от 4 до 28,8 тысяч случаев дополнительной смерти (Ревич, Шапошников, 2004). В то же время, в Санкт-Петербурге между случаями внезапной кардиальной смерти и температурой воздуха такой связи выявлено не было (Кухарчик и др., 2004).

В Москве влияние на показатели смертности тепловых и холодовых волн было изучено за 6 лет (2000–2005 гг.) (Ревич, Шапошников, 2006). В июле 2001 г. Москва пережила необычайно продолжительную тепловую волну, во время которой среднесуточные температуры превышали порог в 25°С в течение 9 последовательных дней (при средней многолетней норме три дня в год). В максимуме этой волны (23 июля 2001 г.) суточная смертность достигла рекордно высокого значения – она превысила среднее многолетнее значение (математическое ожидание) смертности для июля на 93%. Для сравнения укажем, что во время «Чикагской жары» число среднесуточных смертей превысило фоновый уровень на 85% (McGeehin, Mirabelli, 2001). Исключительная для Москвы сила и продолжительность температурной волны 15–28 июля 2001 г. привела к четко выраженному и статистически-значимому эффекту «всплеска» смертности во всех возрастных группах. Дополнительную смертность, связанную непосредственно с потеплением климата в Москве оценивается за период 2000–2005 гг. в 420 смертей в год (Ревич, Шапошников, 2006).

Эффект «холодовой волны» наглядно демонстрирует ситуация января-февраля 2006 года, когда в Москве аномальные низкие температуры наблюдались в течение 26 дней. Достоверно были установлены негативные эффекты волны холода 2006 г. в возрастной группе пожилых людей старше 75 лет. (Ревич, Шапошников, 2006). При воздействии низких температур в группы наибольшего риска входят также алкоголики и бездомные люди.

Воздействие экстремально высоких температур усугубляется загрязнением атмосферного воздуха. Концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе возрастает в дни высоких температур, причем уровень загрязнения тесно связаны как с температурой того же дня, так и предыдущих дней. Показано, что концентрации O_3, CO, CO_2, SO_2 и NO_2, а также мелкодисперсных пылевых частиц ($PM_{2,5}$, PM_{10})в такие периоды максимальны (Рахманин и др., 2004; Ревич, Шапошников, 2004). Так, летом 2002 г. в Москве стоял устойчивый антициклон, и отмечалось сильное задымление из-за пожаров. В дни наиболее высоких температур в Москве в августе 2004 г. концентрации NO_2, O_3 и PM_{10} почти точно повторяли ход температурной кривой (Ревич, Шапошников, 2006).

Длительное пребывание в условиях высоких температур, особенно при выполнении тяжелой физической работы, ведет к ряду негативных физиологических изменений и общему перегреву организма (Афанасьева и др., 2004).

Инфекционные и паразитарные болезни.

Инфекционные болезни человека, в том числе и трансмиссивные, распространены практически повсеместно. Потепление климата приводит к изменению условий их распространения. В том числе, меняются условия существования популяций переносчиков трансмиссивных болезней и условия развития возбудителей в переносчике, что влечет за собой изменение возможностей передачи болезней человека и животных, распространяющихся при посредстве членистоногих переносчиков – комаров, блох, клещей и других. Увеличение температуры ускоряет развитие возбудителя в организме переносчика, а сам процесс передачи делает более эффективным, облегчается передача заболевания и расширяется его географическое распространение. При этом необходимо дифференцировать изменения, вызванные климатическими причинами, от изменений, обусловленных другими факторами. Причиной распространения трансмиссивных заболеваний в места, где они в течение многих последних лет не встречались, является резкое ухудшение деятельности инфраструктур, ответственных за борьбу с переносчиками и возбудителями болезней и оказание ряда других медицинских услуг, освоение людьми новых

территорий, часто связанное с резкими экологическими изменениями условий на этих территориях, неорганизованная урбанизация без создания соответствующих медицинских инфраструктур, высокая миграционная активность людей, развитие устойчивости возбудителей к лекарствам и переносчиков к инсектицидам. (Kramer et al., 1983; Watts et al., 1987; Geographical distribution..., 1989; Reisen et al., 1993, 1995; Reiker, 1998; Martens et al., 1999; Lieshout et al., 2004; Хайнес и др., 2004; Семенов и др., 2006).

Изменения климата, произошедшие на территории России в XX веке, оказывают влияние на распространение природно-очаговых инфекций и малярии, в том числе, на границы ареалов возбудителей, их членистоногих переносчиков и позвоночных хозяев, так и на характер размещения очагов в пределах ареала.

Циклические обострения эпизоотической ситуации в природных очагах чумы и туляремии прямо или опосредствованно связаны с периодическими изменениями гидрометеорологических условий. Влияние изменения климата сказывается в большей мере на тех возбудителях болезней, чей жизненный цикл связан с более или менее длительным существованием во внешней среде и, следовательно, с определенными требованиями к ее условиям и наличием адаптаций к их изменениям. К ним относятся возбудители факультативно-трансмиссивных инфекций (например, чума, туляремия), нетрансмиссивных природно-очаговых инфекций (лептоспирозов и другие инфекции) и сапронозов. Однако климатогенные изменения распространения природноочаговых инфекций происходят на фоне действия различных факторов неклиматической природы – экологических, демографических и социально-экономических. Характер их действия на территории России в последние десятилетия существенно изменился. В частности, 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 уровене заболеваемости также сказываются циклические колебания численности переносчиков и позвоночных хозяев. Систематических данных в России для широких обобщений недостаточно, поскольку в настоящее время систематический мониторинг природноочаговых инфекций на постоянных стационарах не проводится (Коренберг, 2004).

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).

К концу XX века заболеваемость клещевым весенне-летним энцефалитом в России существенно повысилась (рис. 3). Если в 1956 г. было зарегистрировано 5163 случая, то в 1996 г. – 10 298 случаев. Рост заболеваемости происходит в основном за счет регионов Урала и Сибири. В 1999 г. показатель заболеваемости в целом по России составил 6,8 на 100 тыс. населения, 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 Кировской, Свердловской, Омской областях, Красноярском крае, Республике Бурятия наблюдается расширение ареала клещевого энцефалита.

В качестве причин, приведших к такому положению, прежде всего, 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).

Одной из ведущих причин увеличения заболеваемости населения клещевым энцефалитом на Урале и в Сибири является также 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).

В 2005 г. заболеваемость клещевым энцефалитом повысилась по сравнению с 2004 г. на 7,8%, причем среди детей до 14 лет – на 22,07%. Всего зарегистрирован 4 551 случай, из них детей – 599 случаев, показатели заболеваемости для взрослых и детей 3,16 и 2,69 соответственно. Наибольшая заболеваемость зарегистрирована в следующих субъектах РФ: Красноярском крае – 774 случая (26,91 на 100 тыс. населения), Свердловской – 448 случаев (показатель 10,09),

Томской – 329 случаев (31,68). Тюменской – 218 случаев (16,56), Пермской – 208 (7,86) областях. Смертность от этого заболевания в 2005 г. составила 72 человека. Эффективность мер по снижению заболеваемости клещевым энцефалитом снижается в связи с ограниченностью финансовых средств для приобретения акарицидных препаратов и средств специфической профилактики (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006). В дальнейшем заболеваемость продолжала снижаться. В 2006 и 2007 гг. показатели заболеваемости составили 2,4 и 2,2 соответственно. Всего в 2007 г. зарегистрировано 3138 случаев заболевания, смертность составила 42 человека. Наибольшая заболеваемость в этом году регистрировалась в Красноярском крае (показатель 18,03), Томской области (29,07), Республике Алтай (25,86) и Республике Тыва (17,48) (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2008).

Потепление климата способствовало смещению границы распространения переносчиков клещевого энцефалита *Ixodes ricinus* и *I. persulcatus* на северо-восток Европейской территории России и Сибири соответственно, расширило период их активности (Алексеев, 2004, 2006).

Иксодовые клещевые бореллиозы (болезнь Лайма) в России официально регистрируются с начала 1992 г. и с того времени заболеваемость возросла почти в 2 раза, с 3,5 до 6 случаев на 100 тыс. населения (рис. 3). Наиболее высокая заболеваемость отмечена в Волго-Вятском, Уральском, и Западно-Сибирском регионах. Высокая заболеваемость зарегистрирована в Костромской, Ярославской и Вологодской областях. Томская область занимает самое высокое место в Российской Федерации по уровню заболеваемости клещевым боррелиозом (Арумова, Воронцова, 2000; Злобин и др., 2004). Динамика заболеваемости сходна с таковой для клещевого энцефалита, что позволяет предположить и сходство причин ее изменения с приведенными выше в отношении клещевого энцефалита (увеличение частоты контактов человека с переносчиком, изменение климата), так как чисто биологические особенности этих болезней существенно различаются – общим является только трансмиссивный путь передачи через укус клеща (Злобин и др., 2004). В 2007 г. было зарегистрировано 7247 случаев заболевания (показатель 5,09) (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2008).

С середины 1980-х гг. заболеваемость геморрагической лихорадкой с почечным синдромом (ГЛПС) стала расти, и к началу XXI века увеличилась более чем в 3 раза. Около 80% зарегистрированных случаев ГЛПС на Европейской территории России приходится на расположенные в Приуралье и Среднем Поволжье Республики Башкортостан, Удмуртия, Татарстан, Марий Эл, Чувашия, а также Самарскую,

Ульяновскую, Пензенскую области (Бернштейн и др., 2004). Показатель заболеваемости по этим регионам превышает 10 на 100 тыс. населения, тогда как в среднем по России – 4,0. Особенно высока заболеваемость в Башкортостане и Удмуртии – за последние 25 лет показатели заболеваемости составили 53,8 и 40,0 соответственно. С середины 1980-х гг. заболеваемость стала расти, и к началу XXI века увеличилась более чем в 3 раза (табл. 1).

Таблица 1.

Заболеваемость геморрагической лихорадкой с почечным синдромом в разных регионах России в 1978 – 1984 и 1984 – 2002 гг. (Бернштейн и др., 2004): в числителе – количество больных, в знаменателе – показатель заболеваемости (количество больных на 100 тыс. населения).

Регион		Среднегодовые значения за период		Кратность увеличения
		1978 – 1984 гг.	1985 – 2002 гг.	
Европейская территория России	В целом	2156 / 1,9	7153 / 6,2	3,3
	Приуралье и Среднее Поволжье	1852 / 10,3	5663 / 31,5	3,1
Дальний Восток		168 / 2,2	156 / 2,1	1,0

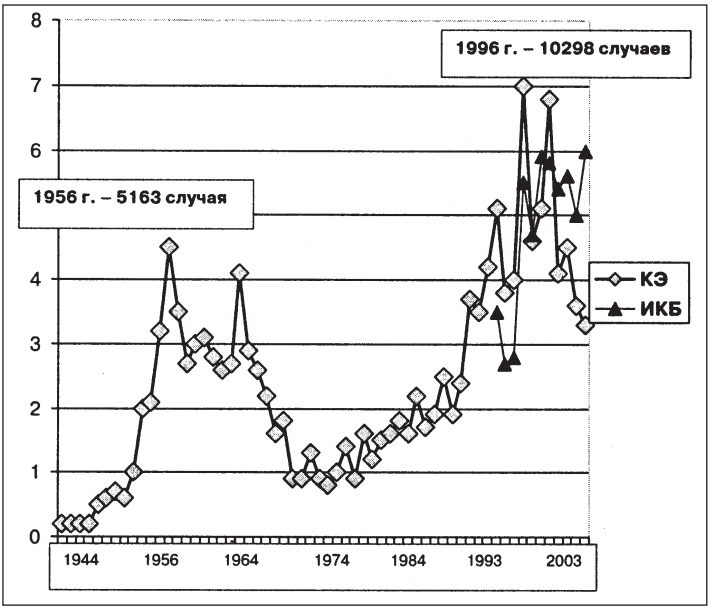


Рис. 3. Заболеваемость клещевым энцефалитом (КЭ) и иксодовым клещевым бореллиозом (ИКБ) в Российской Федерации в 1944-2003 гг., число больных на 100 тыс. населения (Злобин и др., 2004).

Одна из причин наблюдаемого эффекта – повышение температуры и количества осадков в умеренных широтах Европы. Так, в Удмуртии за последние 30 лет среднегодовая температура поднялась на 0,6°С, среднегодовое количество осадков увеличилось с 501 до 650 мм, толщина снежного покрова в феврале-марте возросла с 33 до 48 см. Эти климатические изменения способствовали росту численности популяций европейской рыжей полевки – основного резервуара возбудителя ГЛПС (хантавируса Пуумала) в природных очагах. Влияют в этом направлении также и социальные факторы, в частности, изменений рекреационных предпочтений людей. Например, в Удмуртии до середины 1980-х 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 истребительных мероприятий по борьбе ними 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 (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006).

В 2005 г. общая заболеваемость ГЛПС по сравнению с 2004 г. снизилась на 27,82 % и среди детей – в 2,12 раза, однако уровень ее остается высоким. Всего зарегистрировано 7 348 случаев, среди детей – 169, показатели заболеваемости – 5,11 и 0,76 соответственно.

Наиболее неблагополучная обстановка, как и в прежние годы, сохраняется на территории Приволжского федерального округа. В Республике Башкортостан зарегистрировано 2 313 случаев, среди детей – 57 случаев, показатели заболеваемости 56,61 и 7,83 соответственно, в Оренбургской области – 1 288 случаев (59,73), Республике Татарстан – 850 случаев (22,54), Удмуртской Республике – 441 случай (28,33), Самарской области – 307 случаев (9,57), Нижегородской области – 221 случай (6,38). геморрагической лихорадкой с почечным синдромом Всего в 2005 г. случаи заболевания ГЛПС зарегистрированы в 47 субъектах Российской Федерации. В 42 случаях заболевание закончилось смертью пациента (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006). В 2007 г. заболеваемость ГЛПС составила 3,61 случая на 100 тыс. населения (5138 больных) (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2008).

Крымская геморрагическая лихорадка (КГЛ) периодически регистрируется в южных регионах страны. Заболеваемость с 1948 по

2003 гг. распределяется по субъектам Российской Федерации следующим образом (Бутенко, Ларичев, 2004): Ростовская область – 357, Астраханская область – 297, Ставропольский край – 189, Волгоградская область – 33, Калмыкия – 23, Краснодарский край – 18, Дагестан – 9 случаев. Существенный рост заболеваемости отмечен с 2000 г. В Калмыкии и Волгоградской области случаи заболевания отмечены впервые в 2000 г., а в Дагестане – в 2001 г. Это связывается с тем, что вследствие потепления климата граница ареала переносчика – клеща *Hyalomma marginatum* – продвинулась к северу, возросла его численность и, как следствие, расширился ареал инфекции (Бутенко, Ларичев, 2004).

В 2005 г. по сравнению с 2004 г. заболеваемость КГЛ возросла в 2 раза. В Южном федеральном округе зарегистрировано 138 случаев КГЛ (из них 4 – летальных), тогда как в 2004 г. было 76 больных. Заболевания регистрировались в 7 субъектах РФ, из них в Республике Калмыкия и Ставропольском крае – по 38 больных, в Астраханской области 37 больных; в Ростовской области – 16 больных; Волгоградской области – 6 больных; Республике Дагестане – 3 больных. 4 случая КГЛ закончились летальным исходом. Среди заболевших КГЛ преобладает трудоспособное население, в основном сельские жители в возрасте от 20 до 50 лет, при этом наиболее высокая заболеваемость отмечена в возрастной группе 20—29 лет (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006). В 2007 г. выявлено 233 больных, из них в Ставропольском крае 63, Ростовской области 53, Волгоградской области 30, Астраханской области 20 (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2008).

Резервуаром вируса лихорадки Западного Нила (ЛЗН) являются птицы водного и околоводного комплексов, чем и объясняется широкое распространение вируса в природе. Основными переносчиками возбудителя являются орнитофильные комары родов *Culex*, *Aedes* и некоторых других. В 1999 г. в Волгоградской и Астраханской областях возникла эпидемическая вспышка ЛЗН, в результате которой было госпитализировано почти 500 человек. Этот год был одним из наиболее теплых за более чем 160 лет наблюдений, с чем и связывается аномальный рост заболеваемости (Платонов, 2004, 2006). Ареал этого заболевания расширяется и оно было зарегистрировано в Сибири (Платонова и др., 2006). В 2007 г. зарегистрировано 115 случаев заболевания ЛЗН, в том числе в Влгоградской, Астраханской и Ростовской областях 63, 33 и 19 случаев соответственно (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2008).

Малярия на территории России в настоящее время не является массовым заболеванием (рис. 4). Но она была таковым в первой половине XX века. В 1894–1914 гг. в Российской империи ежегодно

регистрировалось от 3 до 3,6 млн. больных (Лейзерман, 1943). Пик заболеваемости в СССР пришелся на 1934 и 1935 гг., когда регистрировалось более 9 млн. больных малярией ежегодно; в дальнейшем эта цифра снижалась вследствие масштабных противомалярийных мероприятий, а к 1960-м годам остались лишь некоторые очаги малярии (Васильев, 2000, 2001). В 1930-е годы вспышка малярии достигла Ленинградской области, а случаи заболевания отмечались и в Архангельской области (Духанина, 1945; Соколова, 1976).

В последние годы максимум заболеваемости отмечен в 1998 г., когда было выявлено 1107 случаев малярии, из них 65 (5,9%) в результате местной передачи. В дальнейшем масштабы завоза стали снижаться, но возникла тенденция к увеличению местных случаев малярии (рис. 4). В 2001 г. было выявлено 907 случаев, из них 134 в результате местной передачи (14,8%), в 2002 г. 644 и 139 соответственно (21,6%). В 2003 г. положение улучшилось: из 533 зарегистрированных случаев местных было 73 (13,7%). В следующие 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 (Лобзин, Козлов, 2004; Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006, 2008).

Изменилась и структура завоза малярии в Россию. До 1995 г. преобладал завоз из стран дальнего зарубежья. В 1996 г. масштабы завоза из стран ближнего и дальнего зарубежья сравнялись. В последующие годы стал преобладать завоз из стран ближнего зарубежья, преимущественно из Таджикистана и Азербайджана (Ясюкевич, 2002; Лобзин, Козлов, 2004).

Рис. 4. Заболеваемость малярией на территории Российской Федерации (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2008).

По-прежнему на городских жителей приходится 47% от всей заболеваемости малярией. Наибольшее количество случаев зарегистрировано в городах Москве, Санкт-Петербурге, а также Московской, Астраханской, Самарской, Тульской областях, Краснодарском крае, Республике Татарстан. Доля больных малярией в Москве и Московской области в настоящее время составляет около 85% от общего числа зарегистрированных больных в России. Это связано с тем, что мигранты из эндемичных по малярии стран, среди которых встречаются и больные, прибывают в Москву и стремятся обосноваться в Московском регионе, а уже оттуда попадают в другие субъекты РФ. В 2005 г. при анализе крови больных в 81,5% случаев выявлен возбудитель трехдневной малярии, в 15,5% – тропической, в 2,4% – овале, в 0,5% – четырехдневной (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006).

Несмотря на невысокий уровень заболеваемости, предпосылки возобновления широкомасштабной передачи малярии, в первую очередь, трехдневной, в России сохраняются. К ним относятся систематический завоз малярии на территорию России, особенно интенсивный во время эпидемического сезона, и большое число обитающих там 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 встречающегося в Средней Азии и Казахстане *An. martinius* (Семенов и др., 2006). Наличие *An. subalpinus* на территории России и других стран СНГ признано не всеми авторами (см., например, Гуцевич и др., 1970; Артемьев и др., 2000; Маркович и др., 2001), поэтому в данном списке этот вид не приводится. Кроме того, в ряде научных публикаций сообщается о нахождении на территории СНГ и других видов комплекса *An. maculipennis: An. persiensis, An. daciae, An. lewisi, An. artemievi* (Гордеев и др., 2005, 2006; Безжонова, Горячева, 2006; Лопатин и др., 2006; Djadid et al., 2007), однако, этот вопрос, по нашему мнению, требует дальнейшего уточнения и подробного изучения.

В большинстве субъектов Российской Федерации снижается интенсивность наблюдения за состоянием и численностью популяций переносчиков. Всюду ослаблен контроль над эффективностью проведения дезинсекционных мероприятий. Заселенность водоемов личинками малярийных комаров остается высокой. Так, в 2005 г. этот показатель составил 47,6%, тогда как в 2004 г.– 34,5%, что свидетельствует о недостаточном объеме мероприятий, направленных на сокращение численности переносчика. (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке...», 2006).

Пример многих стран показывает, что малярия способна очень быстро возвращаться на освобожденные от нее территории при ослаблении контроля (Ясюкевич, 2002; Лысенко и др., 2003; Семенов и др., 2006). Поэтому внимание, уделяемое этому заболеванию, не должно снижаться.

Изменение пространственного распределения климатических условий, благоприятных для передачи малярии человека в глобальном масштабе было отмечено в последнем докладе МГЭИК (Climate Change 2007, 2007).

Изменения климата, произошедшие в XX веке на территории стран СНГ и Балтии, не могли не сказаться на ареалах переносчиков и условиях развития возбудителя в их организме. Эти изменения были оценены расчетным методом с использованием прикладных климатических индексов, определяющих условия существования переносчиков и возбудителей малярии в зависимости от температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы и суммы осадков. Для переносчиков и возбудителей малярии масштабы изменений ареалов субрегиональны, типично – до 100–200 км. Типична также разнонаправленность сдвигов на разных частях территории – эффекта повсеместного движения северных границ на север (что можно было бы ожидать при потеплении) не наблюдается. Причина этого – одновременное увеличение среднегодовой температуры и уменьшение амплитуды ее годового хода на большей части территории России (Семенов, Гельвер, 2002а, б). Более подробно методика и результаты этих исследований изложены в работах (Семенов и др., 2006; Ясюкевич, Гельвер, 2007).

Анализ изменений такого показателя риска малярии, как количество циклов развития возбудителя в организме переносчика (спорогония), возможное в заданных температурных условиях, показал, что в России в его значение повсеместно уменьшилось на густонаселенной европейской территории, а также на большей части азиатской территории; увеличение произошло в субрегиональном масштабе в Средней Сибири. Таким образом, изменение климатических условий на территории России в конце XX века по сравнению с его серединой в целом по стране не привели к ухудшению (даже потенциальному) эпидемиологической ситуации по малярии (Семенов и др., 2006).

Ожидаемое влияние изменения климата в XXI веке на здоровье населения

Экстремально высокие температуры (волны тепла)

В будущем экстремально высокие температуры, так же, как и в настоящее время будут сопровождаться повышением числа госпитализаций по поводу сердечно-сосудистых заболеваний и дополнитель-

ной смертностью. Как и прежде, наиболее уязвимыми в этом отношении будут дети младшего возраста, люди пенсионного возраста, лица, профессиональная деятельность которых связана с пребыванием на открытом воздухе и лица с низким уровнем доходов. В крупных городах группой риска останутся также люди, живущие или работающие в центральной части города, для которой характерна плотная многоэтажной застройка, большие заасфальтированные пространства, минимальное количество зеленых насаждений и открытых водоемов («остров тепла»). В связи с изменением демографической ситуации в России количество дополнительных смертей вследствие волн тепла увеличится. Так, доля лиц старше 59 лет (одной из групп риска) к 2025 г. достигнет 27,6%, а к 2050 г. – 36,1%, т.е. будет в 2 раза больше, чем в 1989 г.(18,5%) (Население России..., 2002). Сочетание волн тепла с загрязнением атмосферного воздуха станет причиной дополнительных случаев госпитализации и смерти. При этом наибольшая дополнительная смертность прогнозируется при сценарии, предусматривающем существенное повышение доли угля в производстве тепловой и электрической энергии. На основе данных о зависимости показателей смертности от температуры воздуха определено, повышение температуры воздуха только в июле месяце может быть причиной до от 4,7 до 8,5 тыс. дополнительных случаев смерти среди городского населения России. (Авалиани и др., 2004; Ревич, Шапошников, 2004, 2006).

Качественные перспективные оценки распространения инфекционных и паразитарных заболеваний

Представленные в научной литературе перспективные оценки изменения характера распространения инфекционных заболеваний в XXI веке вследствие ожидаемых изменений климата, обычно имеют качественных характер.

Ожидается, что потепление климата скажется на состоянии природных очагов облигатно-трансмиссивных инфекций с неисключительной трансмиссивной передачей (чума), факультативно-трансмиссивных инфекций (туляремия), и несколько более – нетрансмиссивных (лептоспирозы, сальмонеллезы) инфекций. Еще в большей степени потепление повлияет на возбудителей сапронозов, естественных сочленов почвенных (псевдотуберкулез, листериоз) и водных (легионеллез, холера, мелиоидоз) экосистем (Литвин и др., 1998).

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 2080 г. 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; Climate Change 2001, 2001; Lieshout et al., 2004; Climate Change 2007, 2007).

Северные границы ареалов малярийных комаров сдвинутся к северу, возможно замещение северных популяций южными (Сергиев и др., 2004). На Европейской территории России вследствие уменьшения континентальности климата возможно расширение ареалов *An. atroparvus* и *An. maculipennis*, которые являются более эффективными переносчиками малярии, чем *An. beklemishevi* и *An. messeae* (Сергиев и др., 2004). Возможно укоренение экзотических видов переносчиков, например, *Aedes albopictus* и *Ae. aegypti* на побережье Черного моря (Россия, Грузия, Украина), являющихся важнейшими переносчиками желтой лихорадки и лихорадки денге (Сергиев и др., 2004; Беэр, Эльпинер, 2004). Сведения об обнаружении *Ae. aegypti* в городе Сочи уже имеются (Рябова и др., 2005). Сообщений о завозе *Ae. albopictus* пока нет, но в силу его большей холодостойкости этот вид может продвинуться на территорию России дальше к северу, чем *Ae. Aegypti.*

Улучшение вследствие потепления условий обитания местных видов комаров, являющихся переносчиками арбовирусов, будет способствовать формированию новых природных очагов комариных лихорадок и энцефалитов (Алексеев, 2004, 2006; Ревич, Малеев, 2003). 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).

Смещение границ ареалов иксодовых клещей к северо-востоку будет способствовать повышению заболеваемости клещевым энцефалитом, бореллиозами 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).

Паразитарные системы представляют собой сложные многокомпонентные сбалансированные комплексы. В простейшем случае такая система состоит из двух компонентов – паразита и хозяина. В случае малярии система состоит из трех сочленов: возбудителя (споровика

рода *Plasmodium*), переносчика (комара рода *Anopheles*, являющегося, по сути, основным хозяином паразита, так как в его организме происходит половой процесс) и позвоночного хозяина (человека, являющегося промежуточным хозяином, в организме которого обитают бесполые формы паразита). Известны и более сложные паразитарные системы, где паразит, прежде чем попасть в основного хозяина, меняет двух и более промежуточных хозяев. Одним из последствий изменения климата может быть нарушение взаимодействия между компонентами паразитарной системы, снижающее ее эффективность, несмотря на то, что для каждого отдельно взятого компонента эти изменения могут быть благоприятны (Алексеев, 2004, 2006; Бернштейн и др., 2004; Беэр, Эльпинер, 2004; Коренберг, 2004; Литвин и др., 1998; Платонов, 2006; Платонов и др., 2004; Сергиев и др., 2004; Ревич, Малеев, 2003; Хайнес и др., 2004). Это – существенный источник неопределенности в оценках влияния ожидаемых в XXI веке изменений климата на распространение паразитарных заболеваний человека.

Представленные качественные оценки влияния изменения климата на распространение инфекционные болезней человека выполненные, в основном, экспертным путем, на основе метода аналогий, желательно дополнить результатами расчетных оценок, позволяющей более определенно выявить климатический сигнал. Такие перспективные оценки выполнены в отношении влияния изменения климата на потенциальный ареал, определяемый фактором температуры (Т-ареал), трехдневной малярии *P. vivax* на территории стран СНГ в XXI веке. Соответствующие методы и результаты подробно изложены в работах (Семенов и др., 2006; Ясюкевич, Гельвер, 2007). Вкратце их можно изложить следующим образом. Перспективная оценка выполнялась, исходя из двух предположений о характере изменения температуры на рассматриваемой территории.

1) Долговременное (30 лет и более) увеличение средней температуры воздуха на 1 и 2°С по сравнению с нормой 1966–1995 гг. произойдет при сохранении ее естественной изменчивости, характерной для этого базового периода.

В этом случае граница ареала в обоих случаях сдвигается сходным образом, в основном, к северу, а в восточной части – к востоку на расстояние от 100 до 3000 км. Возможное значительное продвижение границы ареала к востоку в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока подлежит более детальному анализу, в частности, учитывая рельеф этой территории (высотный аспект).

2) Предполагалось, что в 1996–2025 гг. по сравнению с 1966–1995 гг. воздействие изменения климата на воспроизводство возбудителя малярии человека в организме переносчика изменится так же, как оно менялось в 1966–1995 г. по сравнению с 1936–1965 гг. Таким образом, рассматривается разновидность инерционного сценария.

Изменения ареала можно охарактеризовать следующим образом: произошло сокращение ареала вдоль северной и восточной его границ; незначительное расширение ареала в центральной части Средней Сибири.

Предположения 1) и 2) приводят к качественно различным выводам о движении северной и восточной границ Т-ареала трехдневной малярии в XXI веке на территории России. Это различие связано с тем, что в рамках предположения 1) меняются лишь средние значения температуры, а предположение 2) неявно учитывает как изменение средней температуры, так и изменение характера годового хода среднесуточной температуры. Закономерности изменения температуры в XX веке указывают на одновременное изменение и средних значений температуры, и характеристик годового хода. В этом плане предположение 2) следует признать более реалистичным для получения перспективных оценок.

На основании инерционного сценария (предположение 2)) можно предположить, что эпидемиологическая ситуация по малярии на территории России по крайней мере до 2025 г. под воздействием только климатических факторов ухудшаться не будет (Семенов и др., 2006; Ясюкевич, Гельвер, 2007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авалиани С. Л., Буштуева К. А., Голуб А. А. 2004. Медико-демографическая оценка выгод от снижения выбросов парниковых газов. 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. 185-194.

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.

Алексеев А. Н. 2006. Влияние глобального изменения климата на кровососущих эктопаразитов и передаваемых ими возбудителей болезней. Вестник РАМН. № 3. С. 21-25.

Арумова Е. А., Воронцова Т. В. 2000. Клещевой боррелиоз (болезнь Лайма) в России. Дезинфекционное дело. № 2. С. 5-7.

Артемьев М. М., Баранова А. М., Дарченкова Н. Н., Дремова В. П., Ганушкина Л. А., Маркович Н. Я., Сергиев В. П. 2000. Малярийные комары России (р. *Anopheles*). Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 2. –С. 40-45.

Афанасьева Р. Ф., Сивочалова О. В., Бессонова Н. А. 2004. Физиолого-гигиенические аспекты мер профилактики перегревания женщин-работниц. 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. 212-220.

Безжонова О. В., Горячева И. И. 2006. Изучение видового состава комаров комплекса *Anopheles maculipennis (Diptera, Culicidae)* юга Европейской части России

и стран Закавказья. В кн.: Материалы I Всероссийского совещания по кровососущим насекомым. Санкт-Петербург, 24-27 октября 2006 г. С.-Пб. С. 20-22.

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.

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.

Беэр С. А., Эльпинер Л. И. 2004. Паразитарные системы и заболеваемость паразитозами в связи с изменением климата. 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. 157-166.

Васильев Г. К. 2000. Исторический опыт борьбы с малярией. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. № 2. С. 54-56.

Васильев К. Г. 2001. История эпидемий и борьбы с ними в XX столетии. М.: Медицина. 256 С.

Гордеев М. И., Званцов А. Б., Усенбаев Н. Т. 2006. Фауна комаров рода *Anopheles (Diptera, Culicidae)* Тянь-Шаня. В кн.: Материалы I Всероссийского совещания по кровососущим насекомым. Санкт-Петербург, 24-27 октября 2006 г. С.-Пб. С. 59-61.

Гордеев М. И., Званцов А. Б., Горячева И. И. и др. 2005. Описание нового вида *Anopheles artemievi sp.n. (Diptera, Culicidae)*. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. № 2. С. 4-5.

Государственный Доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2005 году». 2006. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 293 С.

Государственный Доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2007 году». 2008. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 397 С.

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.

Духанина Н. Н. 1945. Северная граница распространения тропической малярии в Западной Европе и Европейской части СССР. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. Т. 14, № 2. С. 3-12.

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.

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.

Кухарчик Г. А., Головина Е. Г., Тенилова О. В., Реймова Ю. В., Павлова Г. В., Ступишина О. М. 2004. Внезапная кардиальная смерть в Санкт-Петербурге и климатические факторы. 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. 205-211.

Литвин Ю. В., Гинцбург А. Л., Пушкарева В. И., Романова В. М., Боев Б. В. 1998. Экологические аспекты экологии бактерий. М.: Фармус-принт. 256 С.

Лейзерман Л. И. 1943. Малярия. Сталинабад. 174 С.

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.

Лопатин О. Е., Катохин А. В., Шевченко А. И., Гундерина Л. И., Абдуллаев И. Т., Маргалит Е. 2006. Исследование видового состава представителей рода *Anopheles* в Западной Сибири, Казахстане и Узбекистане с помощью молекулярно-генетических маркеров. В кн.: Материалы I Всероссийского совещания по кровососущим насекомым. Санкт-Петербург, 24-27 октября 2006 г. С.-Пб. С. 112-113.

Лысенко А. Я., Кондрашин А. А., Ежов М. Н. 2003. Маляриология. М.: Открытые системы, 512 С.

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.

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.

Население России, 2001. Девятый ежегодный демографический доклад. 2002. / Под. ред. А. Г. Вишневского. М.: Книжный дом «Университет». 216 С.

Платонов А. Е. 2006. Влияние погодных условий на эпидемиологию трансмиссивных инфекций (на примере лихорадки Западного Нила в России. Вестник РАМН. № 2. С. 25-29.

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.

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.

Рахманин Ю. А., Новиков С. М., Скворцова Н. С., Кислицин В. А. 2004. Критерии оценки погодных условий и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения. 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. 171-175.

Ревич Б.А., Малеев В. В. 2003. Потепление климата – возможные последствия для здоровья населения. В кн.:Климатические изменения: взгляд из России. М.: ТЕИС. С. 99-137.

Ревич Б. А., Шапошников Д. А. 2004. Высокие температуры воздуха в городах – реальная угроза здоровью населения. 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. 175-184.

Ревич Б. А., Шапошников Д. А. 2006. Климатические условия, качество атмосферного воздуха и смертность населения Москвы в 2000-2006 годах. В кн.: Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей. / Под ред. Б. А. Ревича. М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 102-140.

Ревич Б.А., Шапошников Д.В., Галкин В.Т., Крылов С.А., Черткова А. Б. 2005. Воздействие высоких температур атмосферного воздуха на здоровье населения в Твери. Гигиена и санитария. № 2. С. 20-24.

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.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2002а. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. Доклады Академии наук. Геофизика. Т. 386, № 3. С. 389-394.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2002б. Синусоидальная аппроксимации годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. Метеорология и гидрология. №11. С. 25-30.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2006. Выявление климатогенных изменений. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.

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.

Соколова Н. Г. 1976. К истории ликвидации малярии в Архангельской области. В кн.: Вопросы эпиднадзора в отношении малярии. Л. С. 82-85.

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.

Ясюкевич В. В. 2002. Малярия в России и ее ближайшем географическом окружении: анализ ситуации в связи с предполагаемым изменением климата. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. С.-Пб.: Гидрометеоиздат Т. 18. С. 142-157.

Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2007. Влияние изменения климата на переносчиков и возбудителей малярии человека в России и ее ближайшем географическом окружении. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 21. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 293-347.

Climate Change 2001. 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (McCarthy J. J., et al., editors). Cambridge University Press. 1032 P.

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.

Conti S., Meli P., Minelli G., Solimini R., Toccaceli V., Vichi M., Beltrano C., Perini L. 2005. Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. Environ. Res. V. 98, № 3. P. 390-399.

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* 2007. V. 6. http://www.malariajournal.com/content/6/1/6

De U., Khole M., Dandekar M. 2004. Natural hazards associated with meteorological extreme events. Natural Hazards. № 31. P. 487-497.

De U.S., Mukhopadhyay R.K. 1998. Severe heat wave over the Indian subcontinent in 1998, in perspective of global climate. Curr. Sci. № 75. P. 1308-1315.

Geographical distribution of arthropod-borne diseases and their principal vectors. WHO/VBC/ 89.967. Geneva. 1989. 134 P.

Grize, L., Huss A., Thommen O., Schindler C., Braun-Fahrlдnder C. 2005. Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. Swiss medical weekly. V. 135. P. 200–205.

INVS. [Impact sanitaire de la vague de chaleur d' aoыt 2003 en France. Bilan et

perpectives] Health impact of the heat wave in August 2003 in France. Institut de Veille Sanitaire, Saint-Maurice. 2003. 120 P.

Johnson H., Kovats R. S., McGregor G. R., Stedman J. R., Gibbs M., Walton H., Cook L., Black E. 2005. The impact of the 2003 heatwave on mortality and hospital admissions in England. Health Statistics Quarterly. V. 25. P. 6-12.

Kramer L. D., Hardy J. L., Presser S. B. 1983. Effects of temperature on extrinsic incubation of the vector competence of *Culex tarsalis* for western equine encefalomyelitis virus. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. V. 32. P. 1130-1139.

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.

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.

McGeehin M. A., Mirabelli M. 2001. The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. Environ. Health Perspect. 109. suppl. 2. P. 185-189.

Michelozzi P., de Donato F., Accetta G., Forastiere F. D'Ovido M., Kalkstein L.S. 2004. Impact of heat waves on mortality, Rome Italy, June-August 2003. J. Am. Med. Ass. № 291. P. 2537-2538.

Mohanty P., Panda U. 2003. Heat wave in Orissa: a study based on heat indices and synoptic features. Heat wave Conditions in Orissa. Regional Research Laboratory, Institute of Mathematics and Applications. Bubaneshwar. India, 15 P.

Patz, J.A., McGeehin M. A., Bernard S. M., Ebi K. L., Epstein P. R., Grambsch A., Gubler D. J., Reiter P. 2000. The potential health impacts of climate variability and change for the United States: executive summary of the report of the health sector of the U.S. National Assessment. Environmental Health Perspectives, V. 108. P. 367-376.

Reiker P. 1998. Global-warming and vector-borne disease in temperate regions and at high altitude. Lancet. № 9105. P. 839-840.

Reisen W. K. 1995. Effects of temperature on *Culex tarsalis (Diptera: Culicidae)* from the Coachella and San Joaquin Valleys of California. Journal of Medical Entomology, V. 32, № 5. P. 636-645.

Reisen W. K., Meyer R. P., Presser S. B., Hardy J. L. 1993. Effects of temperature on the transmission of Western Equine encephalomyelitis and St. Louis encephalitis viruses by *Culex tarsalis (Diptera: Culicidae)*. Journal of Medical Entomology. V. 30, P. 151-160.

Smoyer K. E. 1998. A comparative analysis of heat waves and associated mortality in St. Louis, Missouri – 1980 and 1995. Int. J. Biometeorol. № 1. P. 44-50.

Vandentorren S., Suzan F., Medina S., Pascal M., Maulpoix A., Cohen J.-C., Ledrans M. 2004. Mortality in 13 French cities during the August 2003 heatwave. Am. J. Public Health. V. 94. P. 1518-1520.

Watts D. M., Burke D. S., Harrison B. A., Whitmore D. E., Nisalak A. 1987. Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for Dengue 2 virus. American Journal of Tropical Hygiene. V. 36, P. 143-152.

КРОВОСОСУЩИЕ КОМАРЫ КАК ПЕРЕНОСЧИКИ КЛИМАТОЗАВИСИМЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

В. В. Ясюкевич

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,victor_pemme@comcor.ru

Резюме. Суммирована информация о климатозависимых заболеваниях различной этиологии, переносчиками которых являются кровососущие комары. Показано, что изменение климата повлияет на распространение этих заболеваний и будет способствовать возникновению дополнительных рисков заражения ими.

Ключевые слова. Кровососущие комары, вирусы, бактерии, простейшие, гельминты, изменение климата.

SANGUIVOROUS MOSQUITOES AS VECTORS OF CLIMATE-DEPENDENT DISEASES

V. V. Yasukevich

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, victor_pemme@comcor.ru

Abstract. The paper summarizes information on climate-dependent diseases of different aetiology for which sanguivorous mosquitoes can serve as vectors. It is shown that climate change may affect a spatial distribution of the diseases and enhance risks of infection.

Keywords. Sanguivorous mosquitoes, viruses, bacteria, protozoa, helminths, climate change.

Изменения климата и их последствия в настоящем и будущем

МГЭИК при оценке опасности климатических изменений рекомендует ориентироваться на 5 составляющих благосостояния человека (Human Well-Being – HWB): на водные ресурсы, энергию, здоровье населения, сельскохозяйственное производство и биоразнообразие (WEHAB – Water, Energy, Human Health, Agriculture, Biodiversity) (Patwardhan et al., 2003). Таким образом, именно эти климатозависимые компоненты благосостояния человека целесообразно в первую очередь использовать при суждении о том, опасно ли данное изменение климата. Данная статья посвящена исследованию климатогенных изменений составляющей одного из компонентов, а именно,

влиянию изменений климата на климатозависимые инфекционные и паразитарные заболевания человека, переносчиками которых являются комары (*Diptera, Culicidae*).

Изменения климата в XX веке – предмет исследований многих специалистов во всем мире (Израэль и др., 2001; Елисеев и др., 2000; Груза, Хмелевцов, 1981; Будыко, Винников, 1976; Антропогенные изменения климата, 1987; Предстоящие изменения климата, 1991; Володин, Галин, 1999; Груза, Ранькова, 2001, 2004; Груза и др., 2001; Бардин, 2002; Jones et al., 1999, 2002; Climate Change 1995, 1996a, 1996b; Hansen, Lebedeff, 1987; Hansen et al., 1999; Climate Change 2001, 2001c; Ранькова, 2005). Большое внимание уделяется, в частности, изменениям температуры. Современные данные, полученные с сети мониторинга Global Historical Climatology Network (GHCN) позволили получить полные оценки глобальных изменений (Peterson, Vose, 1997; Peterson et al., 1999). Именно эти оценки затем были приняты Межправительственной группой по изменению климата (МГЭИК). Межправительственная группа экспертов по изменению климата следующим образом суммировала основные результаты по наблюдаемым изменениям климата (Climate Change 2001, 2001a):

- за весь период инструментальных наблюдений (условно – с 1861 г.) 1990-е годы оказались самым теплым десятилетием;
- по данным инструментальных наблюдений глобальная средняя температура в приповерхностном слое за последние 100–140 лет изменилась на $0,6 \pm 0,2^{\circ}C$;
- для Северного полушария косвенные данные указывают на то, что рост температуры в XX веке был больше, чем в любое столетие последнего тысячелетия; 1990-е годы оказались самым теплым десятилетием, а 1998 г. – самым теплым годом в последнем тысячелетии;
- в среднем в период 1953 – 1993 гг. минимум ночной температуры увеличивался с темпом $0,2^{\circ}C$ в 10 лет, а максимум дневной температуры – с темпом $0,1^{\circ}C$ в 10 лет (т.е. вдвое медленнее), что привело к увеличению безморозного периода в средних и высоких широтах; повышение средней температуры над морями в этот период времени оказалось вполовину меньше, чем над поверхностью суши;
- с 1950 г. частота экстремально низких температур сократилась, а частота экстремально высоких температур немного возросла;
- эпизоды потепления, связанные с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание (которое соответственно влияет на региональные вариации температуры и осадков на большей части тропической и субтропический зон, а также кое-где в средних широтах) стали чаще, продолжительнее и более выраженными с середины 1970-х годов по сравнению с предыдущими 100 годами;

- в течение XX века: на континентах осадки возрастали в средних и высоких широтах Северного Полушария с темпом 0,5–1% за десять лет, а в тропиках (от 10° с.ш. до 10° ю.ш.) на суше осадки в виде дождя возрастали с темпом 0,2–0,3% за десять лет; в Северном Полушарии в субтропиках (от 10° с.ш. до 30° с.ш.) на континентах осадки в виде дождя сокращались с темпом 0,3% за десять лет;
- в средних и высоких широтах Северного Полушария за последнюю половину XX века частота экстремальных осадков возросла на 2– 4 %;
- над континентами в средних и высоких широтах за XX век облачный покров увеличился на 2% (географически это в большинстве случаев совпало с уменьшением суточного диапазона температур);
- в XX веке (с 1900 г. по 1995 г.) немного увеличилась часть суши, для которой характерны серьезные засухи или же серьезные явления переувлажнения;
- в некоторых регионах, например, в некоторых частях Африки и Азии, увеличение частоты засух наблюдалось в последние десятилетия XX века.
- за XX век средний уровень мирового океана увеличился на 0,1–0,2 м;
- с конца 1950-х годов глобальное содержание тепла в океана увеличилось;
- с конца 1960-х годов снежный покров по площади сократился глобально на 10%, а продолжительность сезонного ледового периода на озерах и реках в средних и высоких широтах Северного Полушария за XX век сократилась на 2 недели;
- за XX век широкое распространение получило такое явление, как отступление горных ледников в неполярных регионах;
- с 1950-х годов в Северном Полушарии весной и летом распространение морских льдов сократилось на 10–15%; толщина морского льда в Арктике летом и ранней осенью за последние десятилетия сократилась на 40% (толщина льда зимой сокращалась значительно медленнее).

Изменение климата оказывает воздействие на здоровье человека, системы его жизнеобеспечения и экологические системы, а также – через механизм обратных связей – на саму климатическую систему. Такие изменения уже проявились в XX веке. Так, в докладе Рабочей группы II МГЭИК (Climate Change 2001, 2001b) были проанализированы обобщены данные, характеризующие состояние многих физических и биологических систем, находящихся в условиях воздействия изменения климата. При этом было обнаружено, что состояние некоторых из них уже изменилось. Это выражается, в том числе, в сокращении размеров ледников, таянии вечной мерзлоты, в смещении сроков ледостава и ледохода на реках и озерах (ледостав происхо-

дит позднее, а ледоход начинается раньше обычного), в увеличении продолжительности вегетационного периода в средних и высоких широтах, в расширении ареалов некоторых биологических видов в направлении полюсов и в высотном отношении, уменьшении численности популяций некоторых растений и животных, а также в изменении сроков наступления фенологических явлений. Наличие таких изменений и одновременных изменений климата документировано в различных регионах для многих наземных, пресноводных и морских экосистем. Связь между перечисленными выше изменениями в физических и биологических системах и изменениями приземной температуры воздуха следует считать во многих случаях установленной.

Глобальные климатические изменения могут сопровождаться повышением частоты проявлений ряда экстремальных явлений, таких как аномальных жаркие летние сезоны, наводнения, интенсивные осадки или, наоборот, засухи, сход лавин, подъем уровня моря. Эти явления могут затрагивать миллионы людей и наносить серьезный экономический и экологический ущерб, а также ущерб здоровью населения (Пачаури, 2004; Фолланд, Паркер, 2004; Кундзевич, 2004; Бедрицкий и др., 2004). Смертность людей в регионах с умеренным климатом вследствие очень жаркой погоды может существенно возрасти (Ревич, Малеев, 2003; Ревич, Шапошников, 2006; Kunst et al., 1997; Ando, 1998a,b; Хайнес и др., 2004).

Инфекционные и паразитарные болезни человека, в том числе и трансмиссивные, широко распространены на Земном шаре. Потепление климата приводит к изменению условий развития возбудителей в переносчике, что влечет за собой изменение возможностей передачи многих болезней человека и животных, распространяющихся при посредстве членистоногих переносчиков – комаров, блох, клещей и других. Увеличение температуры ускоряет развитие возбудителя в организме переносчика, а сам процесс передачи делает более эффективным, облегчается передача заболевания и расширяется его географическое распространение (Kramer et al., 1983; Watts et al., 1987; Geographical distribution..., 1989; Reisen et al., 1993, 1995; Martens et al., 1999; Lieshout et al., 2004). Изменения климата, произошедшие в XX веке, привели к изменениям ареалов комаров – переносчиков малярии, к изменению термических условий для развития возбудителя в организме переносчика на территории стран СНГ и Балтии (Семенов, и др., 2006), а также к изменению пространственного распределения условий для передачи малярии в целом, что было отмечено в последних докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Climate Change 2001, 2001b; Climate Change 2007, 2007).

Перспективные оценки МГЭИК климата XXI века, представленные в Третьем оценочном докладе (Climate Change 2001, 2001a) поддерживаются солидным большинством специалистов. Ниже при-

ведены те из перспективных оценок МГЭИК в отношении значений средней температуры воздуха в приповерхностном слое и осадков, которые даны в четкой количественной форме:

- глобальная средняя температура воздуха в приповерхностном слое увеличится в 2100 г. по сравнению с 1990 г. на 1,4 – 5,8°С (диапазон соответствует 35-ти SRES-сценариям);
- предполагаемый рост температуры будет больше, чем в XX веке, и, весьма вероятно, окажется беспрецедентным для, по меньшей мере, последних 10 000 лет;
- весьма вероятно, что почти во все частях суши темп потепления будет большим, чем в среднем по земной поверхности, в особенности, в холодный сезон в высоких широтах Северного Полушария (очень заметным – на 40% больше среднего глобального – будет потепление на севере Северной Америки, а также в северной и центральной Азии); в противоположность этому темпы потепления будут меньше среднего глобального в Южной и Юго-восточной Азии в летний период и на юге Южной Америки в зимний период;
- тип Эль-Ниньо станет более выраженным в температурном режиме в тропической тихоокеанской зоне, с большим потеплением на востоке, чем на западе, и с соответствующим сдвигом осадков на восток;
- средняя глобальная концентрация водяного пара и осадки возрастут в XXI веке; вероятно, что к середине века осадки в зимний период возрастут в средних и высоких широтах и в Антарктике; в низких широтах над континентами тренды могут быть противоположными по знаку в различных регионах;
- средний глобальный уровень океана возрастет к 2100 г. по сравнению с 1990 г. на 0,09 – 0,88 м (диапазон соответствует всей совокупности SRES-сценариев); возрастание произойдет вследствие теплового расширения и потери массы континентальными льдами.

Комары и здоровье человека

Кровососущие комары являются одним из самых важных компонентов гнуса. Под гнусом понимается комплекс кровососущих двукрылых (комары, мошки, слепни, мокрецы, а в южных районах и москиты), досаждающих человеку, а также животным, от тундры и тайги до самых южных границ нашей страны. Сам по себе прокол покровов тела хоботком комара неощутим, так как толщина вводимых в кожу частей хоботка комара составляет 0,05 – 0,06 мм. Однако комар при проколе вводит в ранку несколько микрограммов слюны, препятствующей свертыванию крови. Она вызывает местную аллергическую реакцию, выражающуюся в зуде и отеке места укуса. Разные люди неодинаково реагируют на укусы комаров. Неодинакова и

реакция на укусы различных представителей кровососущих комаров *(Culicidae)*. Уколы комаров *Anopheles* для большинства людей малочувствительны, тогда как уколы *Culex* и, особенно, *Aedes* вызывают резкую болезненную реакцию. Массовые укусы комаров приводят к тяжелому отеку кожных покровов, вызывают нестерпимый зуд. При наличии специфической аллергии массовое нападение комаров может привести к смерти человека. Основной вред здоровью приносит действие слюны. Представим себе, что одна самка выпивает 4 мг крови (в действительности это количество составляет 2–7 мг, в зависимости от вида и размера комара). Тогда 10 тысяч самок выпьют всего лишь 40 г крови. Напомним, что донор еженедельно может сдавать 200-400 мл крови в течение многих лет без вреда для здоровья. Тем не менее, при нападении 10 тысяч самок судьба человека будет незавидной.

Массовые нападения комаров наносят ущерб здоровью человека, снижают производительность труда, в ряде регионов делают какие-либо работы на открытом воздухе без средств индивидуальной защиты невозможными. Досаждают комары и в помещениях, иногда даже в зимний период. Последнее связано с массовым круглогодичным выплодом комаров *Culex pipiens* в затопленных подвалах жилых домов, подземных коммуникациях и других сооружениях (Виноградова, 1997, 2004). Нападение комаров снижают продуктивность и работоспособность сельскохозяйственных животных. Однако неизмеримо больший ущерб здоровью человека комары наносят, как переносчики инфекционных и паразитарных заболеваний различной этиологии. Велико, но гораздо слабее изучено значение комаров в переносе болезней сельскохозяйственных животных. Почти не изучена, но, несомненно, существенна роль комаров в переносе болезней диких животных.

Возбудителями болезней, которые могут переносить комары, являются вирусы, бактерии, простейшие, гельминты.

При переносе возбудителей болезней комары могут быть механическими и специфическими переносчиками. В организме механического переносчика возбудитель не развивается и не размножается, а переживает некоторое время. Перенос возбудителя осуществляется сразу же после того, как переносчик получил тем или иным способом возбудителя, в том числе и при прерванном кровососании. С течением времени возбудитель исчезает из организма переносчика.

В организме специфического переносчика возбудитель проходит определенные стадии развития и размножается (*Plasmodium sp.*) или только размножается (вирус желтой лихорадки). Поэтому переносчик оказывается способен передать возбудителя не сразу же, а спустя некоторое время, когда эти процессы завершатся и возбудитель достигнет слюнных желез комара. Как правило, возбудитель сохраняется в организме переносчика до конца жизни последнего. В ряде

случаев имеет место трансовариальная и трансфазовая передачи возбудителя. В первом случае зараженные имаго откладывают яйца, в которых уже имеется возбудитель, который сохраняется обычно на протяжении всей жизни следующего поколения, во втором случае возбудитель, попав в организм переносчика на преимагинальных стадиях развития, сохраняется и у имаго. Для комаров оба эти явления редки и встречаются при заражении некоторыми вирусами, однако широко распространены среди клещей и переносимых ими вирусов, спирохет, риккетсий.

Переносчик может быть одновременно специфическим для одной инфекции и механическим для другой. Например, комары *Anopheles* являются специфическими переносчиками малярии и филярий и в то же время и в той же местности могут быт механическими переносчиками туляремии и ряда вирусов.

Как правило, в переносе того или иного возбудителя участвует несколько переносчиков, одни из которых являются основными, а другие второстепенными. Значение переносчиков в эпидемическом процессе зависит от их биологических и экологических особенностей, сезонного хода численности и ряда других характеристик переносчика, возбудителя и очага инфекции в целом. Варьирование этих характеристик приводит к тому, что один и тот же переносчик может быть основным в одном очаге и второстепенным в другом.

Комары как механические переносчики

Кровососущие комары могут выступать в роли механических переносчиков некоторых вирусных и бактериальных заболеваний. Среди последних наиболее известна туляремия.

Это широко распространенное острое инфекционное заболевание вызывается бактерией *Francisella tularensis*. В природе циркулирует среди грызунов. Передается алиментарным, контактным, аспирационным и трансмиссивным путем. В организме комаров возбудитель способен сохраняться до месяца. Особенно интенсивно передача идет в летние месяцы, когда высока численность кровососущих членистоногих. В ней могут участвовать представители почти всех родов комаров, но наибольшее эпидемиологическое значение имеют виды *Aedes*, питающиеся на мелких грызунах. Экспериментально возбудитель выделен из комаров *Aedes cinereus, Ae. excrucians, Ae. vexans, Ae. caspius, Ae. flavescens, Mansonia richiardii, Anopheles hyrcanus, An. maculipennis.* Помимо комаров, в передаче туляремии участвуют слепни, мухи-жигалки, блохи, клещи (Гуцевич и др., 1970; Тарасов, 1988, 1996).

Комары также способны быть механическими переносчиками мелиоидоза. Это острая природно-антропургическая особо опасная

болезнь вызывается бактерией *Pseudomonas pseudomallei*. Основной путь заражения – алиментарный, но доказана и возможность передачи насекомыми (Руководство по зоонозам, 1983; Тарасов, 1988).

Комары как переносчики вирусов

Комары являются специфическими переносчиками большого числа вирусов. Из без малого 4 сотен известных арбовирусов три четверти способны передаваться комарами. Вирусы группируются в несколько семейств, в некоторых из них значительную часть составляют комариные арбовирусы. Эти семейства перечислены ниже.

Семейство *Togaviridae*. Один род *Alfavirus* с 31 представителем. Передаются комарами *Culex, Culiseta, Aedes, Mansonia, Trichoprosopon, Prosophora, Haemagogus*. К этому семейству относятся возбудители таких заболеваний, как венесуэльский, восточный, западный энцефаломиелиты лошадей, лихорадки чикунгунья, О'Ньонг-Ньонг, синдбис, Росс-ривер (эпидемический полиартрит).

Семейство *Flaviviridae*. Один род *Flavivirus* с 63 представителями. К этому семейству относятся возбудители таких опасных заболеваний, как желтая лихорадка, лихорадка денге, Западного Нила, а также энцефалиты японский, Сент-Луис, долины Муррея (австралийский). Переносятся комарами преимущественно подсемейства *Culicinae*. По данным Левкович, Гуцевич (1941), а также Петрищевой и др., (1964) (Цит. по: Виноградская, 1969) комары могут участвовать в циркуляции вируса клещевого энцефалита: выявлена их зараженность в природе и изредка имеют место клинические случаи, когда в анамнезе нет ни укуса клеща, ни употребления козьего молока (алиментарный путь заражения).

Семейство *Bunyaviridae*. Насчитывает около 200 представителей, относящихся к 5 родам: *Bunyavirus, Phlebovirus, Nairovirus, Uukuvirus, Hantavirus*. Наибольшее медицинское значение имеют среди них вирусы Тягиня, калифорнийского энцефалита, Рифт-валли.

Среди представителей других семейств вирусов, переносимых комарами и имеющих большое значение в патологии человека, не отмечено (Руководство по зоонозам, 1983; Львов и др., 1989; Тарасов, 1988, 1996).

Кровососущие комары, как переносчики арбовирусов, превосходят представителей других семейств двукрылых, а также клещей. Для ряда вирусов установлена трансовариальная, трансфазовая и венерическая передача, что делает комара эпидемически опасным при первом же кровососании. Вирусы, переносимые комарами, становятся причинной как локальных эпидемических вспышек, так и эпидемий и пандемий (Руководство по зоонозам, 1983; Львов и др., 1989; Тарасов, 1988, 1996).

Значительная часть связанных с комарами вирусов теплолюбива. Минимальная температура, при которой возможна репродукция вирусных частиц в организме переносчика, составляет 16–18°С. При повышении температуры окружающей среды до 28–30°С внешний инкубационный период, под которым понимается время, в течение которого вирус размножается в переносчике (чаще всего в кишечном эпителии), проникает в другие органы и ткани и, в конечном счете, накапливается в слюнных железах в количестве, составляющем эффективную заражающую дозу для позвоночного хозяина, существенно сокращается (Львов и др., 1989). Так, вирус желтой лихорадки в комарах *Aedes aegypti* накапливается в эффективной заражающей дозе за 18 суток при 21°С, за 11 суток при 23°С, за 8 при 25°С, за 6 при 36°С и за 4 при 37°С. При 18°С вирус не обнаруживается и через 30 суток (Тарасов, 1972, 1988, 1996).

Подобные свойства большинства переносимых комарами вирусов приводит к четко выраженной зональности их распространения, установленной Д. К. Львовым и соавторами (1989) (табл. 1).

Таблица 1.

Количество вирусов, переносимых комарами и клещами, в различных климатических поясах (Львов и др., 1989).

Основные переносчики	Вирусы	Климатические пояса				
		Экваториальный	Субэкваториальный	Тропический	Субтропический	Умеренный
Комары	*Togaviridae*	15	13	9	10	4
	Flaviviridae	20	19	11	6	6
	Bunyaviridae	62	62	26	21	13
	Всего	97	94	46	37	23
Клещи	*Togaviridae*	0	0	0	0	0
	Flaviviridae	2	2	3	4	11
	Bunyaviridae	3	7	13	5	9
	Всего	5	9	16	9	20

Как следует из приведенных в таблице 1 данных, по мере продвижения от экваториального климатического пояса к умеренному количество передаваемых комарами вирусов снижается в 4 раза, что говорит о выраженной климатической зависимости передачи вирусов комарами. В отношении вирусов, передаваемых клещами, такая закономерность не соблюдается, да и самих вирусов существенно меньше.

Процессы, связанные с потеплением климата, могут привести к расширению зоны, благоприятной для распространения арбовирусов и вызываемых ими заболеваний как за счет повышения температуры

воздуха (Алексеев, 1998, 2004, 2006), так и за счет повышения количества мест выплода переносчиков, а также изменения гидрологических и гидробиологических характеристик водоемов, что сделает их более приемлемыми для развития личинок *Culicidae*. Изменится характер хозяйственной деятельности людей, будут заселяться территории, считающиеся ныне экстремальными по условиям обитания человека. Это может привести к тому, что увеличится число людей, проживающих в зонах с большим риском заражения арбовирусными заболеваниями (Climate Change 2001, 2001b; Climate Change 2007, 2007).

В заключение раздела приведем таблицу 2, в которую сведены наиболее важные для патологии человека климатозависимые арбовирусные заболевания, передаваемые комарами, их географическое распространение и основные переносчики.

Таблица 2.

Климатозависимые арбовирусные заболевания, их географическое распространение и основные переносчики (Тропические болезни, 1979; Тарасов, 1988; Львов и др., 1989).

Арбовирусные заболевания	Распространение	Основные переносчики
Японский энцефалит	Приморье, Корея, Япония, Китай, Малайзия, Индия	*Cx. pipiens, Cx. bitaeniorhynchus, Cx. tritaeniorhynchus, Cx. gelidus, Cx. vishnui, Ae. togoi, Ae. koreicus, Ae. esoensis*
Лихорадка денге	Юго-Восточная Азия, Центральная и Южная Америка, Средиземноморье	*Ae. aegypti, Ae. niveus, Ae. albopictus*, Ae. scutelllaris, Ae. polinesiensis*
Желтая лихорадка	Центральная и Западная Африка, Центральная и Южная Америка.	*Ae. aegypti, Ae. albopictus*, Ae. africanus, Ae. simpsoni, Ae. leucocelaenus, Haemagogus spegazzinii, H. lucifer, H. dentatus, H. equnus, H. janthinomis*
Энцефалит Сент-Луис	США, Южная Канада, Мексика, Аргентина, Колумбия, Суринам, Тринидад и Тобаго	*Cx. pipiens quinquefasciatus, Cx. pipiens pipiens, Cx. tarsalis, Ae. dorsalis*
Лихорадка Западного Нила	Африка (практически повсеместно), Южная Евразия	*Cx. pipiens quinquefasciatus, Cx. univittatus, Cx. antennatus, Cx. theileri, Cx. vishnui, Cx. molestus, M. metallica*
Энцефалит долины Муррея (австралийский)	Австралия, Новая Гвинея	*Cx. bitaeniorhynchus, Cx. annulirostris, Ae. normalrnsis*

Таблица 2 (продолжение).

Арбовирусные заболевания	Распространение	Основные переносчики
Венесуэльский энцефаломиелит лошадей	Аргентина, Венесуэла, Колумбия, Панама, Мексика, Эквадор, Тринидад и Тобаго, Суринам, Гондурас, Перу, Бразилия, Сальвадор, Никарагуа.	Ряд представителей родов *Culex, Aedes, Anopheles, Prosophora, Mansonia*
Восточный энцефаломиелит лошадей	Канада (Онтарио), восточные штаты США, Панама, Мексика, Бразилия, Аргентина, Доминиканская Республика, Куба, Сальвадор	*Cs. melanura, Ae. sollicitans, Ae. vexans, Ae. taeniorhynchus, Cx. restuans. P. confinnis*
Западный энцефаломиелит лошадей	Западные штаты США, Канада, Мексика, Аргентина, Уругвай, Бразилия, Куба, Гайана	*Cs. melanura, Cx. tarsalis, Cx. pipiens quinquefasciatus, Ae. dorsalis, Ae. uniformatus, M. perturbans*
Лихорадка О'Ньонг-Ньонг	Африка от Сенегала на западном побережье до Мозамбика на восточном	*An. funestus, An. gambia*
Лихорадка Синдбис	В Африке почти повсеместно	*Cx. univittatus, Cx. antennatus*
Лихорадка Росс-ривер (эпидемический полиартрит)	Австралия, Океания, Новая Гвинея	*Ae. vigilax, Ae. polynesiensis, Ae. normalensis, An. amictus, M. uniformis*
Лихорадка чикунгунья	Африка (Танзания, Мозамбик, Зимбабве, Уганда, ЮАР), юго-восточная Азия (Индия, Мьянма, Таиланд) и Океания (Индонезия)	*Cx. pipiens quinquefasciatus, Ae. aegypti, Ae. africanus*
Лихорадка Тягиня	Западная, Центральная Южная и Восточная Европа, Сибирь, Дальний Восток, Мозамбик	*Ae. caspius, Ae. vexans, Ae. cantans, Ae. cinereus, Ae. dianteus, Ae. communis, An. hyrcanus, Cx. modestus, Cx. pipiens, Cs. annulata*
Калифорнийский энцефалит	Канада (Манитоба), США (Калифорния, Нью-Мексико, Техас, Юта)	*Cx. tarsalis, Ae. melanimon, Ae. dorsalis, Ae. vexans, Ae. nigromaculis, P. signipennis, Cs. inornata*
Лихорадка Рифт-валли	Африка: Гвинея, ЦАР, ЮАР, Мозамбик, Зимбабве, Кения, Уганда, Танзания, Египет, Судан	*Cx. pipiens quinquefasciatus, Cx. antennatus*

Примечание. **Ae. albopictus* в последнее время широко распространился в Новом свете, где успешно конкурирует с *Ae. aegypti*, как за местообитания, так и в качестве переносчика (Маркович, 1997).

Комары как переносчики филярий

Кровососущие комары являются специфическими переносчиками лимфатических филяриатозов – вухереriоза (возбудитель *Wuchereria bancrofti*) и бругиоза (возбудитель *Brugia malay, Brugia timori*). Эти возбудители относятся к нематодам семейства *Filariidae*, откуда и обобщенное название заболеваний. Половозрелые гельминты паразитируют в лимфатической системе человека, являющегося, следовательно, основным хозяином паразита, а в роли промежуточного хозяина и переносчика выступают различные представители родов *Culex, Aedes, Mansonia* и *Anopheles* (табл. 3). По данным ВОЗ, лимфатическими филяриатозами в мире поражено около 120 млн. человек, из них 90 % – вухереriозом (Бронштейн, Токмалаев, 2004).

Оба паразита сходны по своей биологии. Взрослые черви достигают размеров 40–100 мм у *Wuchereria bancrofti* и 25–60 мм у *Brugia malayi* (первая цифра относится к самцам, вторая к самкам). Половозрелые самки отрождают личинок (микрофилярий) длиной 0,13–0,3 мм, которые мигрируют из лимфатических протоков в кровяное русло. Они покрыты чехликом из тонкой прозрачной яйцевой оболочки. По глубоким и периферическим кровеносным сосудам микрофилярии циркулируют закономерным образом, подчиняясь физиологическим биоритмам и суточному циклу активности хозяина. По этому признаку выделяют периодический (дневной и ночной) и апериодический типы филяриатозов. В первом случае микрофилярии появляются в подкожных капиллярах в определенное время суток, что соответствует ритмам активности переносчиков, а во втором – присутствует постоянно, но в ряде случаев с некоторыми колебаниями в течение суток (субпериодичность). Для большинства штаммов рассматриваемых гельминтов свойственна ночная периодичность.

Попав вместе с выпитой кровью в кишечник комара, микрофилярии освобождаются от чехлика и мигрируют сквозь стенку средней кишки в полость тела, а затем в грудные мышцы насекомого. Там они дважды линяют. В зависимости от температуры внешней среды это занимает от 1,5 до 6 недель. Затем они снова попадают в полость тела и скапливаются в ротовых органах комара, откуда при кровососании попадают в кровь человека, а затем в лимфатические сосуды и узлы, где и достигают взрослого состояния.

Вухереriоз широко распространен в странах с жарким и влажным климатом (рис. 1). В наибольшей степени от него страдает население стран Экваториальной Африки, Центральной и Южной Америки (Бразилия, Панама, Гватемала, Венесуэла, Гвиана), Индокитая, а также островов Тихого и Индийского океанов и северного побережья Австралии. Это заболевание является антропонозом, то есть единственный основной хозяин *Wuchereria bancrofti* – человек. Заболеванию подвер-

жено как сельское, так и городское население, особенное его социально-неблагополучные слои.

Таблица 3.

Переносчики лимфатических филяриатозов человека*

Филярия (тип)	Эндемическая зона**	Переносчики***
Brugia malayi (периодический)	Южная Азия	***An. anthropophagus, An. barbirostris, An. campestris, An. donaldi, An. kweiyangensis,*** *An. nigerrimus,* ***An. sinensis, M. annulata, M. annulifera, M. uniformes,*** *M. bonneae, M. dives, M. indiana, Ae. kiangensi, Ae. togoi*
Brugia malayi (субпериодический)	Южная Азия	***M. annulata, M. bonneae, M. uniformes, M. dives,*** *M. (Coquillettidia) crassipes*
Brugia timori (периодический)	О-ва Тимор, Флорес	***An. barbirostris***
Wuchereria bancrofti (периодический)	Тропическая Америка (1)	***Cx. quinquefasciatus, An. darlingi,*** *An. albimanus, An. aquasalis, Ae. scapularis, Ae. taeniorhynchus, M. titillans*
Wuchereria bancrofti (периодический)	Тропическая Африка (2)	***Cx. quinquefasciatus,*** *Cx. antennatus,,* ***An. arabiensis, An. funestus, An. gambiae, An. melas, An. merus,*** *An. hancocki, An. nili, An.pauliani, An. wellcomei*
Wuchereria bancrofti (периодический)	Средний Восток (3)	***Cx. molestus, Cx. quinquefasciatus,*** *Cx. antennatus*
Wuchereria bancrofti (периодический)	Южная Азия (4)	***Cx. quinquefasciatus,*** *Cx. bitaeniorhynchus, Cx. sitiens,* ***Ae. poicilius,*** *Ae. togoi,* ***An. balabacensis, An. dirus, An. donaldi, An. flavirostris, An. candidiensis, An. anthropophagus, An. letifer, An. leucosphyrus, An. macukatus, An. minimus, An. sinensis, An. subpictus, An. vagus, An. whartoni,*** *An. aconitus, An. barbirostris, An. kweiyangensis, An. nigerrimus, An. philippinensis, An. tesselatus*
Wuchereria bancrofti (периодический)	Дальний Восток (5)	***Cx. pipiens pallens, Cx. quinquefasciatus***
Wuchereria bancrofti (периодический)	Новая Гвинея (6)	***An. farauti, An. koliensis, An. punctulatus,*** *An. bancrofti,* ***Cx. quinquefasciatus,*** *Cx. bitaeniorhynchus, Cx. annulirostris, Ae. kochi, M. uniformes*
Wuchereria bancrofti (субпериодический)	Южная Азия (4)	***Ae. harinasutai, Ae. niveus***
Wuchereria bancrofti (субпериодический)	Полинезия (7)	***Ae. cooki, Ae. fijiensis, Ae. kesseli, Ae. oceanicus, Ae. polynesiensis, Ae. pseudoscutellaris, Ae. samoanus, Ae. tutuilae, Ae. upolensis, Ae. vigilax***

Примечания: * Таблица составлена по (Гуцевич и др., 1970; Тарасов, 1988, 1996; Geographical distribution..., 1989).
** См. Рис. 1.
*** Основные переносчики данной области выделены.

Бругиоз распространен менее широко (рис. 1). Эндемичными по этому заболеванию являются в основном страны Юго-Восточной Азии (Индия (частично), Шри-Ланка, страны Индокитая, Индонезия, Китай, Малайзия, Филиппины). Известно 2 штамма возбудителя, для одного их них свойственна ночная периодичность, для другого – ночная субпериодичность. Болеет по большей части сельское население. Для первого штамма основным хозяином является исключительно человек, а для второго также и обезьяны, кошки, собаки, панголины, так что в целом для *Brugia malayi* круг хозяев шире, чем для *Wuchereria bancrofti* (Тропические болезни, 1979; Тарасов, 1988; Бронштейн, Токмалаев, 2004).

Интересно, что зараженные *Brugia malayi* комары более восприимчивы к вирусу лихорадки денге (Turell et al., 1987). Если такой факт является не уникальным, а закономерным для других пар вирус-филярия, то становится понятной выраженная зональность переносимых комарами вирусов и отсутствие таковой у клещей (табл. 1).

Таким образом, и для гельминтов, и для комаров, которые являются их промежуточными хозяевами и переносчиками, очевидна зависимость развития и распространения от климатических факторов, в первую очередь температуры и влажности, характерных для экваториального, субэкваториального и отчасти тропического климатических поясов. Прогнозируемое изменение климата может привести к увеличению риска заражения этими тропическими гельминтозами и расширению их ареалов (Climate Change 2001, 2001a, b).

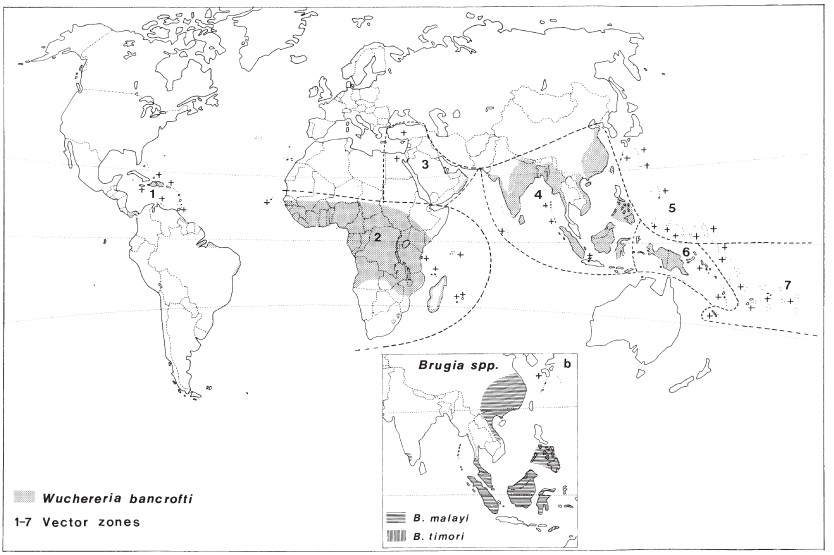


Рисунок 1. Распространение лимфатических филяриатозов человека (по Geographical distribution..., 1989).

Комары как переносчики малярии

Среди всех болезней, переносимых комарами, наиболее известной и наиболее распространенной является малярия. В настоящее время известно около 70 видов малярийных плазмодиев *(Plasmodium)*, паразитирующих у ящериц *(P. floridense)*, птиц *(P. gallinaceum, P. lophurae, P. fallax)*, млекопитающих. Среди последних малярийные паразиты выделены у летучих мышей *(P. roussetti)*, копытных – индийского буйвола *(P. bubalis)*, виргинского белохвостого оленя *(P. odocoilei)*, азиатского оленька *(P. traguli)*, африканского дукера *(P. cephalophi, P. brucei)*, мышевидных грызунов *(P. aegyptensis, P. berghei, P. yoelii, P. vinckei, P. chabaudi)*, азиатских летяг *(P. booliati, P. watteni)*, африканских летяг *(P. anomaluri, P. landauae,P. pulmophilum)*, африканского дикобраза *(P. atheruri)* (Гуцевич и др., 1970; Лысенко, 1986; Попов и др., 2004).

Среди человекообразных обезьян у шимпанзе выделено 3 вида малярийных паразитов *(P. schwetzi, P. reichenowi, P. malariae)*, у гориллы – 1 *(P. schwetzi)*, у орангутана – 2 *(P. pitheci, P. sylvaticum)*. У низших обезьян Африки выделен *P. gonderi*, а среди низших обезьян Азии – 4 вида у макак *(P. cynomolgi, P. inui, P. fieldi и P. simiovale)* и 7 видов у гиббонов. У американских обезьян найдено всего 2 вида паразита *(P. simium* и *P. brasilianum)*, которые, однако, поражают представителей многих родов и видов широконосых обезьян (Гуцевич и др., 1970; Лысенко, 1986; Попов и др., 2004).

И, наконец, люди заражаются 4 видами малярийных паразитов – *P. vivax, P. falciparum, P. malariae* и *P. ovale*. В очень редких случаях возможно заражение человека малярийными паразитами человекообразных обезьян.

Переносчиками возбудителей малярии млекопитающих являются только комары рода *Anopheles*. Переносчиками возбудителей малярии рептилий и птиц, наряду с *Anopheles*, могут быть и представители других родов кровососущих комаров – *Culex, Aedes, Mansonia, Culiseta, Armigeres*. Представление о спектре возможных переносчиков одного только вида *P. gallinaceum* дает таблица 4, построенная по данным P. C. C. Garnham (1966) и дополненная нами.

В отношении возбудителей малярии животных далеко не всегда исчерпывающим образом выявлены особенности жизненного цикла паразита, в частности, могут оставаться неизвестными переносчики, не выявлен полный круг позвоночных хозяев, не установлены температурные пределы развития возбудителя в переносчике и ряд других факторов.

Цикл развития малярийного плазмодия сложен, его можно разделить на две большие части: 1) половое размножение (спорогония), протекающее в организме переносчика, являющегося основным хозяином паразита и 2) бесполое размножение (шизогония), которое проходит в организме позвоночного (промежуточного) хозяина (рис. 2).

Таблица 4.

Комары *Culicidae*, восприимчивые к возбудителю малярии кур *P. gallinaceum* в эксперименте

Род	Подрод	Вид
Aedes	*Aedimorphus*	*Ae. jamesi, Ae. stokesi, Ae. vexans*
	Finlaya	*Ae. albolateralis, Ae. atropalpus, Ae. chrysolineatus, Ae. geniculatus, Ae. japonicus, Ae. pseudotaeniatus, Ae. togoi*, Ae. triseriatus*
	Ochlerotatus	*Ae. campestris, Ae. canadensis, Ae. cantator, Ae. lepidus, Ae. stimulans, Ae. trivittatus*
	Stegomyia	*Ae. aegypti, Ae. albopictus, Ae. pseudoalbopictus, Ae. scutellaris, Ae. unilineatus, Ae. vittatus*
Armigeres	*Armigeres*	*Ar. aureolineatus, Ar. kuchingensis, Ar. obturbans, Ar. subalbatus*
	Leicesteria	*Ar. annulipalpi, Ar. magnus*
Culex	*Culex*	*Cx. quinquefasciatus, Cx. mimulloides, Cx. salinarius, Cx. tarsalis*
Culiseta	*Culiseta*	*Cs. inornata*
Anopheles	*Anopheles*	*An. freeborni, An. quadrimaculatus, An. sacharovi***
	Cellia	*An. pulcherrimus***
Mansonia	*Coquillettidia*	*M. crassipes***, M. perturbans, M. albimanus*

Примечания: *Дополнено (Расницын и др., 1990)
**Установлено (Расницын и др., 1989; Расницын и др., 1991)
***Естественный переносчик в Юго-восточной Азии (Garnham, 1966)

Инвазирование человека малярией происходит, когда на нем питается зараженная самка комара *Anopheles*. При кровососании самка вводит слюну, в которой содержатся спорозоиты. С током крови спорозоиты достигают печени и внедряются в гепатоциты, где начинают расти, проходя стадии трофозоита и шизонта. Содержимое последнего многократно делится, затем цитоплазма вокруг ядер обособляется и образовавшиеся мерозоиты выходят из клетки в кровяное русло. Количество мерозоитов очень велико – до 10 тысяч у *P. vivax*, 15 тысяч у *P. ovale*, 20 тысяч у *P. malariae* и до 40 тысяч у *P. falciparum*. Описанный процесс называется экзоэритроцитарной (тканевой) шизогонией. Этот процесс однонаправленный – тканевые мерозоиты повторно не заражают гепатоциты. Длительность экзоэритроцитарной шизогонии составляет 5–7 суток при заражении *P. falciparum*, 6–8 суток при заражении *P. vivax*, 9 суток при *P. ovale*. и 14–16 суток при *P. malariae*. Клинические проявления болезни в это время не возникают.

Тканевая шизогония *P. vivax* и *P. ovale* имеет некоторые особенности. Спорозоиты этих видов возбудителей малярии гетерогенны. Часть спорозоитов начинает развиваться немедленно по проникновении в гепатоциты (тахиспорозоиты), давая картину, описанную

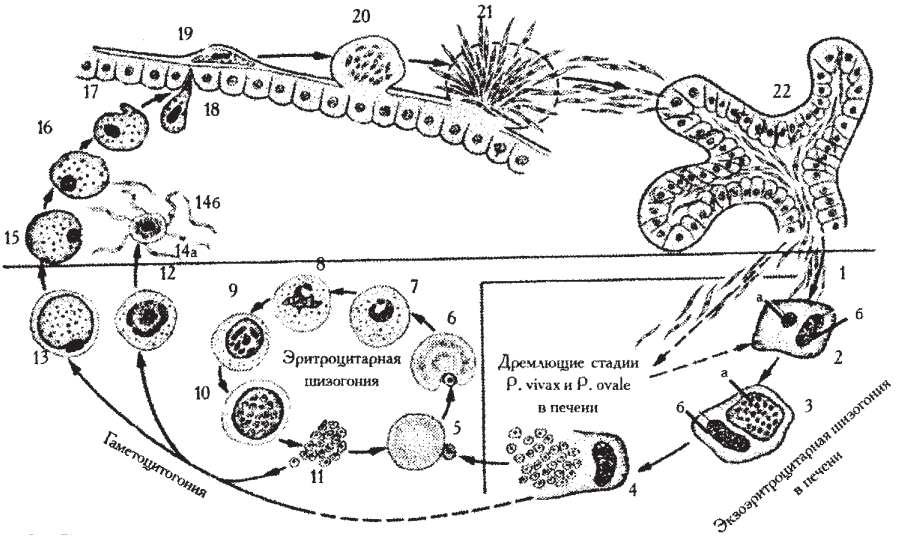


Рисунок 2. Схема жизненного цикла возбудителя малярии человека (приводится по: Бронштейн, Токмалаев, 2004).

Обозначения: 1-13 шизогония, 14-22 спорогония.2-4 экзоэритроцитарная шизогония, 5-11 эритроцитарная шизогония, 11-13 гамецитогония.

1 – Поступление спорозоитов со слюной комара в кровяное русло человека при кровососании и внедрение их в гепатоциты. 2 – Экзоэритроцитарный трофозоит (а – трофозоит, б – ядро гепатоцита). 3 – Экзоэритроцитарный шизонт (а – шизонт, б – ядро гепатоцита). 4 – Выход экзоэритроцитарных мерозоитов из гепатоцита в кровь. 5 – Прикрепление мерозоита (экзоэритроцитарного, а затем эритроцитарного) к мембране эритроцита. 6 – Инвагинация мембраны эритроцита в месте прикрепления мерозоита. 7 – Кольцевидный эритроцитарный трофозоит. 8 – Юный (амебовидный) эритроцитарный трофозоит. 9 – Незрелый эритроцитарный шизонт. 10 – Зрелый эритроцитарный шизонт. 11 – Эритроцитарный мерозоит. 12 – Микрогаметоцит (мужской гаметоцит). 13 – Макрогаметоцит (женский гаметоцит). 14 – а) Эксфлагелляция (образование мужских гамет); б) Микрогамета. 15 – Макрогамета. 16 – Оплодотворение. 17 – Зигота. 18 – Оокинета. 19 – Преобразование оокинеты в ооцисту под базальной мембраной средней кишки. 20 – Ооциста. 21 – Выход спорозоитов из зрелой ооцисты. 22 – Спорозоиты в слюнной железе самки Anopheles.

Пунктирной стрелкой показано внедрение брадиспорозоитов в гепатоцит.

выше. Другая же часть (а иногда все) начинает развиваться спустя несколько недель, месяцев и даже лет (брадиспорозоиты), давая отдаленные рецидивы или первичные проявления болезни.

Тканевые мерозоиты прикрепляются к оболочке эритроцита и проникают внутрь. Там происходит рост паразита, проходящего стадии кольцевидного и амебовидного трофозоитов (одноядерные формы), незрелого и зрелого шизонта (многоядерные формы) и мо-

рулы (мерозоиты в оболочке (тени) эритроцита). В завершение процесса оболочка эритроцита лопается, и мерозоиты выходят в кровь. Это – циклический процесс эритроцитарной шизогонии. Заражение эритроцитов мерозоитами происходит многократно, самих же мерозоитов насчитывается 12–18 у *P. vivax*, 6–12 у *P. malariae*, 12–24 у *P. falciparum* и 6–12 у *P. ovale*. Длительность эритроцитарной шизогонии составляет 48 часов у *P. vivax*, *P. falciparum, P. ovale* и 72 часа у *P. malariae*. Пароксизмы малярии связаны с массовым выходом мерозоитов в кровяное русло.

Большая часть эритроцитарных мерозоитов дает начало бесполым (вегетативным) формам, но некоторые из них развиваются в предшественники половых клеток – гаметоцитов. Этот процесс называется гаметоцитогония. Гаметоциты развиваются существенно больше, чем бесполые формы и живут дольше. Так, у *P. falciparum* развитие гаметоцита занимает 12 суток, а средняя продолжительность его жизни – около 4 суток (Руководство по тропическим болезням, 1983; Лобан, Полозок, 1983; Лысенко, 1986; Лысенко и др., 2003; Попов и др., 2004; Бронштейн, Токмалаев, 2004).

Голодная самка комара, питаясь кровью больного малярией, получает как здоровые клетки крови, так и эритроциты, содержащие половые и бесполые формы малярийного паразита. Бесполые формы перевариваются, как и компоненты крови, а гаметоциты освобождаются от оболочки эритроцита и превращаются в гаметы. При этом микрогаметоцит в течение нескольких минут претерпевает три деления ядра, в результате чего образуется 8 подвижных веретеновидных микрогаметы. Этот процесс называется эксфлагелляцией. Инициирует его понижение температуры и изменение pH среды. Половые клетки плазмодия находят друг друга, и происходит оплодотворение, в результате которого образуется диплоидная зигота. Вскоре происходит редукционное деление, и зигота преобразуется в подвижную (снова гаплоидную) оокинету.

Оокинета по межклеточным пространствам проникает сквозь эндотелий под базальную мембрану средней кишки, где трансформируется в ооцисту. Выход оокинеты из просвета кишечника может происходить в течение не более 5–8 часов после кровососания, так как сразу же вокруг порции крови начинает формироваться перитрофическая мембрана, отделяющая ее от стенки кишки, растет активность пищеварительных ферментов. Ооциста существенно увеличивается в размерах, ее ядро многократно делится. В конечном счете, образуется множество мелких веретеновидных клеток – спорозоитов. Их количество может достигать 10 тысяч. Зрелая ооциста лопается и спорозоиты попадают в полость тела комара. С током гемолимфы они попадают к слюнным железам, сквозь их клетки проникают в канал железы и скапливаются там. Происходящий в организме комара про-

цесс носит название спорогонии. Спорозоиты сохраняются у самки комара в течение всей ее жизни. При одном кровососании самка со слюной вводит лишь небольшую часть спорозоитов, содержащихся в ее слюнных железах, поэтому она способна к многократному заражению позвоночного хозяина (Алексеев, 1986; Лысенко, 1986; Лысенко и др., 2003; Попов и др., 2004).

Как влияет малярийный паразит на позвоночного хозяина, хорошо известно. В патологии малярии почти не осталось «белых пятен» (Тропические болезни, 1979; Руководство по тропическим болезням, 1983; Лобан, Полозок, 1983; Лысенко и др., 2003; Бронштейн, Токмалаев, 2004; Попов и др., 2004). Гораздо менее известно, как влияет малярийный плазмодий на комара. Паразит живет в теле комара, перемещается сквозь многие его органы и ткани, существует за счет ресурсов его организма. Вряд ли его присутствие неощутимо. На внешней поверхности средней кишки может располагаться до 2 тысяч ооцист (рис. 3), общая масса которых вполне сравнима с массой той же кишки. И вся эта масса поглощает питательные вещества из организма, выводит туда же свои экскреты. Это создает дополнительную нагрузку на пищеварительную и выделительную системы комара.

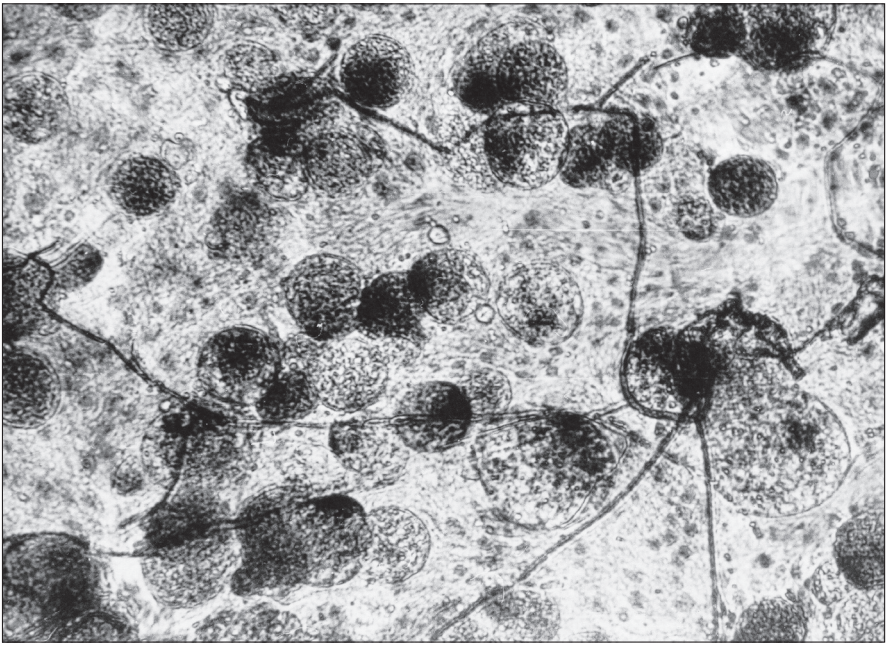


Рисунок 3. Фрагмент средней кишки *An. sacharovi* с ооцистами *P. gallinaceum* (ориг.).

Литературных данных по этому вопросу сравнительно немного. Многие из них обобщены в обзорной работе С. П. Расницина (1986). Некоторые данные приводятся также в работе А. Н. Алексеева (1986). Значительная часть данных противоречива. Так, на одной и той же паре возбудитель – переносчик один автор констатирует наличие влияния возбудителя на свойства переносчика, а другой – его отсутствие. Это свидетельствует, скорее всего, не о методических ошибках, а о том, что исследуемое влияние незначительно. Воздействие различных возбудителей малярии на такие свойства переносчика, как выживаемость, способность к полету, плодовитость, чувствительность к инсектицидам как во время роста и развития ооцист, так и после завершения спорогонии, невелико или отсутствует. В более поздних работах на созданных нами лабораторных моделях циркуляции малярии не выявлено достоверных различий между зараженными *P. gallinaceum* и незараженными самками *Ae. togoi, An sacharovi* и *An. pulcherrimus* по выживаемости и плодовитости (Расницын и др., 1990; Расницын и др., 1991). Видимо, связь между *Anopheles* и *Plasmodium* очень древняя, переносчик и возбудитель достигли высокой степени взаимной адаптации, обеспечивающей их сосуществование без значительного ущерба.

В отношении того, как влияет организм переносчика на возбудителя, известно еще меньше. Наши исследования позволили сделать предположение о зависимости восприимчивости комара к возбудителю малярии от баланса гормонов в его организме (Расницын и др., 1993; Званцов, Ясюкевич, 1994; Ясюкевич, Званцов, 1999). На экспериментальной модели циркуляции малярии, состоящей из переносчика *An. sacharovi* и возбудителя *P. gallinaceum* было показано, что заражение самок комаров возможно только при успешном протекании оогенеза. Самки, не развившие яиц после питания на зараженном цыпленке, не заражаются возбудителем малярии. Принудительное ограничение количества выпиваемой крови (самок снимали с донора, когда они поглощали примерно половинную порцию) приводит к снижению доли самок, развивших яйца и соответственно, доли зараженных. Аналогичную картину дает заражение молодых, недавно вылетевших из куколок самок (Расницын и др., 1993). Развитие яичников у комаров происходит под совместным контролем ювенильного гормона и экдизона (Кожанова, Реутская, 1983; Филиппович, Кутузова, 1985; Тыщенко, 1986). Логично было предположить, что успешное прохождение спорогонии зависит от содержания или взаимодействия этих гормонов (по крайней мере, в данной паре *An. sacharovi – P. gallinaceum*). Для стимуляции развития яичников был использован синтетический аналог ювенильного гормона – ювемон (Званцов, Ясюкевич, 1994). Оказалось, что ювемон стимулирует вителлогенез, особенно при неполном кровососании. Возбудитель и в

этой серии экспериментов обнаруживается только у самок с яйцами. Достоверных различий в обилии возбудителя у самок, получавших и не получавших препарат (и развивших в обоих случаях яйца), не выявлено. У самок, получивших половинную порцию крови и развивших яйца, количество ооцист меньше на 30–50%. Ювемон оказывает только опосредствованное воздействие: повышение доли самок, развивших яйца, способствует повышению заражаемости. Непосредственное влияние ювемона на заражаемость отсутствует.

Антагонистами гонадотропных гормонов являются прекоцены (антиювеноиды) и производные имидазола (подавляют синтез экдизона) (Филиппович и др., 1988). Для воздействия на гормональную систему комаров в нашей работе был использованы прекоцен I и трихопол (Ясюкевич, Званцов, 1999). Действие прекоцена ведет к статистически достоверному снижению доли зараженных среди самок с яйцами. Другие исследованные параметры в опыте и контроле достоверно не отличаются. Выявленная закономерность сохраняется: самки, не развившие яйца, не заражаются. Действие трихопола ведет к подавлению вителлогенеза (доля самок с яйцами уменьшается) и нарушению упомянутой выше закономерности. Самки, не развившие яйца после кровососания, становятся восприимчивыми к возбудителю, хотя и в меньшей степени, чем самки с яйцами.

Зависимость восприимчивости комара к возбудителю малярии от баланса гормонов в его организме очевидна. Трудно сказать, является ли это всеобщей закономерностью или уникальным свойством лабораторной модели циркуляции малярии *An. sacharovi – P. gallinaceum*. Бесспорно, что затронутый вопрос заслуживает дальнейшего внимания, так как дает основания говорить не только об основных и второстепенных («хороших» и «плохих») переносчиках, но и о «восприимчивом» и «невосприимчивом» состоянии одного и того же переносчика (Расницын и др., 1993; Званцов, Ясюкевич, 1994; Ясюкевич, Званцов, 1999).

Как уже говорилось, возбудителей малярии человека переносят только комары *Anopheles*. Но далеко не все малярийные комары в действительности связаны с возбудителями малярии. Этот род включает в себя около 500 видов, распределяемых по 6 подродам, а реально участвуют в переносе малярии человека около 100 видов (табл. 5). Еще какая-то часть видов участвует в переносе возбудителей малярии животных. Восприимчивость различных видов комаров к одному и тому же виду возбудителя малярии может существенно различаться. Так, в процессе работы, завершившейся созданием упомянутых выше новых лабораторных моделей циркуляции малярии с участием возбудителя малярии кур *P. gallinaceum* и переносчиков *An. sacharovi* и *An. pulcherrimus* (Расницын и др., 1989; Расницын и др., 1991), были проведены эксперименты по заражению ряда видов комаров, как ма-

лярийных, так и немалярийных, указанным возбудителем. Высоко восприимчивыми к нему оказались *An. sacharovi*, *An. pulcherrimus*, *Ae. togoi*, *Ae. aegypti*, причем зараженность трех первых видов не коррелировала с зараженностью последнего, использовавшегося в качестве контрольного. *An. atroparvus* маловосприимчив, *An. stephensi*, *An. superpictus* и *Cx. pipiens* невосприимчивы к данному возбудителю. Однако, эти виды комаров восприимчивы к другим видам *Plasmodium*.

Области в таблице 5 приводятся по (MacDonald, 1957) (рис. 4). В основу их были положены зоогеографические области мира. G. MacDonald откорректировал их, придав малариологическую направленность и назвал, в точном переводе, «эпидемиологические малярийные зоны». В каждой зоне передачу малярии осуществляет специфический комплекс переносчиков, причем один и тот же вид комара может быть основным переносчиком в одной зоне и второстепенным в соседней.

Передача и само существование малярии зависит от климатических факторов. Процесс спорогонии происходит в пойкилотермном организме и зависит от температуры окружающей среды. Изменения температуры внешней среды тут же сказываются на изменении температуры внутренней среды организма переносчика, где и обитает возбудитель, хотя то и другое значения могут быть не вполне тождественны. Известно, что, при небольшой влажности температура тела переваривающей кровь самки снижается по отношению к окружающей температуре на 1–3°С, а при высокой влажности и температуре ниже 25°С, наоборот, повышение температуры тела комара может достигать 1°С. Даже небольшие отклонения температуры тела комара могут сказываться на развитии возбудителя малярии, процессе переваривания крови и развитии яичников. Это особенно важно на северной границе ареала, в условиях, близких к нижнему температурному порогу развития (Виноградская, 1969). Переносчики также зависят от климатических факторов (температуры, влажности, осадков) (Беклемишев, 1970). Как и в случае с другими переносимыми комарами болезнями, потепление климата может изменить картину распространения малярии на Земном шаре (Martens et al., 1999; Climate Change 2001, 2001b).

Таким образом, значение кровососущих комаров для здоровья человека огромно. Комары являются важнейшим компонентом гнуса. Комары переносят многие опасные заболевания человека различной этиологии, наиболее известным и распространенным среди которых является малярия. Распространение практически всех этих заболеваний зависит от климата либо непосредственно, либо опосредовано, через воздействие климатических факторов на их переносчиков. Изменение климата неизбежно окажет на него свое влияние. В отношении малярии человека и переносчиков этого заболевания на территории СНГ вопрос подробно рассмотрен в работах (Семенов и др., 2006; Ясюкевич, Гельвер, 2007).

Таблица 5.

Переносчики малярии человека в различных географических областях Земли*

Область**		Переносчики***
1	Северная Америка	***An. (An.) freeborni***, *An. (An.) quadrimaculatus*, ***An. (N.) albimarus***
2	Центральная Америка	*An. (An.) aztecus*, *An. (An.) punctimacula*, *An. (An.) pseudopunctipennis*, ***An. (N.) albimanus***, *An. (N.) albitarsis*, ***An. (N.) aquasalis***, ***An. (N.) argyritarsis***, ***An. (N.) darlingi***
3	Южная Америка	***An. (An.) pseudopunctipennis***, ***An. (An.) punctimacula***, *An. (K.) bellator*, *An. (K.) cruzii*, *An. (K.) neivai*, ***An. (N.) albimanus***, ***An. (N.) albitarsis***, ***An. (N.) aquasalis***, *An. (N.) argyritarsis*, *An. (N.) braziliensis*, ***An. (N.) darlingi***, *An. (N.) nuneztovari*, *An. (N.) triannulatus*
4	Евразия	***An. (An.) atroparvus***, *An. (An.) messeae*, *An. (An.) sacharovi*, *An. (An.) sinensis*, *An. (C.) pattoni*
5	Средиземноморье	***An. (An.) atroparvus***, *An. (An.) claviger*, ***An. (An.) labranchiae***, *An. (An.) messeae*, ***An. (An.) sacharovi***, *An. (C.) hispaniola*, ***An. (C.) superpictus***
6	Северная Африка и Аравия	*An. (C.) culicifacies*, *An. (C.) fluviatilis*, *An. (C.) hispaniola*, *An. (C.) multicolor*, ***An. (C.) pharoensis***,, ***An. (C.) sergentii***
7	Тропическая Африка	***An. (C.) arabiensis***, ***An. (C.) funestus***, ***An. (C.) gambiae***, *An. (C.) melas*, *An. (C.) merus*, *An. (C.) moucheti*, *An. (C.) nili*, *An. (C.) pharoensis*
8	Индо-Иранская	*An. (An.) sacharovi*, *An. (C.) aconitus*, *An. (C.) annularis*, ***An. (C.) culicifacies***, ***An. (C.) fluviatilis***, *An. (C.) jeyporiensis*, *An. (C.) minimus*, *An. (C.) philippinensis*, *An. (C.) pulcherrimus*, *An. (C.) stephensi*, *An. (C.) sundaicus*, *An. (C.) superpictus*, *An. (C.) tessellatus*, *An. (C.) varuna*
9	Индокитай	*An. (An.) nigerrimus*, *An. (C.) annularis*, *An. (C.) culicifacies*, ***An. (C.) dirus***, *An. (C.) fluviatilis*, *An. (C.) jeyporiensis*, *An. (C.) maculatus*, *An. (C.) minimus*
10	Малайзия	*An. (An.) campestris*, *An. (An.) conaldi*, *An. (An.) donaldi*,, *An. (An.) letifer*, *An. (An.) nigerrimus*, *An. (An.) whartoni*, ***An. (C.) acconitus***, ***An. (C.) balabacensis***, ***An. (C.) dirus***, ***An. (C.) flavirostris***, *An. (C.) jeyporiensis*, ***An. (C.) leucosphyrus***, ***An. (C.) ludlowae***, ***An. (C.) maculatus***, *An. (C.) mangyanu*, ***An. (C.) minimus***, *An. (C.) philippiensis*, ***An. (C.) subpictus***, ***An. (C.) sundaicus***
11	Корея, Китай	***An. (An.) anthropophagus***, ***An. (An.) sinensis***, *An. (C.) balabacensis*, *An. (C.) jeyporiensis*, *An. (C.) pattoni*
12	Австралия и Новая Гвинея	*An. (A.) bacrofti*, ***An. (C.) farauti***, *An. (C.) hilli*, *An. (C.) karwari*, ***An. (C.) koliensis***, ***An. (C.) punctulatus***, *An. (C.) subpictus*

Примечания. * Таблица составлена по (Гуцевич и др., 1970; Тарасов, 1988, 1996; Geographical distribution..., 1989).
** См. Рис. 4.
*** Основные переносчики данной области выделены.

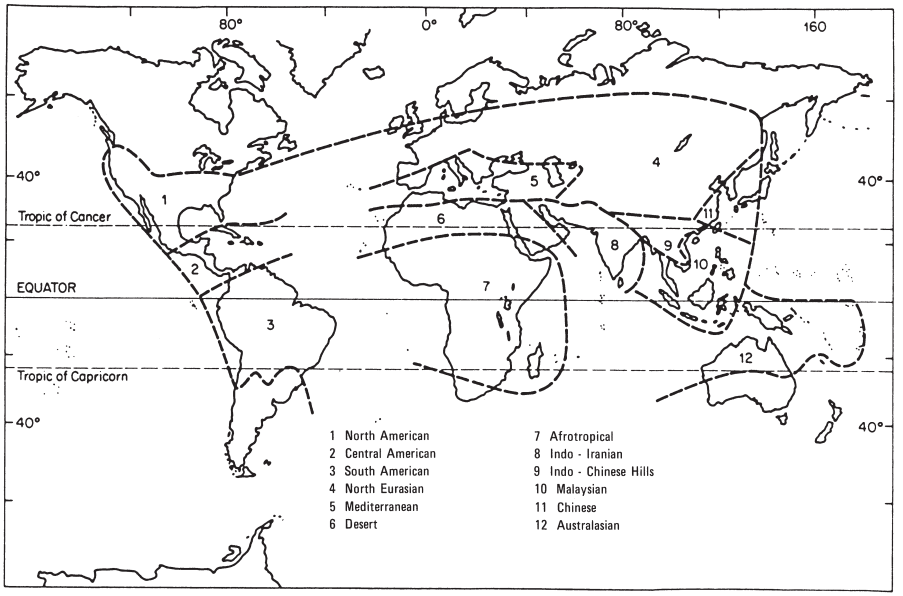


Рисунок 4. Маляриологическое зонирование Земли по (MacDonald, 1957).

По мнению экспертов МГЭИК, ареалы многих тропических переносчиков расширятся в северном и южном направлении. Потенциальный ареал малярии при потеплении климата существенно расширится, в основном, к северу. На эндемичных территориях увеличится длительность сезона передачи. Значительно увеличится число людей, проживающих в зонах с большим риском заражения малярией. Если сейчас на территориях, где существует риск заражения малярией, проживает 2400 млн. человек, что составляет около 40% населения Земного шара, то к 2080 г. это число увеличится, по различным оценкам, еще на 220-400 млн. человек. Новые риски коснутся в первую очередь стран с низким уровнем жизни населения (Martens et al., 1999; Climate Change 2001, 2001b; Lieshout et al., 2004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А. Н. 1986. Взаимоотношения возбудителя малярии и беспозвоночного хозяина. В кн.: Малярийные паразиты млекопитающих. Л.: Наука. С. 53-77.

Алексеев А. Н. 1998. Возможные последствия вероятного глобального потепления климата для распространения кровососущих эктопаразитов и передаваемых ими патогенов. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. № 4. С. 3-8.

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 матери-

алов 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.

Алексеев А. Н. 2006. Влияние глобального изменения климата на кровососущих эктопаразитов и передаваемых ими возбудителей болезней. Вестник РАМН. № 3. С. 21-25.

Антропогенные изменения климата. 1987. / Под. ред.: Будыко М. И., Израэль Ю. А. Л.: Гидрометеоиздат. 406 С.

Бардин М. Ю. 2002. Изменчивость температуры воздуха над западными территориями России и сопредельными странами в XX веке. Метеорология и гидрология. № 8. С. 5-23.

Бедрицкий А. И., Коршунов А. А., Хандожко Л. А., Шаймарданов М. З. 2004. Климатическая система и обеспечение гидрометеорологической безопасности жизнедеятельности России. Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003 г. Труды конференции. М. С. 402-409.

Беклемишев В. Н. 1970. Биоценологические основы сравнительной паразитологии. М.: Наука. 502 С.

Бронштейн А. М., Токмалаев А. К. 2004. Паразитарные болезни человека: протозоозы и гельминтозы. М.: Изд-во РУДН. 207 С.

Будыко М. И., Винников К. Я. 1976. Глобальное потепление. Метеорология и гидрология. № 7. С. 16-26.

Виноградова Е. Б. 1997. Комары комплекса *Culex pipiens* в России (таксономия, распространение, экология, физиология, генетика, практическое значение и контроль). Труды зоологического института РАН. Т. 271. 307 С.

Виноградова Е. Б. 2004. Городские комары или «дети подземелья». М. С.-Пб.: Товарищество научных изданий КМК. 96 С.

Виноградская О. Н. 1969. Географическое распространение комаров – переносчиков инфекций. М.: Медицина. 164 С.

Володин Е. М., Галин В. Я. 1999. Об интерпретации зимнего потепления на континентах Северного полушария в 1977-1994 гг. Метеорология и гидрология. №1. С. 20-29.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2001. Изменение климатических условий Европейской части России во второй половине XX века. В кн: Влияние изменений климата на экосистемы. Серия публикаций Департамента природоохранной политики и экспертизы Всемирного фонда дикой природы. Выпуск 4. М.: Изд-во Русский университет. С. I-9 – I-16.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2004. Обнаружение изменений климата: состояния, изменчивости и экстремальности климата. Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003 г. Труды конференции. М. С. 101-110.

Груза Г. В., Бардин М. Ю., Ранькова Э. Я. и др. 2001. Об изменении температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке. В кн.: Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука. С. 18 – 39.

Груза Г. В., Хмелевцов С. С. (ред. перев.). 1981. Энергия и климат. Сборник статей. Л.: Гидрометеоиздат. 304 С.

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.

Елисеев А. В., Мохов И. И., Вакалюк Н. Ю. 2000. Тенденции изменения фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры суши северного полушария. Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана. Т. 36, № 1. С. 16-26.

Званцов А. Б., Ясюкевич В. В. 1994. Влияние ювемона на оогенез самок комаров *Anopheles sacharovi* Favre и их заражаемость возбудителем малярии *Plasmodium gallinaceum* Brumpt. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. № 4. С. 32-36.

Израэль Ю. А., Груза Г. В., Катцов В. М., Мелешко В. П. 2001. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий. Метеорология и гидрология. № 5. С. 5-21.

Кожанова Н. И., Реутская О. Е. 1983. Гормональная регуляция репродук-

тивного развития. Тр. Всесоюзного энтомологического о-ва. Л.: Наука, Ленингр. отделение. Т. 64. С. 64-81.

Кундзевич З. В. 2004. Экстремальные гидрологические явления: сильные осадки, наводнения и засухи. Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003 г. Труды конференции. М. С. 240-247.

Лобан К. М., Полозок Е. С. 1983. Малярия. М.: Медицина. 224 С.

Лысенко А. Я. 1986. Этапы изучения, эволюция, филогения, таксономия и география малярийных плазмодиев млекопитающих. В кн.: Малярийные паразиты млекопитающих. Л.: Наука. С. 5-28.

Лысенко А. Я., Кондрашин А. А., Ежов М. Н. 2003. Малариология. М.: Открытые системы. 512 С.

Львов Д. К, Клименко С. М., Гайдамович С. Я. и др. 1989. Арбовирусы и арбовирусные инфекции. М.: Медицина. 336 С.

Маркович Н. Я. 1997. Мировая торговля старыми автопокрышками и современный ареал комаров *Aedes (Stegomya) albopictus*. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. № 4. С. 54-59.

Пачаури Р. К. 2004. Климат и человечество. Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003 г. Труды конференции. М. С. 62-67.

Попов А. Ф., Токмалаев А. К., Никифоров Н. Д. 2004. Малярия. М.: Изд-во РУДН. 271 С.

Предстоящие изменения климата (Будыко М. И., Израэль Ю. А. Маккракен М. С., Хект А. Д.). 1991. Л.: Гидрометеоиздат. 272 С.

Ранькова Э. Я. 2005. Климатическая изменчивость и изменения климата за период инструментальных наблюдений. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М.: ИГКЭ. 67 С.

Расницын С. П. 1986. Влияние возбудителей малярии на векторные способности *Anopheles*. В кн.: Малярийные паразиты млекопитающих. Л.: Наука. С. 162-167.

Расницын С. П., Званцов А. Б., Ясюкевич В. В. 1993. Влияние состояния репродуктивной системы самок комаров на их заражаемость возбудителем малярии. Паразитология. Т. 27, № 4. С. 280-288.

Расницын С. П., Званцов А. Б., Ясюкевич В. В. 1989 Экспериментальная модель циркуляции возбудителя малярии. Авторское свидетельство СССР № 1681331. Приоритет от 30.06.1989. Регистрация 01.06.1991.

Расницын С. П., Званцов А. Б., Ясюкевич В. В. 1991. Новые модели циркуляции возбудителя малярии *Plasmodium gallinaceum* Brumpt с использованием малярийных комаров фауны СССР. Паразитология. Т. 25, № 3. С. 196-202.

Расницын С. П., Ясюкевич В. В., Званцов А. Б. 1990. Особенности восприимчивости *Aedes togoi* к *Plasmodium gallinaceum*. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. № 6. С. 24-26.

Ревич Б.А., Малеев В. В. 2003. Потепление климата – возможные последствия для здоровья населения. В кн.:Климатические изменения: взгляд из России. М.: ТЕИС. С. 99-137.

Ревич Б. А., Шапошников Д. А. 2006. Климатические условия, качество атмосферного воздуха и смертность населения Москвы в 2000-2006 годах. В кн.: Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей. / Под ред. Б. А. Ревича. М.: Издательское товарищество «АдамантЪ». С. 102-140.

Руководство по зоонозам. 1983. / Под ред. В. И. Покровского. М.: Медицина. 320 С.

Руководство по тропическим болезням 1983. / Под ред. А. Я. Лысенко. М.: Медицина. 512 С.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2006. Выявление климатогенных изменений. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.

Тарасов В. В. 1972. Тропические болезни и их профилактика. М.: Изд-во Московского университета. 197 С.

Тарасов В. В. 1988. Экология кровососущих насекомых и клещей. М.: Изд-во МГУ. 264 С.

Тарасов В. В. 1996. Медицинская энтомология. М.: Изд-во МГУ. 352 С.

Тропические болезни. 1979 / Под ред. Е. П. Шуваловой. М.: Медицина. 592 С.

Тыщенко В. П. 1986. Физиология насекомых. М.: Высш. школа. 303 С.

Филиппович Ю.Б., Кутузова Н. М. 1985. Гормональная регуляция обмена веществ у насекомых. Итоги науки и техники ВИНИТИ. Сер. Биологическая химия. М.: ВИНИТИ. Т. 21. 224 С.

Филиппович Ю.Б., Кутузова Н. М., Иванова Г.Б. 1988. Механизм действия регуляторов роста насекомых. Итоги науки и техники ВИНИТИ. Сер. Энтомология. М.: ВИНИТИ. Т. 8. С. 70-124.

Фолланд К., Паркер Д. 2004. Мониторинг глобального климата и оценивание изменений климата. Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября – 3 октября 2003 г. Труды конференции. М. С. 76-90.

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.

Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2007. Влияние изменения климата на переносчиков и возбудителей малярии человека в России и ее ближайшем географическом окружении. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 21. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 293-347.

Ясюкевич В. В., Званцов А. Б. 1999. Влияние антигормонов на восприимчивость комаров *Anopheles sacharovi* Favre к возбудителю малярии *Plasmodium gallinaceum* Brumpt. Мед. паразитол. и паразитарн. болезни. № 2. С. 46-48.

Ando M., Uchiyama I., Ono M. 1998a. Impacts on human health. In: Global Warming: The Potential Impact on Japan (Nishioka S., Harasawa H., editors). Springer-Verlag, Tokyo, Japan, P. 203-213.

Ando M., Kobayashi I. N., Kawahara I., Asanuma S., Liang C. K. 1998b. Impacts of heat stress on hyperthermic disorders and heat stroke. Global Environmentsl Research, 2. P. 111-120

Climate Change 1995. 1996a. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A. et al. editors). Cambridge University Press. 572 P.

Climate Change 1995. 1996b. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific and Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Watson R. T., Zinyowera M. C., Moss R. H. et al., editors). Cambridge University Press. 879 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.

Climate Change 2001. 2001b. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (McCarthy J. J., et al., editors). Cambridge University Press. 1032 P.

Climate Change 2001. 2001c. Synthesis Report. Contributions of Working Group I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Watson R. T. and the Core Writing Team, editors.). Cambridge University Press. 397 P.

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.

Garnhem P. C. C. 1966. Malaria parasites and other haemosporidia. – Blackwell Scientific Publications. Oxford. 1114 P.

Geographical distribution of arthropod-borne diseases and their principal vectors. 1989. (WHO/VBC/ 89.967). Geneva. P. 1-134.

Hansen J., Lebedeff S. 1987. Global surface temperature: update through 1987. Geophys. Res. Lett. № 15. P. 323-326.

Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Dato M. 1999. GISS analysis of surface temperature change. J. Geophys. Res. 104(D24). P. 30997-31022.

Jones P. D., New M., Parker D. E., Martin S., Rigor I. G. 1999. Surface air temperature and its changes over past 150 years. Rev. Geophys. № 37. p. 173-199.

Jones P. D., Osborn T. J., Briffa K. R., Folland C. K., Horton E. V.,Alexander L. V., Parker D. E., Rayner R. A. 2002. Adjusting for sampling density in grid-box land and ocean surface temperature time series. J. Geophys. Res., V. 106, P. 3371-3380.

Kramer L. D., Hardy J. L., Presser S. B. 1983. Effects of temperature on extrinsic incubation of the vector competence of *Culex tarsalis* for western equine encefalomyelitis virus. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. V. 32, P. 1130-1139.

Kunst A. E., Looman C. W. N., Mackenbach J. P. 1997. Outdoor air temperature and mortality in the Netherlands: a time series analysis. American Journal of Epidemiology, V. 137. P. 331-341.

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.

MacDonald G. 1957. The epidemiology and control of malaria. Oxford university press. 201 P.

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.

Patwardhan A., Schneider S. H., Semenov S. M. 2003. Assessing the science to address UNFCCC Article 2. 13 P. http://www.ipcc.ch/.

Peterson T. S., Vose R. S. 1997. An overview of the global historical climatology network temperature data base. -Bull. Amer. Met. Soc. V. 78. P. 2837-2849.

Peterson T. S., Gallo K. P., Livermore J., Owen T. W., Huang A., McKittrick D. A. 1999. global rural temperature trends. Geophys. Res. Lett. V. 26. P. 329-332.

Reisen W. K., Meyer R. P., Presser S. B., Hardy J. L. 1993. Effects of temperature on the transmission of Western Equine encephalomyelitis and St. Louis encephalitis viruses by *Culex tarsalis (Diptera: Culicidae)*. Journal of Medical Entomology. V. 30, № 1. P. 151-160.

Reisen W. K. 1995. Effects of temperature on *Culex tarsalis (Diptera: Culicidae)* from the Coachella and San Joaquin Valleys of California. Journal of Medical Entomology, V. 32, № 5. P. 636-645.

Turell M. J., Mather T. N., Spielman A., Bailey C. 1987. Increased dissemination of dengue 2 virus in *Aedes aegypti* associated with concurrent ingestion of microfilariae of Brugia malayi. Amer. J. Trop. Med. Hyg. V. 37. P. 197-201.

Watts D. M., Burke D. S., Harrison B. A., Whitmore D. E., Nisalak A. 1987. Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for Dengue 2 virus. American Journal of Tropical Hygiene. V. 36. P. 143-152.

ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КЛЕЩЕЙ IXODES RICINUS И IXODES PERSULCATUS (PARASITIFORMES, IXODIDAE) НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

***В. В. Ясюкевич*[1)], *Е. В. Казакова*[2)], *И. О. Попов*[1)]**

[1)]Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, victor_pemme@comcor.ru

[2)] Россия, 119899 Москва, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Географический факультет

Реферат. В статье рассматриваются возможные изменения ареалов клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* – основных переносчиков клещевого энцефалита и иксодового клещевого бореллиоза – на территории России, обусловленные изменениями температуры в 1976–2005 гг. по сравнению с 1946–1975 гг. Показано, что эти изменения могли привести к некоторому расширению ареалов – к смещению восточных границ ареала *I. ricinus* на Европейской территории России на 100-300 км и северных и северо-восточных границ ареала *I. persulcatus* на Азиатской территории России также на 100–300 км. Продвижение границ ареалов обоих видов в северном направлении в Карелии не отмечено.

Ключевые слова. Изменение климата, ареалы, иксодовые клещи, клещевой энцефалит, иксодовый клещевой бореллиоз.

POSSIBLE INFLUENCE OF A CHANGING CLIMATE ON THE DISTRIBUTION OF TICKS IXODES RICINUS AND IXODES PERSULCATUS (PARASITIFORMES, IXODIDAE) IN RUSSIA

***V. V. Yasukevich*[1)], *E. V. Kazakova*[2)], *I. O. Popov*[1)]**

[1)]Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, victor_pemme@comcor.ru

[2)]M. V. Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119899 Moscow, Russia

Abstract. Possible shifts of range limits for ticks *Ixodes ricinus* and *Ixodes persulcatus*, the major vectors of tick-borne encephalitis and tick-borne borelliosis, in response to changes in temperature in Russia in 1976–2005 vs. 1946–1975 are considered. It is shown that temperature changes may lead to a certain expansion of the ranges due to shifts of the eastern limit of *I. ricinus* range by 100–300 km in the European part of Russia and the northern and north-eastern limits of *I. persulcatus* range

by 100–300 km in the Asian part of Russia. No northward shifts in Karelia were found for both species.

Keywords. Climate change, ranges, Ixodidae ticks, tick-borne encephalitis, tick-borne borelliosis.

Введение

В течение многих лет проблема клещевого энцефалита была для нашей страны достаточно острой. В последние два десятилетия к ней прибавилась проблема иксодового клещевого бореллиоза (Арумова, Воронцова, 2002; Злобин и др.,, 2004; О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации..., 2007, 2008; см. также статью В. В. Ясюкевича и Б. А. Ревича «Изменение климата на территории России и здоровье населения» в настоящем сборнике). Так, пиковая заболеваемость клещевым энцефалитом отмечалась в 1996 и 1999 гг. – 10 298 и 9955 случаев (показатели заболеваемости на 100 тыс. населения 7,0 и 6,8 соответственно). В дальнейшем появилась устойчивая тенденция к снижению заболеваемости, которая в 2006 и 2007 гг. составила 3493 и 3138 случаев (2,4 и 2,2 на 100 тыс. населения). Одной из причин этого является расширение иммунопрофилактики населения в эндемичных по клещевому энцефалиту регионах. В тоже время отмечается увеличение обилия клещей и рост обращений населения по поводу укуса клеща. В отношении иксодового клещевого бореллиоза тенденция к снижению заболеваемости заметна мало. В последние полтора десятка лет показатель заболеваемости варьировал от 5, 0 до 6,0 на 100 тыс. населения. Относительно широкая распространенность и большая опасность для здоровья этих заболеваний делает актуальным, в числе прочих, и вопрос об изменении ареалов их переносчиков в связи с наблюдаемыми изменениями климата (Climate Change 2007, 2007a, b).

Предположения о влиянии изменения климата на распространение и ряд экологических характеристик иксодовых клещей высказывались неоднократно (Бируля, Залуцкая, 1965; Алексеев, 2004, 2006). Задача настоящей работы – оценить возможные изменения ареалов расчетным путем, базируясь на реальной климатической информации.

Материалы и методы

Приведенные в работе оценки основываются на фактических данных о среднесуточных значениях температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы, полученных на сети метеорологических станций, а также на простых эмпирических моделях, связывающих условия существования переносчика с температурой и количеством осадков.

В качестве исходной метеорологический информации используются ряды среднесуточных значений данных измерений температуры воздуха, полученных на сети 223 метеорологических станций международного обмена, передающих телеграммы СИНОП, расположенных на территории России и соседних стран (территория бывшего СССР). Такие ряды для всего периода наблюдений (до 2005 г. включительно) были депонированы Всероссийским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета) в сети INTERNET для свободного использования (http://www.meteo.ru). Результаты климатических изменений значений рассматриваемых в работе переменных и методика их выявления, представлены в следующих работах: (Гельвер, 2002а, б; Семенов, Гельвер, 2001, 2002а, б; Семенов и др., 2006).

На первом этапе работы необходимо было оценить изменения температуры и осадков, имевшие место на территории стран СНГ и Балтии в период 1976–2005 гг. по сравнению с периодом 1946–1975 гг. Второй этап заключается в анализе климатических показателей, являющихся ключевыми в формировании ареалов клещей *Ixodes ricinus* L., 1758 и *Ixodes persulcatus* Shulze, 1930 – основных переносчиков клещевого энцефалита и иксодового клещевого бореллиоза. Завершающий этап – построение и анализ картосхем, отражающих изменение модельных ареалов этих переносчиков за указанные периоды.

Результаты и обсуждение

Изменение температуры и количества осадков на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг.

Как следует из представленных на рис. 1 и 2 материалов, на территории России, других стран СНГ и Балтии за период 1976–2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг., произошли следующие изменения среднегодовой температуры и количества осадков. Локальное похолодание отмечается на Кольском полуострове, Предкавказье и, наиболее выраженное, к югу и востоку от залива Кара-Богаз-Гол (до 1°С). На всей остальной части рассматриваемой территории произошло увеличение температуры, несколько менее выраженное на Европейской части России и более – в Сибири (в наибольшей степени в Предбайкалье – до 2°С) и Казахстане. На большей части территории стран СНГ и Балтии произошло увеличение среднегодового количества осадков, наиболее проявившееся на севере Европейской части России, средних и южных широтах Восточно-Европейской равнины, на востоке Средне-сибирского плоскогорья и Приленского плато (до 30%). Существенное уменьшение количества осадков (более 30%)

Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры (°С) на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1976–2005 гг. по сравнению с периодом 1946–1975 гг.

отмечено в районе Чукотского нагорья и южной части Камчатки. Эти изменения не смогли не сказаться на изменении потенциальных ареалов основных переносчиков клещевого энцефалита и иксодового клещевого бореллиоза.

Климатические факторы, обуславливающие формирование ареалов Ixodes ricinus и Ixodes persulcatus

Анализ ряда литературных источников позволил выделить несколько ключевых факторов, обуславливающих формирование ареалов клещей *I. ricinus* и *I. persulcatus* (Леонов и др., 1975; Филиппова, 1977; Коренберг, 1979; Таежный клещ..., 1985; Коротков, 2005). Северная граница распространения *I. ricinus* проходит по изолинии суммы активных температур 1400°С, превышающих 10°С. Для этого вида существенно также наличие среднегодовой суммы осадков не менее 400 мм. Северная граница распространения *I. persulcatus*

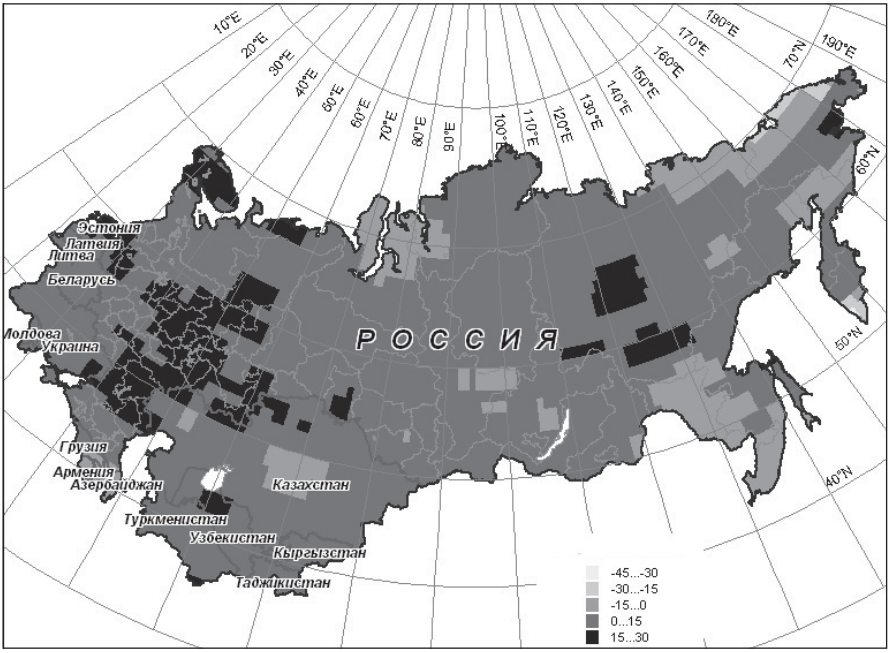


Рис. 2. Изменение суммы годовых осадков (%) на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1976–2005 гг. по сравнению с периодом 1946–1975 гг.

описывается изолинией суммы активных температур 1400°С, превышающих 10°С. Зона симпатрии *I. ricinus* и *I. persulcatus* проходит между среднемесячными январскими изотермами –4 и –14°С. При среднемесячной температуре января –15°С *I. ricinus* практически не встречается (Коротков, 2005). Одной из причин этого можно считать различия в особенностях зимовки указанных двух видов клещей. Напитавшиеся самки и яйца *I. persulcatus* не диапаузируют и не способны перезимовывать. Напитавшиеся самки и яйца *I. ricinus* обладают способностью впадать в факультативную диапаузу, что способствует переживанию ими умеренно-континентальных зим Европы и Европейской части России (Таежный клещ..., 1985).

Наилучшими для описания ареалов этих двух видов переносчиков оказались следующие комбинации климатических и биоценологических критериев. Для *I. ricinus* – сумма температур 1400°С, превышающих 10°С; годовая сумма осадков 400 мм; среднемесячная изотерма января –14°С. Для *I. persulcatus* – сумма температур 1400°С, превышающих 10°С и среднемесячная изотерма января –4°С. За южную границу распространения обоих видов принята граница лесостепи.

Для верификации полученных модельных данных использовалась карты, приведенные в (Коренберг, 1979; Таежный клещ..., 1985) (рис. 3 и 4). Необходимо отметить, что ареалы *I. ricinus* и *I. persulcatus*, приводимые в этих источниках, не вполне тождественны.

Возможные изменения ареалов Ixodes ricinus и Ixodes persulcatus в связи с изменением климата

Картосхемы, построенные исходя из выбранных в предыдущем разделе модельных критериев, показали удовлетворительное совпадение с фактическими данными (рис. 3 и 4). Таким образом, ареалы основных переносчиков клещевого энцефалита и иксодового клещевого бореллиоза (рис. 5 и 6) в соответствии с изменениями климата, представленными на рис. 1 и 2, во 2-й половине XX и начале XXI веков могли измениться следующим образом. Сокращение ареала *I. ricinus* не происходит. Отмечено его расширение в средних широтах Европейской территории России (ЕТР) на восток на 100-300 км. Сокращение ареала *I. persulcatus* возможно на юго-западе и на территории Средней Азии. Расширение ареала происходит в очень ограниченных масштабах на ЕТР и более существенно на Азиатской территории России (АТР) в северном и северо-восточном направлении на 100-300 км. Продвижение границ ареалов обоих видов в северном направлении на территории Карелии не отмечено. Вероятность того, что эти изменения повлекут за собой существенное ухудшение эпидемиологической обстановки по клещевому энцефалиту и иксодовому клещевому бореллиозу, невелика, так как по выполненным нами модельным оценкам, на густо-

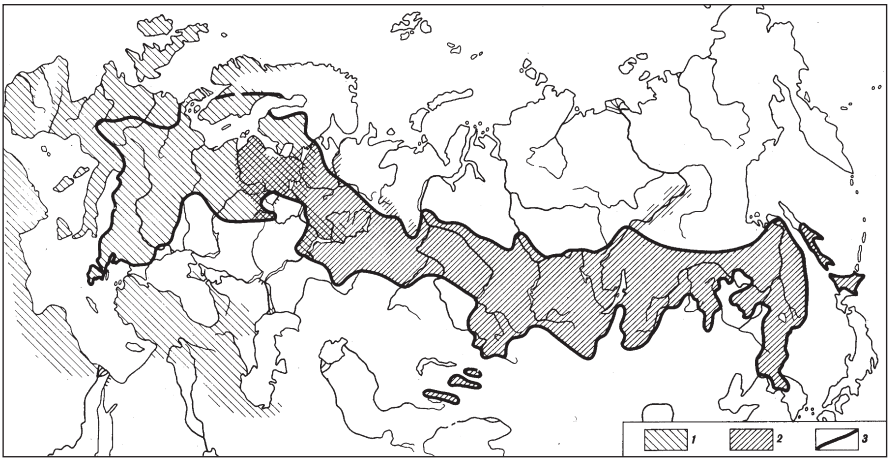


Рис. 3. Ареалы клещей I. ricinus (1), I. persulcatus (2) и вируса клещевого энцефалита (3)

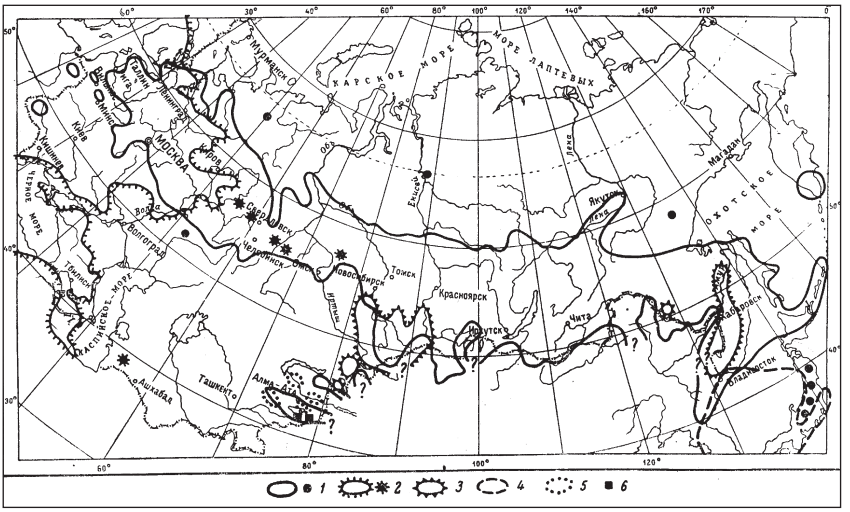


Рис. 4. Ареалы клещей группы persulcatus (Таежный клещ..., 1985):
1 – *I. persulcatus*; 2 – *I. ricinus*; 3 – *I. pavlovskyi*; 4 – *I. nipponensis*;
5 – *I. kazakstani*; 6 – *I. kashmiricus*.

Рис. 5. Возможное климатообусловленное изменение ареала *I. ricinus* на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг.

0 – переносчик отсутствовал как в 1946-1975 гг., так и в 1976-2005 гг.;
2 – расширение ареала за период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг.;
3 – переносчик присутствовал как в 1946-1975 гг., так и в 1976-2005 гг.

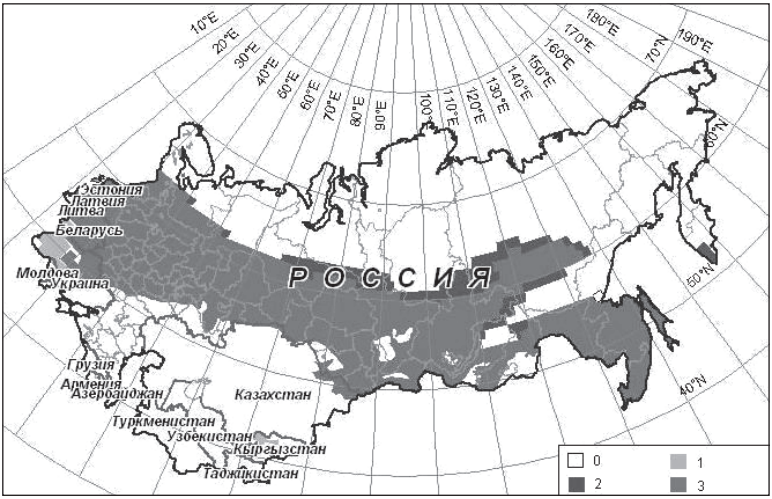


Рис. 6. Возможное климатообусловленное изменение ареала *I. persulcatus* на территории России, стран СНГ и Балтии за период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг.

0 – переносчик отсутствовал как в 1946-1975 гг., так и в 1976-2005 гг.;

1 – сокращение ареала за период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг.;

2 – расширение ареала за период 1976-2005 гг. по сравнению с периодом 1946-1975 гг.;

3 – переносчик присутствовал как в 1946-1975 гг., так и в 1976-2005 гг.

населенной ЕТР происходит расширение ареала менее эффективного переносчика возбудителей этих заболеваний *I. ricinus*, а расширение ареала более эффективного переносчика *I. persulcatus* характено для малонаселенных средних широт Сибири. Это совпадает с мнением, высказанным в работах (Алексеев, 2004, 2006).

Тем не менее, подобные изменения требуют повышенного санитарно-эпидемиологического контроля в регионах, где ранее *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* не отмечались или их численность была невелика. Несомненно, что в будущем прогнозируемые изменения климата повлекут за собой дальнейшие изменения ареалов этих переносчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Алексеев А. Н. 2006. Влияние глобального изменения климата на кровосо-

сущих эктопаразитов и передаваемых ими возбудителей болезней. Вестник РАМН. № 3. С. 21-25.

Арумова Е. А., Воронцова Т. В. 2000. Клещевой боррелиоз (болезнь Лайма) в России. Дезинфекционное дело. № 2. С. 5-7.

Бируля Н. Б, Залуцкая Л. И. 1965. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. №3. С. 265-271.

Гельвер Е. С. 2002а. Об одном методе геоэкологически ориентированного картирования климата. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. т. 18. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. С. 358-367.

Гельвер Е. С. 2002б. Учет неопределенности и пропусков в данных при когерентном отображении состояния окружающей среды и климата. В кн.: Научные аспекты экологических проблем России. Труды Всероссийской конференции. Москва, 13-16 июня 2001 г. М.: Наука, Т. 2. С. 147-152.

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.

Коренберг О. И. 1979. Биохорологическая структура вида (на примере таежного клеща). М.: Наука. 171 С.

Коротков Ю. С. 2005. Постепенная изменчивость паразитарной системы клещевого энцефалита. Вопросы вирусологии. Т. 50, №3. С. 52-56.

Леонов В. А., Васенин А. А., Горин О. З. 1975. Анализ связей эпидемиологической активности очагов клещевого энцефалита с природными условиями Бурятской АССР. Медицинская паразитология и парпзитарные болезни. №1. С. 21-25.

О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2006 году: Государственный доклад. 2007. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 360 С.

О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2007 году: Государственный доклад. 2008. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 397 С.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2001. Проблема пропусков в данных при мониторинге состояния окружающей среды. В кн.: Труды международной конференции «Математические и физические методы в экологии и мониторинге природной среды», М.: Изд-во Московского государственного университета леса, С. 199-204.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2002а. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. Доклады Академии наук. Геофизика. т. 386, № 3. С. 389-394.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2002б. Синусоидальная аппроксимации годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. Метеорология и гидрология. №11. С. 25-30.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2006. Выявление климатогенных изменений. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 324 С.

Таежный клещ *Ixodes persulcatus* Schulze (*Acarina, Ixodidae*). Под/ред. Н. А. Филипповой. Морфология, систематика, экология, медицинское значение. Л.: Наука. 416 С.

Филиппова Н. А., 1977. Иксодовые клещи подсеем. Ixodidae. В серии Паукообразные. Т. 4, вып. 4. М.: Наука. 396 С.

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.

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.

К ОЦЕНКЕ АТМОСФЕРНОЙ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ОТ МЕЖДУНАРОДНЫХ АВИАПЕРЕВОЗОК ИЗ РОССИИ

***В. А. Грабар*[1)], *Т. М. Дмитриева*[2)], *М. Л. Гитарский*[3)]**

[1)] Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20-Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, v774007@yandex.ru

[2)] Россия, 123995, Москва, Д-242, ГСП-5, Нововаганьковский переулок, 12, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, dtunms@mcc.mecom.ru

[3)] Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20-Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Mike.Gytarsky@g23.relcom.ru

Реферат. Получены оценки потребления топлива и эмиссии в атмосферу диоксида углерода воздушными судами, выполняющими до 87% налета в международном сообщении с территории Российской Федерации. С 2000 по 2007 гг. ежегодная эмиссия диоксида углерода от международных авиаперевозок с территории России возросла на 53,1% и в 2007 г. в целом составила 7,5 млн. т CO_2.

Ключевые слова. Диоксид углерода, атмосфера, эмиссия, международный авиатранспорт, изменение климата

ON THE ESTIMATION OF ATMOSPHERIC EMISSIONS OF CARBON DIOXIDE FROM INTERNATIONAL FLIGHTS OPERATED FROM RUSSIAN TERRITORY

***V. A. Grabar*[1)], *T. M. Dmitrieva*[2)], *M. L. Gytarsky*[3)]**

[1)] Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, v774007@yandex.ru

[2)] Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Russian Federation, 12, Novovagan'kovskiy per., 123995 Moscow, Russia, dtunms@mcc.mecom.ru

[3)] Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, Mike.Gytarsky@g23.relcom.ru

Abstract. Fuel consumption and atmospheric emissions of carbon dioxide from aircrafts were estimated for about 87% of international flights operated from Russian territory. From 2000 to 2007, annual emissions of carbon dioxide from international aviation increased by 53,1% and reached 7,5 Mt CO_2 in 2007.

Keywords. Carbon dioxide, atmosphere, emission, international aviation, climate change.

Введение

Российская Федерация активно участвует в климатических соглашениях ООН — Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Киотском протоколе к ней (КП к РКИК ООН). Ратифицировав РКИК ООН в 1994 году и Киотский протокол в 2004 году, Россия приняла обязательства снизить антропогенные выбросы парниковых газов до уровня 1990 года и сохранять их на этом уровне в течение первого периода действия КП к РКИК ООН с 2008 по 2012 гг. (Рамочная Конвенция, 2005; Киотский протокол, 2005). Для информирования о выполнении принятых обязательств наша страна ежегодно представляет в органы РКИК ООН и Киотского протокола национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, который готовится на основе методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Руководящие указания по эффективной практике, 2000; МГЭИК, 2006).

В национальный кадастр входят расчеты выбросов парниковых газов для всех секторов экономики, включая энергетический сектор. В свою очередь, в энергетическом секторе информация о выбросах подается для следующих основных категорий источников: сжигание, утечки и испарение топлив, сжигание биомассы в энергетических целях и использование топлив для выполнения международных авиационных и морских перевозок. Следует отметить, что данные об эмиссии от топлив, использованных в международных авиационных и морских перевозках, а также сжигания биомассы не включаются в общие объемы национальных выбросов, а представляются в качестве справочной информации.

Между тем, в последние годы наблюдается интенсивный рост международных авиаперевозок. По прогнозам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), с 1990 по 2015 гг. темпы роста объема пассажирских авиаперевозок составят 5% в год, а потребление авиационного топлива будет возрастать на 3% в год (IPCC, 1999). По данным Росстата, за период с 2000 по 2006 гг. в Российской Федерации перевозки грузов и пассажиров при международном воздушном сообщении возросли на 33,3% и 106,0% соответственно (Российский статистический ежегодник, 2007). По данным Секретариата РКИК ООН, доля выбросов парниковых газов от международных авиаперевозок в экономически развитых странах, ратифицировавших Киотский протокол, в среднем составляет 1,5%, хотя в отдельных странах она может достигать 12%[1].

Следовательно, оценка выбросов парниковых газов и предшест-

[1] Технический доклад Секретариата РКИК ООН FCCC/TP/2007/1.

венников озона при международных авиационных перевозках, совершаемых с территории Российской Федерации, представляется актуальной задачей. В настоящей статье приводятся данные о выбросах диоксида углерода от международных авиаперевозок, выполненных с территории России с 2000 по 2007 гг. включительно на основе уточненных данных о типах воздушных судов и интенсивности их эксплуатации в международном авиационном сообщении.

Методы и материалы

Как известно, дозвуковые воздушные суда выполняют полеты в верхних слоях тропосферы и нижних слоях стратосферы на высотах от 9 до 13 км. Крейсерский полет сверхзвуковых воздушных судов проходит на высотах 17 – 20 км. В свою очередь, взлет и посадка сопровождаются выбросами уже в приземный слой воздуха. Помимо газообразных загрязнителей, воздушные суда выбрасывают в приземный слой, в верхние слои тропосферы и нижние слои стратосферы аэрозоли, сажу, парниковые газы диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O), предшественники озона (NO_x, CO, летучие органические соединения неметанового ряда (НМЛОС) и SO_x) и водяной пар. Таким образом, с точки зрения воздействия на климатическую систему, выбросы воздушных судов не только повышают совокупные концентрации парниковых газов в атмосфере, но и инициируют образование конденсационных следов, способствуют развитию перистой облачности, то есть, по существу, еще больше усиливают антропогенный парниковый эффект.

Основными видами топлива, используемыми в авиации, являются авиационные керосин и бензин. Керосин используется магистральными турбореактивными самолетами, а бензин – соответственно в поршневых двигателях малой авиации. Малые самолеты с бензиновыми двигателями применяются для перелетов на небольшие расстояния, а их доля составляет менее 1% воздушных судов, используемых в авиаперевозках (МГЭИК, 2006). Учитывая масштабы нашей страны, можно заключить, что для выполнения международных авиационных перелетов в Российскую Федерацию и из нее авиаперевозчики используют только воздушные суда с реактивными двигателями. Следовательно, атмосферные выбросы парниковых газов и предшественников озона от международных авиаперевозок связаны с использованием авиационного керосина.

По оценкам МГЭИК, в общем виде реактивные двигатели современных воздушных судов выбрасывают до 70% CO_2, около 30% H_2O. Выбросы других газообразных веществ с прямым (CH_4 и N_2O) и косвенным (NO_x, CO, НМЛОС и SO_x) парниковым эффектом незначительны (МГЭИК, 2006). Поэтому в настоящей работе мы выполнили оценку выбросов диоксида углерода, как приоритетного парникового

газа, выбрасываемого воздушными судами. Расчет выбросов CO_2 от российских и зарубежных воздушных судов, выполняющих перелеты с территории России, выполняли по формуле 1:

$$E_{CO2}(t) = FC(t) \cdot CF_{TCE} \cdot CF_{NCV} \cdot EF_{CO2}, \text{ где} \quad (1)$$

$E_{CO2}(t)$– эмиссия CO_2 в году t, т; $FC(t)$ – масса топлива, использованного в международных авиационных перевозках в году t, т; CF_{TCE} – коэффициент пересчета в тонны условного топлива угольного эквивалента (т.у.т.), т.у.т. • $т^{-1}$; CF_{NCV} – коэффициент пересчета в теплотворную способность, 10^{12} Дж • $т.у.т.^{-1}$; EF_{CO2} – коэффициент эмиссии CO_2, т • 10^{-12} $Дж^{-1}$.

Для определения массы топлива, использованного российскими и иностранными авиакомпаниями для осуществления авиационных перевозок с территории России, использовали данные налета самолето-часов основными типами эксплуатируемых грузовых и пассажирских воздушных судов. Расчеты выполняли по формуле 2:

$$FC(t) = \sum_X FT_X(t) \cdot FR_X, \quad (2)$$

где $FC(t)$ – масса топлива, потребленного российскими и иностранными перевозчиками при выполнении международных авиационных перевозок в году t, т; $FT_X(t)$ – годовой налет по отдельным типам пассажирских и грузовых воздушных судов за год t, самолето-часов; FR_X – средний часовой расход топлива по типам воздушных судов x, т • $ч^{-1}$.

Сведения о ежегодном налете самолето-часов по отдельным типам пассажирских и грузовых воздушных судов $FT_X(t)$ за период с 2000 по 2007 годы были предоставлены Федеральной аэронавигационной службой России в рамках информационного обеспечения российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов[2]. Данные по среднему часовому расходу топлива получили на основе анализа публикаций в периодической печати (Ежегодник АТО, 2007; Фомин и Агеев, 2006). Обобщенные данные по среднему часовому расходу топлива пассажирскими и грузовыми воздушными судами приведены в таблице 1.

Приведенные в таблице 1 величины охватывают 87% общего налета (т.е. количество часов с момента запуска двигателей указанных воздушных судов в аэропорту отправления до их остановки в аэропорту назначения) отечественных и зарубежных пассажирских и грузовых воздушных судов, совершающих перелеты с территории Российской Федерации. Приведенные в таблице 1 данные характеризуются высокой вариацией, что обусловливает необходимость анализа технических параметров каждого типа воздушного судна, для которого производится расчет.

[2] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 марта 2006 г. № 278-р.

Пересчет массы использованного авиационного керосина в тепловой эквивалент производился при помощи коэффициента пересчета в тонны условного топлива для авиационного керосина, величина которого 1,47 т.у.т. • $т^{-1}$ и коэффициента пересчета в теплотворную способность 0,0293 • 10^{12} Дж • $т.у.т.^{-1}$, разработанных Госкомстатом России в 1999 году[3]. Коэффициент эмиссии, использованный в расчетах выбросов диоксида углерода при международных авиационных перевозках, был взят из руководства МГЭИК. Его величина составляет 71,5 т • 10^{-12} $Дж^{-1}$ (МГЭИК, 2006). По мнению авторов, использованный подход соответствует второму уровню сложности методологии МГЭИК.

Таблица 1.

Средний расход топлива основных эксплуатируемых типов воздушных судов по (Ежегодник АТО, 2007)

Наименование типа ВС	Категория	Средний расход топлива, т/час
Ан-124	грузовой	12,6[1]
A-310 (Airbus)	пассажирский	4,3
A-320 (Airbus)	пассажирский	2,6
B-737 (Boeing)	пассажирский	2,8
B-747 (Boeing)	грузопассажирский	14,5
B-767 (Boeing)	пассажирский	4,5
B-777 (Boeing)	пассажирский	6,4[2]
Ил-62М	пассажирский	6,6
Ил-76	грузовой	8,0[1]
Ил-86	пассажирский	9,9
Ил-96	пассажирский	6,7
Ту-134	пассажирский	2,5
Ту-154М	пассажирский	5,2
Ту-204	пассажирский	3,2
Як-40	пассажирский	1,1
Як-42	пассажирский	3,1

Примечания: [1] Интернет-энциклопедия «Википедия» (www.wikipedia.org)
[2] Фомин, Агеев (2006)

[3] «Об утверждении «Методических положений по расчету топливно-энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой»» Утверждено постановлением Госкомстата России № 46 от 23 июня 1999 г.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов общего потребления авиационного керосина, выполненные по формуле 2 за период с 2000 по 2007 годы, приведены в таблице 2. Как следует из таблицы 2, в 2007 году потребление топлива воздушными судами составило около 2,45 млн. т, что на 54,0% больше, чем в 2000 году. Значительный рост использования авиационного топлива в целом согласуется с тенденциями увеличения объемов международных грузовых и пассажирских перевозок, о которых говорилось выше.

Таблица 2.

Потребление авиационного керосина при выполнении международных авиаперевозок с территории Российской Федерации

Год	Потребление авиационного керосина, тыс. т
2000	1589,6
2001	1633,0
2002	1628,0
2003	1697,9
2004	1942,2
2005	1888,0
2006	2075,1
2007	2448,1

На рисунке представлены величины выбросов диоксида углерода от международных авиационных перевозок, рассчитанные по формуле 1. Как указывалось выше, расчеты производились с 2000 по 2007 гг., для которых авторы располагали всеми необходимыми данными. В 2007 г. совокупная эмиссия от международных авиаперевозок составила 7,5 млн. т CO_2. Анализ динамики выбросов с 2000 по 2007 гг. свидетельствует об их росте на 53,1% по сравнению с уровнем 2000 года. Несмотря на значительный рост, выбросы диоксида углерода от международных авиационных перевозок в среднем составляют менее 1% совокупных выбросов парниковых газов с территории Российской Федерации (Четвертое национальное сообщение, 2006). Однако, принимая во внимание требование обязательной отчетности об этом виде хозяйственной деятельности, количественная оценка эмиссии диоксида углерода от международных авиационных перевозок представляется необходимой.

Важным компонентом количественной оценки эмиссии парниковых газов является анализ точности выполненных расчетов, которая

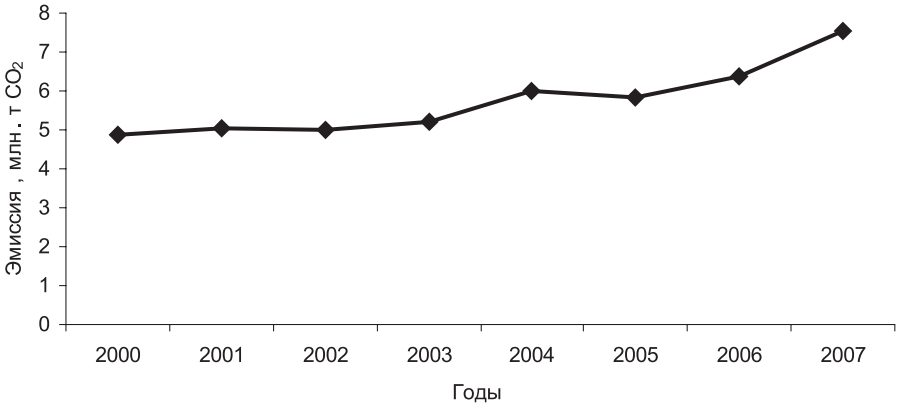


Рис. Выбросы диоксида углерода от воздушных судов, выполняющих авиационные перевозки с территории Российской Федерации.

определяется достоверностью исходных данных и конверсионных коэффициентов. Как указывается в Руководящих указаниях МГЭИК по эффективной практике, неопределенность коэффициентов выбросов CO_2 для разных видов топлив находится, как правило, в пределах ± 5 %, поскольку они зависят в основном от содержания углерода в конкретном топливе и достаточно точно определены. Однако источником более высокой неопределенности могут быть исходные данные (Руководящие указания, 2000). В частности, МГЭИК рекомендует выполнять расчеты отдельно для цикла взлета и посадки и периода крейсерского полета воздушных судов. В то же самое время в руководстве МГЭИК указывается, что до 90% выбросов воздушных судов приходится на больших высотах, то есть во время их крейсерского полета (МГЭИК, 2006). К сожалению, доступная авторам информация не позволяла выделить циклы взлета и посадки из общего объема полетного времени. Принимая во внимание незначительные выбросы диоксида углерода во время взлета и посадки воздушных судов, можно сказать, что выполненные нами расчеты в целом соответствуют требованиям МГЭИК.

Другим важным критерием качества выполненных оценок является их полнота. Как указывалось выше, наряду с диоксидом углерода воздушные суда выбрасывают парниковые газы CH_4 и N_2O, а также предшественники озона NO_x, CO, НМЛОС и SO_x. И хотя доля этих газов в общем объеме выбросов невелика, метан и закись азота обладают большим, чем диоксид углерода, потенциалом глобального потепления, и, следовательно, их воздействие на климатическую систему следует также учитывать. Расчет выбросов метана, закиси азота и предшественников озона следует рассматривать в качестве приоритетной задачи дальнейших исследований.

Не менее важным представляется выполнение расчетов выбросов парниковых газов для более ранних лет, включая 1990 год, который является базовым годом РКИК ООН и Киотского протокола. С 1990 годом будут сравниваться выбросы в период выполнения обязательств по Киотскому протоколу, и получение информации о выбросах от международных авиационных перевозок в 1990 году также следует считать приоритетной задачей дальнейших исследований.

Заключение

Как показывают выполненные расчеты, с 2000 по 2007 годы отмечается рост выбросов диоксида углерода от международных авиаперевозок, выполнявшихся с территории Российской Федерации. Тем не менее, пока выбросы CO_2 от этого вида деятельности не превышают 1% национальных выбросов парниковых газов. Полученную оценку эмиссии следует считать предварительной, так как в расчетах не учитывались выбросы других парниковых газов метана и закиси азота. Кроме того, необходимо выполнить расчеты выбросов парниковых газов за период с 1990 года по настоящее время, чтобы можно было судить о степени выполнения Российской Федерацией принятых в рамках РКИК ООН и Киотского протокола обязательств. Выполнение таких расчетов следует считать первоочередной задачей дальнейших исследований.

Благодарность

Авторы выражают признательность Федеральной аэронавигационной службе Министерства транспорта Российской Федерации и Главному центру Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации за предоставленные данные об общем налете самолето-часов при осуществлении международных авиационных перевозок с территории Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Фомин А. В., Агеев В. А. 2006. «Иномарки» в российском небе. Взлет. № 3. С. 22-28

Ежегодник АТО 2007. Тенденции. Цифры. Факты. М.: Издательский дом А. Б. Е. Медиа. 2007. 128 С.

Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. 2005. 38 С.

МГЭИК, 2006. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Игглестон Х.С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. (Ред.) МГЭИК - ИГЕС. 2006.

Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 2005. 41 С.

Российский статистический ежегодник. 2007: Стат. сб. Росстат. М.: 2007. 826 С.

Руководящие указания по эффективной практике и учету факторов неопределенности в национальных кадастрах парниковых газов. IPCC-IGES-OECD-IEA. Hayama, 2000.

Четвертое национальное сообщение Российской Федерации. Издание официальное. 2006. (Под ред. Ю.А. Израэля, А.И. Нахутина, С.М. Семенова и др.). М.: АНО Метеоагентство Росгидромета. 164 С.

IPCC, 1999. Aviation and the Global Atmosphere. Special Report. J.E.Penner, D.H.Lister, D.J.Griggs, D.J.Dokken, M.McFarland (Eds.) Cambridge University Press, UK, 1999, 373 P.

ЭМИССИЯ МЕТАНА ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ В РОССИИ

***О. В. Тайлаков*[1)], *А. Н. Кормин*[1)], *В. О. Тайлаков*[1)], *М. Л. Гитарский*[2)]**

[1)] Россия, 650610, Кемерово, ул. Рукавишникова, 21, Институт угля и углехимии СО РАН, tailakov@uglemetan.ru

[2)] Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20-Б, Государственное учреждение Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Mike.Gytarsky@g23.relcom.ru

Реферат. Получены оценки эмиссии метана при добыче угля в России - при извлечении угля открытым и подземным способами, а также на последующих этапах отраслевых работ в условиях угольной промышленности России. Основной вклад в эмиссию от угледобывающей отрасли страны в 1990 – 2005 гг. вносила подземная добыча угля – около 65% совокупного отраслевого выброса CH_4. Вклад открытой добычи угля – 35% . Наиболее эффективным методом снижения выбросов метана в угольной отрасли является утилизация шахтного метана. Эта мера не только отвечает задачам смягчения изменений климата, но и способствует повышению безопасности горных работ.

Ключевые слова. Метан, эмиссия, добыча угля, метанообильность, газоносность, изменение климата.

METHANE EMISSIONS FROM COAL MINING IN RUSSIA

***O. V. Tailakov*[1)], *A. N. Kormin*[1)], *V. O. Tailakov*[1)], *M. L. Gytarsky*[2)]**

[1)] Institute of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 21, Rukavishnikova str., 650610 Kemerovo, Russia, tailakov@uglemetan.ru

[2)] Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, Mike.Gytarsky@g23.relcom.ru

Abstract. Estimates of methane emissions in Russia from surface and underground coal mining and post-mining within-sector processing are presented. The underground mining was the main contributor to the sectoral emission total in 1990–2005. It made about 65% , while the open mining contributed about 35% . Methane utilization is the most efficient way for the reduction of national methane emission from coal mining. This measure promotes mitigation of climate change and improves safety of mining operations.

Keywords. Methane, emission, coal mining, methane content, gas content, climate change.

Введение

Российская Федерация в числе других 37 экономически развитых стран, ратифицировавших Рамочную конвенцию ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Киотский протокол, приняла на себя обязательства снизить к 2000 году антропогенные выбросы парниковых газов до уровня 1990 года, а затем обеспечить сокращение их совокупных выбросов в период с 2008 по 2012 гг. по меньшей мере на 5% по сравнению с уровнями 1990 года. В контексте Киотского протокола Россия обязалась, несмотря на экономический рост, сохранять антропогенные выбросы парниковых газов на уровне 1990 года (Рамочная Конвенция ООН, 2005; Киотский протокол, 2005). Для оценки степени выполнения принятых обязательств Россия должна ежегодно представлять в органы РКИК ООН и Киотского протокола информацию об антропогенных выбросах и абсорбции парниковых газов на основе методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Руководящие указания по эффективной практике, 2000; МГЭИК, 2006).

В 2006 году Правительство Российской Федерации издало распоряжение о создании российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, главными задачами которой определены оценка объемов антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов и представление их в форме Национального доклада о кадастре парниковых газов. Представление данных об эмиссии парниковых газов от угледобычи определено в качестве отдельного раздела энергетической главы Национального кадастра. По оценкам Четвертого национального сообщения, энергетика вносит наибольший вклад в выброс парниковых газов с территории страны – 83% в 1990 году и около 85% в 2004 году (Четвертое национальное сообщение, 2006). Для категорий источников и секторов с наибольшим вкладом в совокупный национальный выброс парниковых газов, методология Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) предусматривает выполнение оценок на основе детализированных данных и параметров (МГЭИК, 2006). В настоящей статье приводятся результаты количественных оценок эмиссии парниковых газов от угольной отрасли, полученные на основе данных о деятельности отдельных угледобывающих предприятий и углубленного анализа состава углей, разрабатываемых в Российской Федерации. Подобные оценки для угольной отрасли страны выполняются впервые.

Методы и материалы

Метан (CH_4) является вторым по значимости после диоксида углерода парниковым газом. Он интенсивно выделяется в процессе добычи угля, при его транспортировке и переработке. Процессы углеобразования со-

провождаются накоплением метана в угольных пластах, их трещинах и прилегающих пустотах. В угольных пластах содержатся сравнительно небольшие объемы свободного метана. В основном он абсорбирован в твердом угле–газовом растворе или адсорбируется на поверхностях макромолекул и микротрещин. Количество метана, содержащееся в весовой или объемной единице горной породы в виде свободных и сорбированных газов, характеризуется термином «метаноносность». Метаноносность угольных пластов возрастает с глубиной благодаря росту сорбционной способности и изменению пористости углей.

В природных условиях существует динамическое равновесие между свободным и связанным метаном в угольных пластах, которое нарушается при их разработке. Таким образом, разработка угольных пластов приводит к поступлению свободного метана в горные выработки или напрямую в атмосферу при добыче угля открытым способом. Количество метана, выделяющегося в подземные выработки, характеризуется термином метанообильность. Абсолютная метанообильность представляет собой дебит CH_4, в единицу времени, а относительная – объем газа, выделившегося за определенное время и отнесенное к тонне угля, добытого за тот же период (Газоносность угольных бассейнов..., 1979; Малышев, Айруни, 1999; Руководящие указания по эффективной практике, 2000; МГЭИК, 2006). Учет объемов эмиссии метана при добыче, транспортировке и переработке угля важен не только для выполнения международных обязательств России по РКИК ООН и Киотскому протоколу, но и для обеспечения безопасности горных работ, а также для разработки мероприятий по повышению эффективности дегазации угольных пластов.

Оценка эмиссии метана при подземной добыче угля представляется наиболее важной, так как добыча ведется на больших глубинах из угольных пластов, обладающих высокой газоносностью. Инженерные службы шахт постоянно контролируют метанообильность для предотвращения загазований горных выработок для безопасной работы. Соответственно при известных величинах абсолютной метанообильности, поступающих от инженерных служб угольных шахт, расчеты эмиссии CH_4 производились по формуле 1:

$$E_{CH_4} = \sum(A_m \cdot CF_{CH_4}), \text{ где} \qquad (1)$$

E_{CH_4} – величина эмиссии CH_4, Гг;
A_m – абсолютная метанообильность угольной шахты, $м^3 \cdot год^{-1}$;
CF_{CH_4} – коэффициент пересчета объемных долей CH_4 в весовые ($0{,}67 \cdot 10^{-6}$ Гг $\cdot$ $м^{-3}$ при плотности метана в условиях $T = 20^{\circ}C$ и давлении 1 атм. по (МГЭИК, 2006))

Отсутствующие данные по метанообильности восстанавливались при помощи кубической интерполяции на основе временных рядов изменений параметра протяженностью не менее 10 лет. Эмиссия CH_4 рас-

считывалась отдельно для каждой шахты всех угольных бассейнов, разрабатываемых в Российской Федерации. В отдельных случаях, когда данные для конкретной шахты отсутствовали, расчеты выполняли на основе средней метанообильности шахт одного угольного бассейна или добываемых углей сходного марочного состава, которые брали из справочной литературы (Газоносность угольных бассейнов..., 1979).

Если величины метанообильности угольных шахт были неизвестны, оценка выбросов CH_4 производилась по формуле 2 на основе данных метаноносности угольных пластов (Газоносность угольных бассейнов...., 1979):

$$E_{CH_4} = \sum (1{,}15 \cdot C_m \cdot M_c \cdot CF_{CH_4}), \text{ где} \qquad (2)$$

E_{CH_4} – величина эмиссии CH_4, Гг;
C_m – метаноносность угольного пласта, м^3 CH_4 · т$^{-1}$;
M_c – масса добытого угля, т;
CF_{CH_4} – коэффициент пересчета объемных долей CH_4 в весовые ($0{,}67 \cdot 10^{-6}$ Гг · м$^{-3}$ при плотности метана в условиях Т = 20°С и давлении 1 атм. по (МГЭИК, 2006))

Использование коэффициента 1,15 обусловлено необходимостью учета дополнительной эмиссии метана из пластов-спутников, величина которой составляет в среднем 15% от эмиссии угольного пласта. В целях обеспечения безопасности подземных работ, метан, поступающий в подземные выработки из угольных пластов, удаляется при помощи систем дегазации, принудительной вентиляции и систем управления газовыделением. Часть удаленного метана утилизируется. В настоящее время утилизация метана очень незначительная, и выполняется она только на шахтах Печорского угольного бассейна. В таблице приведены данные об утилизации метана на шахтах Печорского угольного бассейна с 1990 по 2005 гг. включительно. Как видно из таблицы, в 2005 году объемы утилизации метана возросли в 2,2 раза по сравнению с уровнем 1990 года. Расчетные значения эмиссии метана при добыче подземным способом корректировались на величины его утилизации из таблицы.

При добыче подземным способом выбросы CH_4 при непосредственном извлечении угля из недр и от транспортировки его по поверхности рассчитывали отдельно. Расчет выбросов метана, высвободившегося при транспортировке по поверхности угля, добытого подземным способом, к месту его переработки (по терминологии МГЭИК — эмиссия от последующих операций с углем, добытым подземным способом) выполняли по формуле 3:

$$E_{CH_4} = \sum (C_m \cdot M_c \cdot EF_{CH_4} \cdot CF_{CH_4}), \text{ где} \qquad (3)$$

E_{CH_4} – величина эмиссии CH_4, Гг;
C_m – метаноносность угольного пласта, м^3 СН · т$^{-1}$;

M_c – масса добытого угля, т;
EF_{CH_4} – коэффициент эмиссии метана при последующих операциях;
CF_{CH_4} – коэффициент пересчета объемных долей CH_4 в весовые ($0{,}67 \cdot 10^{-6}$ Гг · м$^{-3}$ при плотности метана в условиях Т = 20°С и давлении 1 атм. по (МГЭИК, 2006))

Таблица.

Утилизация метана на шахтах Печорского угольного бассейна

Год	Величина утилизированного метана при концентрации 100%, тыс. т
1990	25.21
1991	24.35
1992	31.67
1993	26.18
1994	21.67
1995	20.35
1996	16.80
1997	18.92
1998	21.34
1999	20.66
2000	21.38
2001	23.74
2002	28.48
2003	35.47
2004	44.55
2005	55.57

Примечание: Данные 2001–2004 гг. получены на основе кубической интерполяции

Величины метаноносности угольных пластов были взяты из справочной литературы (Газоносность угольных бассейнов..., 1979). На шахтах угольных бассейнов Северного региона применяется предварительная дегазация угольных пластов. Соответственно величина EF_{CH_4} была принята 10%. Для остальных шахт Российской Федерации EF_{CH_4} была принята 30% (МГЭИК, 2000). При открытой добыче угля последующие выбросы метана или ничтожно малы или отсутствуют, поскольку он весь выделяется в атмосферу во время вскрытия и разработки угольного пласта (МГЭИК, 2000). Соответственно эмиссия метана от последующих операций с углем, добытым открытым способом, не оценивалась.

Добыча угля открытым способом ведется в условиях, когда угольный пласт залегает неглубоко и не перекрыт мощным слоем пустой породы. Приемлемые для открытой добычи угольные бассейны расположены в Восточной и Западной Сибири. Анализ геологических данных, например, крупнейшей угледобывающей компании РФ «Кузбассразрезуголь», в состав которой входит большая часть угольных разрезов Кузбасса, показал, что десорбционные свойства угольных пластов, отрабатываемых разрезами, исследованы недостаточно. Поэтому их метаноносность определялась по данным о марочном составе углей, добываемых на отдельных разрезах, и соответствии газоносности пластов определенному марочному составу и глубине залегания (Газоносность угольных бассейнов..., 1979). Эмиссию CH_4 при добыче угля открытым способом рассчитывали по формуле 4:

$$E_{CH_4} = \sum (C_m \cdot M_c \cdot CF_{CH4}), \text{ где} \quad (4)$$

E_{CH_4} – величина эмиссии CH_4, Гг;
C_m – метаноносность угольного пласта, м^3 CH_4 · т$^{-1}$;
M_c – масса добытого на разрезе угля, т;
CF_{CH_4} – коэффициент пересчета объемных долей CH_4 в весовые ($0{,}67 \cdot 10^{-6}$ Гг · м$^{-3}$ при плотности метана в условиях Т = 20°С и давлении 1 атм. по (МГЭИК, 2006))

Для выполнения расчетов по формулам 2–4 необходимы данные о добыче угля, которые были взяты из отчетности о производственной деятельности отдельных угольных шахт и разрезов территории Российской Федерации, а также шахт, разрабатываемых Россией в порядке концессии на о. Шпицберген. Данные о добыче угля открытым и подземным способом приведены на рис. 1. Формулы 1–4 соответствуют положениям методологии МГЭИК о детализированной оценке категорий источников, дающих значительный вклад в совокупный эквивалентный выброс парниковых газов с территории страны (Руководящие указания по эффективной практике, 2000; МГЭИК, 2006).

Результаты и обсуждение

Как уже упоминалось выше (формулы 2-4), динамика эмиссии метана в значительной степени зависит от годовых объемов добычи угля. Наибольшая добыча угля в стране приходится на открытые разрезы (рис. 1), которые расположены в основном на востоке страны (южный Урал, юго-восток Сибири и Дальний Восток). Анализ данных по добыче угля показывает, что, с 1990 по 1995 годы добыча угля из разрезов снизилась на 31%, после чего наметился ее устойчивый рост. В 2005 году добыча открытым способом превысила уровень 1990 года практически на 3%. Основной причиной наблюдаемых изменений была рецессия экономической деятельности в стране с 1990

по 1998 годы и боле высокая по сравнению с подземной экономическая эффективность открытой добычи, позволившая уже к 1996 году преодолеть кризисные явления и увеличить разработку угольных разрезов.

Большая часть подземной добычи приходится на угольные бассейны севера Европейской территории страны и Западной Сибири. Негативные тенденции в экономике в 1990—1998 годах привели к тому, что добыча угля из шахт в 1998 году снизилась на 33% от уровня 1990 года. Дополнительным фактором, повлиявшим на более интенсивное, чем в случае открытой добычи, падение показателей, была реструктуризация отрасли, сопровождавшаяся закрытием нерентабельных и малопродуктивных шахт. Однако после 1998 года разработки шахт начали интенсивно развиваться и в 2005 производство угля подземным способом превысило уровень 1990 года на 5,6%. Дополнительным стимулом к развитию угледобычи подземным способом можно назвать наметившуюся в последние годы тенденцию диверсификации использования доступных энергетических ресурсов, которая повысила значимость угольных бассейнов Европейского Севера страны и Западной Сибири ввиду их близости к потребителям.

Оценка эмиссии метана при извлечении угля подземным способом в 1990-2005 годах с учетом объемов утилизации шахтного метана на угольных шахтах ОАО «Воркутауголь» в Печерском угольном бассейне приведена на рис. 2. На этом же рисунке приведены величины эмиссии метана от добычи угля открытым способом и общая эмиссия метана от угледобывающей отрасли Российской Федерации. Как видно из рисунка, подземная добыча угля является основным источником атмосферных выбросов метана. После 1990 года эмиссия шахтного метана сокращалась и достигла минимума в 1999 году – 854,0 тыс. т, что на 33,1% ниже, чем в 1990 году, когда она составляла около 1,3 млн. т (1 276,0 тыс. т). После 1990 года наблюдается рост выбросов. Максимальная величина эмиссии CH_4 – 1,4 млн. т (1 350,1 тыс. т) отмечена в 2004 году. В 2005 году выбросы метана снизились до 1,2 млн. т (1 155,6 тыс. т), что на 9,4% ниже, чем в 1990 году. Основными факторами, определяющими интенсивность эмиссии, являются добыча угля (рис. 1) и утилизация удаляемого из шахт метана, которая в 2005 гг. существенно возросла (таблица). Несмотря на более чем двукратный рост с 1990 по 2005 годы, объемы утилизации метана очень незначительные и составили чуть меньше 2% от эмиссии метана при подземной добыче в 1990 году и около 5% от эмиссии CH_4 при подземной добыче в 2005 году (таблица, рис. 2).

Величины выбросов CH_4, рассчитанные для последующих операций с углем, добытым подземным способом, приведены на рис. 3. В целом, доля эмиссии CH_4 от последующих операций не превышает 1% выбросов шахтного метана, то есть их вклад в совокупную вели-

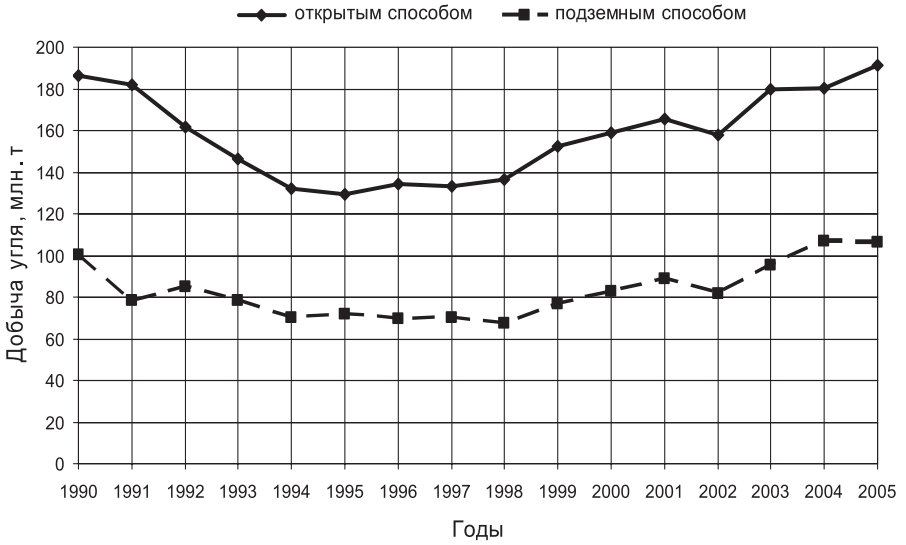


Рис. 1. Добыча угля в Российской Федерации по способам

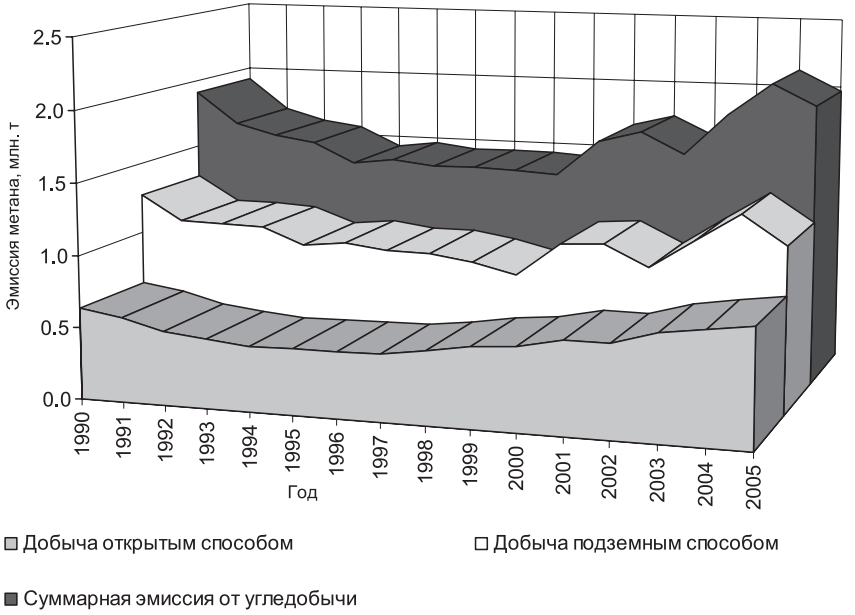


Рис. 2. Эмиссия метана по способам добычи и в целом по угледобывающей отрасли Российской Федерации.

чину выбросов CH_4 от угледобычи незначителен. Как видно из рис. 3, эмиссия была минимальной в 1996—1998 годах, после чего возросла и в 2005 году превысила уровень 1990 года на 15,1%.

Анализ динамики эмиссии CH_4 от добычи открытым способом показывает, что после 1990 года имело место падение выбросов. Минимальная величина эмиссии отмечается в 1994 году – 447,8 тыс. т, что на 29,4% ниже, чем в 1990 году. После 1994 года выбросы начали расти и в 2005 году составили 814,5 тыс. т, что на 28,4% выше, чем в 1990 году. Как указывалось выше, основным фактором, определяющим динамику выбросов метана из открытых угольных разрезов, является интенсивность добычи угля, которая, в свою очередь, зависит от указанных выше экономических причин. Следует отметить, что, несмотря на значительные объемы выработки, вклад открытой добычи угля в совокупный выброс метана по отрасли составляет в среднем 35%, что значительно ниже, чем выбросы от подземной добычи угля (в среднем около 64,95% совокупного выброса CH_4 по отрасли).

Важным компонентом количественной оценки эмиссии парниковых газов является анализ точности выполненных расчетов, которая определяется достоверностью исходных данных и конверсионных коэффициентов. В угольной промышленности страны при извлечении угля подземным способом измерения концентрации метана проводятся ежедневно с помощью метанометров. При этом поток газовоздушной смеси определяется с помощью анемометров и диффе-

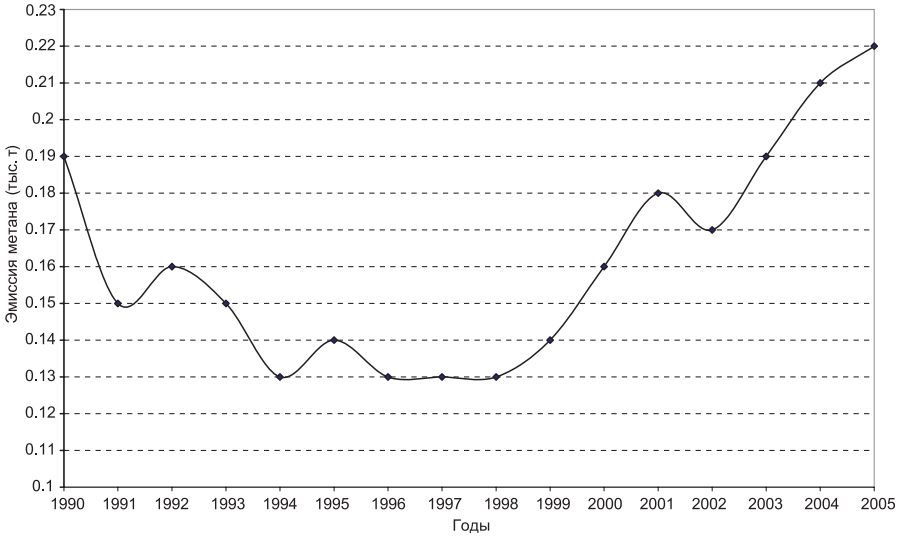


Рис. 3. Эмиссия метана от последующих операций с углем с 1990 по 2005 гг. (тыс. т)

ренциальных манометров, либо на основе косвенных расчетов потока с учетом производительности воздухоподающих или газоотсасывающих установок. Точность таких режимов измерений составляет ±5%. Эту величину погрешности можно принять для оценок эмиссии от подземной угледобычи и последующих операций с углем, рассчитанных по формулам 1—2, так как коэффициенты эмиссии CH_4 получены с использованием газообильности или газоносности на основе тех же данных инструментального контроля концентрации метана в горных выработках.

Для оценок эмиссии метана при последующих операциях с углем, добытым подземным способом, неопределенность принята ± 50%. При оценках эмиссии CH_4 при извлечении угля открытым способом погрешность значительно выше и принимается с коэффициентом 2 относительно рассчитанных объемов выбросов метана, то есть она составляет ± 100%.

Заключение

Таким образом, использование горнотехнической информации и технико-экономических показателей функционирования угледобывающих предприятий Российской Федерации позволило получить оценки эмиссии метана при извлечении и последующих операций с углем. Как показали выполненные расчеты, основной вклад в профиль выбросов от угледобывающей отрасли страны вносит добыча угля подземным способом — в среднем около 64,95% совокупного выброса CH_4 с 1990 по 2005 годы включительно. Объемы утилизации метана при подземной добыче угля составили от 2% до 5% эмиссии при подземной добыче в 1990 и 2005 году соответственно. Эмиссия CH_4 от последующих операций не превышает 1% выбросов шахтного метана, то есть ее вклад в совокупную величину выбросов CH_4 от угледобычи незначителен.

Несмотря на значительные объемы выработки, вклад открытой добычи угля в совокупный выброс метана по отрасли составляет в среднем 35%, что значительно ниже, чем выбросы от подземной добычи угля. При этом антропогенное регулирование интенсивности выброса CH_4 при открытой добыче угля крайне затруднительно, поскольку процесс выделения метана в атмосферу при механическом вскрытии и разработке угольных пластов на открытых разрезах практически не управляем.

Таким образом, полученные нами результаты показывают, что наиболее действенным методом снижения выбросов метана от угольной отрасли является интенсификация мер по утилизации шахтного метана, которая на предприятиях угольной отрасли страны в настоящее время носит практически эпизодический характер. Повышение эффективности улавливания метана может быть достигну-

то благодаря совершенствованию дегазационных систем угольных шахт, в том числе и в результате реализаций проектов совместного осуществления. Своевременные меры по сокращению выбросов шахтного метана не только соответствуют принятым Российской Федерацией национальным обязательствам в рамках Климатической конвенции и Киотского протокола, являясь вкладом страны в смягчение изменений климата, но и способствуют повышению безопасности горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР. 1979. Гл. ред. А. И. Кравцов, в 3-х томах. М.: Недра.

Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. 2005. 38 С.

Малышев Ю. Н., Айруни А. Т. 1999. Комплексная дегазация угольных шахт. М.: Издательство академии горных наук, 327 С.

МГЭИК, 2006. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Игглестон Х. С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т и Танабе К. (Ред.) МГЭИК - ИГЕС.

Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 2005. 41 С.

Руководящие указания по эффективной практике и учету факторов неопределенности в национальных кадастрах парниковых газов. 2000. IPCC-IGES-OECD-IEA. Hayama.

Четвертое национальное сообщение Российской Федерации. Издание официальное. 2006. (Под ред. Ю. А. Израэля, А. И. Нахутина, С. М. Семенова и др.). М.: АНО Метеоагентство Росгидромета, 164 С.

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ АНОМАЛИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ НЕКОТОРЫХ ФОНОВЫХ РАЙОНОВ

С. Н. Котельников, В. А. Миляев, В. В. Саханова

Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38, Институт общей физики РАН, skotelnikov@mail.ru

Реферат. Представлены результаты наблюдений за концентрацией озона в приповерхностном слое атмосферы, проведенных в России – в г. Таруса (курортное место в Калужской области) и на юге Кировской области, а также на Украине – в Крыму на территории Карадагского природного заповедника. Проведено сравнение данных этих наблюдений с результатами аналогичных наблюдений, выполненных в Московском регионе. Показано, что в жаркую погоду в весенне-летний период в атмосфере фоновых районов наблюдаются повышенные концентрации озона, превышающие предельно допустимые уровни.

Ключевые слова. Приземный озон, загрязнение атмосферы, мониторинг, предшественники озона.

POSITIVE ANOMALIES OF GRAUND-LEVEL OZONE CONCENTRATIONS IN THE ATMOSPHERE OF SOME BACKGROUND REGIONS

S. N. Kotelnikov, V. A. Milyaev, V. V. Sakhanova

Institute of General Physics of RAS, 38, Vavilova str., 119991 Moscow, Russia, skotelnikov@mail.ru

Abstract. Observational data on ground-level ozone concentrations in the southern part of the Kirov region (Russia), in Tarusa, a resort area located in the Kaluga region (Russia), and in the Karadag nature reserve (Crimea, Ukraine) are presented. The data are analyzed vs. results of similar observations in the Moscow region. It is shown that under hot weather in spring and summer ozone concentrations in the background regions may exceed maximum permissible levels.

Keywords. Ground-level ozone, atmospheric pollution, monitoring, precursors of ozone.

Введение

Повышенные концентрации приземного озона в средней полосе России впервые были отмечены в конце 90-х годов прошлого века. Так, 1 сентября 1996 г., на станции мониторинга в г. Долгопрудный,

была зарегистрирована максимальная концентрация озона (КО) 188 мкг/м^3, а в июле 1999 г., уже 216 мкг/м^3 (Беликов и др., 2004).

В период с июля по сентябрь 2002 г. в приземном слое атмосферы Москвы и области наблюдались аномально высокие КО, которые превышали подобные уровни, зарегистрированные за последние 10 лет на сети станций ЕМЕП почти во всех странах Западной Европы (Беликов и др., 2004). Впервые за время регулярных наблюдений с 1991 г. в Москве и области сложилась ситуация, когда в течение столь длительного периода КО антропогенного происхождения превышали его естественные уровни. Максимальные суточные КО в июле и августе в шесть раз превысили рекордный уровень, имевший место в июле 1999 г. Аномально высокие уровни озона, значительно превышающие установленные санитарные нормы для населенных пунктов, отмечены во всех точках измерений в регионе. В отдельных пунктах значения разовых приземных КО составляли 280 мкг/м^3 и более, а среднесуточные значения превышали 100 мкг/м^3. Эти высокие уровни были вызваны фотохимической генерацией озона из-за повышенных концентраций в воздухе газов-предшественников озона (Беликов и др., 2004). В указанной выше работе отмечается, что все наивысшие уровни озона сопровождались высокой температурой атмосферного воздуха (превышающей средние многолетние показатели), малой скоростью ветра, низкой влажностью. Проведенные нами измерения приземного озона в традиционно курортном районе Калужской области летом 2002 г. (Котельников и др., 2003) дали схожие результаты с вышеуказанными, в некоторые дни КО в курортном месте превышали максимальные концентрации в Москве и Долгопрудном.

Относясь к веществам высшей категории опасности, озон при повышенных концентрациях в приземной атмосфере способен наносить миллиардные убытки сельскому хозяйству (Семенов и др., 1999), а также отрицательно влиять на здоровье населения (Грушко, 1987). Поскольку приземный озон является парниковым газом, то информация о его содержании в тропосфере очень важна и в контексте проблем изменений глобального климата.

Методы и материалы

О методах и материалах измерений приземного озона в Крыму и г. Таруса подробно описывалось в (Котельников и др., 2003). Для сопоставления результатов были использованы данные измерений Института физики атмосферы (ИФА) РАН на территории МГУ (далее МГУ) и Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) Росгидромета в г. Долгопрудный. В Кировской области измерения озона проводились с помощью аналогичного аналитического оборудования (хемилюминесцентный газоанализатор озона модели 3.02П-А, основная

относительная погрешность измерений ±20%). Город Вятские Поляны расположен на юге Кировской обл., его население около 30 тыс. человек. Там газоанализатор был установлен на высоте последнего этажа пятиэтажного дома на окраине города в парковой зоне. Второй пункт наблюдений был в деревне Каракульская пристань, в 30 км от Вятских Полян выше по течению реки Вятка в малонаселённом лесном районе. Измерения производились на удалении 100 м от лесного массива на высоте 2,5 м от поверхности земли. Сопутствующие метеопараметры измерялись автоматической метеостанцией Vantage Pro 2 Plus производства Davis Instruments.

Результаты

Измерения приземного озона в Крыму были начаты одним из авторов в 1993 г. в атмосфере Карадагского заповедника на станции мониторинга (северный склон горы Святая). На рис. 1 показан ход КО с тридцатиминутным интервалом в июле этого года. Запись результатов измерений озона производилась непрерывно на ленту самописца и считывалась с интервалом 30 минут. 27 июля КО превышала максимально разовую ПДК (160 мкг/м^3) с 12:00 до 21:30, а максимальная среднечасовая величина составила 208 мкг/м^3. Среднесуточное значение озона за это число составило 157 мкг/м^3. Температура атмосферного воздуха в 15 часов равнялась 27,2°С, относительная влажность 36%. 28 июля КО превышала уровень разовой ПДК с 10:30 до 03:00 следующих суток. Среднесуточная величина озона за 28 июля составила 159 мкг/м^3.

Максимальная разовая ПДК для воздуха жилых зон (Тищенко Н. Ф., Тищенко А. Н., 1993) составляет в России 160 мкг/м^3 (среднее за 20 минут), среднесуточное ПДК 30 мкг/м^3 и 100 мкг/м^3 ПДК для воздуха рабочей зоны. В странах ЕС максимальное среднечасовое значение ПДК составляет 180 мкг/м^3, порог защиты здоровья (среднее за 8 часов) 110 мкг/м^3 (Hjellbrekke, Solberg, 2002). Подобные эпизоды высоких КО в атмосфере заповедника отмечались и в последующие годы проведения измерений. Так, в апреле 1998 г. среднесуточные значения КО 22 дня превышали ПДК в два и более раз. В этом месяце аномально высокая среднемесячная температура воздуха превышала многолетний показатель на 4°С. Повышенные значения уровней озона всегда регистрировались на фоне высокой температуры атмосферного воздуха, низкой влажности и максимального времени солнечного сияния.

Подобные погодные условия сложились в Московском регионе и Калужской обл. летом 2002 г. Среднесуточная температура воздуха была выше нормы весь июль (среднемесячная температура превышала многолетнюю на 4,4°С.) и начало августа. На рис. 2 показан одновременный ход среднедневных концентраций озона в г. Таруса,

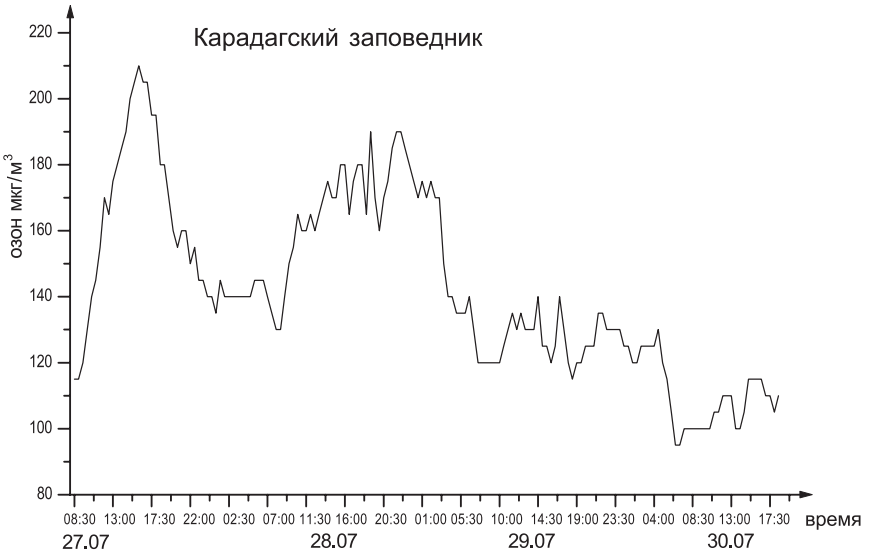


Рис. 1. Ход концентраций приземного озона с тридцатиминутным интервалом в атмосфере Карадагского заповедника в июле 1993 года

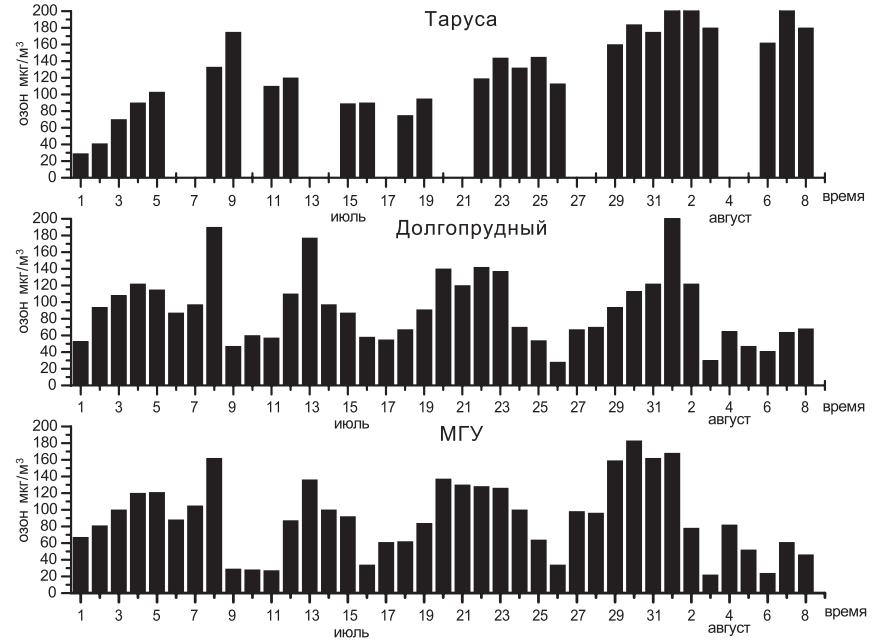


Рис. 2. Одновременный ход среднедневных концентраций приземного озона на территории МГУ, в г. Долгопрудном и в г. Таруса летом 2002 года

г. Долгопрудный и на территории МГУ в июле-августе 2002 г. Как видно из диаграмм, озоновый эпизод начал синхронно развиваться с первого июля в атмосфере Москвы, а также Московской и Калужской областей, одновременно достигнув аномально высоких КО 8 июля. В Тарусе максимальное значение КО в этот день составило 173 мкг/м^3, в Долгопрудном 244 мкг/м^3, МГУ 192 мкг/м^3. В ночь на 9 июля через Московский регион проходил с северо-запада атмосферный фронт, сопровождавшийся грозами, ливнем и сильным ветром. В Москве и Долгопрудном КО понизились, а в Тарусе, не задетой фронтом, КО выросли и достигли максимального значения 206 мкг/м^3 и среднедневного 175 мкг/м^3. Наиболее продолжительный эпизод с самыми высокими значениями КО в указанных трёх пунктах наблюдался в конце июля-начале августа, причём среднедневные КО на территории МГУ и в Тарусе имели практически одинаковые значения. Так, 29 июля эта величина в Тарусе составила 160 мкг/м^3, на территории МГУ 159 мкг/м^3. 30 июля соответственно 184 мкг/м^3 и 183 мкг/м^3, а 31 июля 175 мкг/м^3 и 162 мкг/м^3. Первого августа среднедневная КО в Тарусе составила 223 мкг/м^3, в Долгопрудном 219 мкг/м^3 и на территории МГУ 168 мкг/м^3. Далее в Москве и области прошла гроза с дождем, резко упала температура воздуха и КО значительно понизились.

Следующий, анализируемый нами длительный период аномально-высоких концентраций приземного озона произошел в весне-летний период 2007 г. Жаркая погода в Калужской обл. установилась уже в средине мая. Днем температура воздуха поднималась до 25°С, а к концу месяца выше 30°С. На рис. 3 показан одновременный ход среднедневных КО в г. Таруса и г. Долгопрудный, а в таблице приведены дата, продолжительность максимально разовой ПДК (ПДК^t) и максимальные среднечасовые значения КО (max). В мае нами отмечено десять дней с превышениями максимальной разовой ПДК. 21 мая аномально высокие КО держались 9 часов подряд. На рисунке 4 приведён график суточного хода КО с тридцатисекундным интервалом измерения в этот день. В утренние часы рост озона составил 80 мкг/м^3 в час и к 11:00 превысил уровень максимальной разовой ПДК. Суточный максимум наблюдался в интервале 17–18 часов. В июне, июле и августе высокие КО наблюдались также в жаркую и сухую погоду.

В Вятских Полянах измерения озона производились с 31 мая по 28 июня 2007 г. с небольшим перерывом. Из 22 полных дней измерений 17 дней оказались с превышением среднесуточной ПДК. Из них 10 дней с более чем двукратным превышением, а 15 июня эта величина составила 99 мкг/м^3. Среднедневная КО в этот день достигла 126 мкг/м^3, а максимальная среднечасовая 131 мкг/м^3. Среднесуточная температура воздуха в этот день составила 23°С, а максимальная в средине дня 29°С.

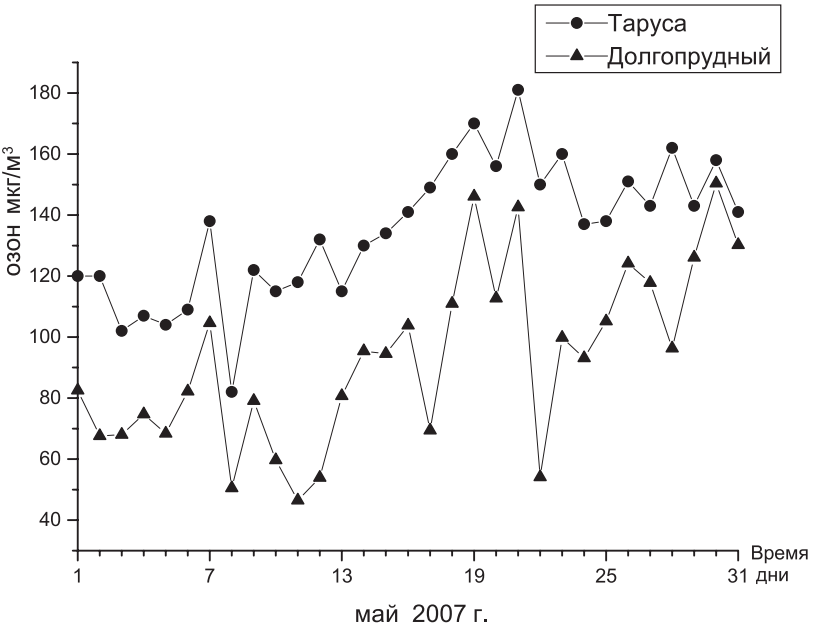


Рис. 3. Одновременный ход среднедневных концентраций приземного озона в атмосфере г. Долгопрудный и г. Таруса в мае 2007 года

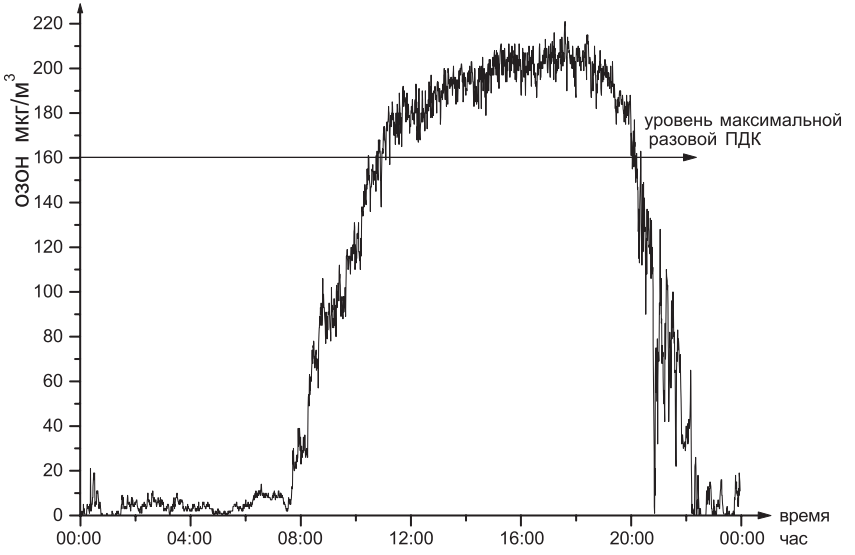


Рис. 4. Суточный ход концентрации приземного озона с тридцатисекундным интервалом измерения в атмосфере г. Таруса 21 мая 2007 года

В деревне Каракульская пристань измерения приземного озона проводились в июле и августе 2007 года с перерывами. В июле было 15 полных дней измерений. Из них 10 дней с превышением среднесуточной ПДК. В августе из 20 дней измерений в 12 дней регистрировались превышения среднесуточного значения ПДК, а 11 и 25 августа среднесуточные ПДК были превышены более чем в два раза. 25 августа максимальная среднечасовая КО составила 125 мкг/м^3. Максимальная температура воздуха в этот день достигла 28,3°С, относительная влажность воздуха в средине дня 45% .

Таблица.

Дата, продолжительность максимально разовой ПДК (ПДК^t) и максимальные (max) среднечасовые значения КО в атмосфере г. Таруса.

Дата	ПДК^t	max (мкг/м^3)	Дата	ПДК^t	max (мкг/м^3)
16.05.07	1 час	161	15.06.07	2 часа	164
17.05.07	2 часа	169	17.06.07	5 часов	173
18.05.07	8 часов	194	23.06.07	1 час	164
19.05.07	8 часов	203	05.07.07	2 часа	185
21.05.07	9 часов	203	11.07.07	2 часа	175
22.05.07	6 часов	183	12.07.07	2 часа	197
23.05.07	4 часа	180	13.07.07	3 часа	182
28.05.07	3 часа	170	24.07.07	2 часа	170
29.05.07	1,5 часа	162	07.08.07	2 часа	175
31.05.07	7 часов	191	20.08.07	3 часа	180
01.06.07	5 часов	240	21.08.07	5 часов	183
03.06.07	1 час	160	22.08.07	3 часа	166

Дискуссия

Как видно из приведённых выше графиков на рис. 2 и описания развития озонового эпизода в 2002 г., среднедневной ход КО в г. Таруса во многом повторяет аналогичный ход в Долгопрудном и на территории МГУ. 29 и 30 июля аномально высокие среднедневные КО в Тарусе и на территории МГУ были практически равны. Статистическая обработка среднедневных КО в Тарусе и Долгопрудном за май 2007 г. также показала их тесную связь. Значимый коэффициент корреляции между указанными рядами составил 0,72.

Показанная выше динамика развития озонового эпизода летом 2002 г. позволяет предположить, что результаты наблюдений на

трёх станциях (МГУ, Долгопрудный, Таруса) можно рассматривать как характеристики одного явления с горизонтальным масштабом озоновых аномалий более 170 км. Предшественники озона (летучие органические соединения и оксиды азота) с воздушными массами могут перемещаться на сотни километров от источника (Семенов и др., 1999) и принимать участие в фотохимических реакциях с образованием озона в мало урбанизированных районах. Воздействию аномально высоких КО летом 2002 г. подверглось население и растительность на значительной территории Московской и Калужской областей. Отсутствие станций мониторинга за приземным озоном не позволяет оценить полный масштаб этого опасного явления.

Нами отмечено, что, как правило, высокие КО в приземной атмосфере возникают в весенне-летний период во время жаркой погоды. Такую закономерность отмечают также другие отечественные исследователи (Беликов и др., 2004). Климатические условия, особенно температурный режим, в южных регионах более благоприятны для фотохимического образования озона, чем в средней полосе России. Возможно, по этой причине, в Крыму были зарегистрированы аномально высокие КО значительно раньше чем в средней полосе.

Повышенные КО, зарегистрированные нами в атмосфере фоновых районов России показывают, что проблема приземного озона в нашей стране уже гораздо большего масштаба чем региональный и может обостриться в связи с потеплением климата и увеличением волн тепла в России.

Мы предполагаем, что одним из механизмов образования отмеченных нами высоких концентраций озона, являются фотохимические реакции с участием оксидов азота и летучих углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беликов И. Б., Егоров В. И., Еланский Н. Ф., Звягинцев А. М., и др. 2004. Положительные аномалии приземного озона в июле-августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 40,. № 1. С. 75-86.

Котельников С. Н., Миляев В. А., Степанов Е. В. 2003. Содержание озона в приземном слое атмосферы курортных районов и крупных городов. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. С.-Пб.: Гидрометеоиздат. Т. XIX. С. 64-71.

Семенов С. М., Кунина И. М., Кухта Б. А. 1999. Тропосферный озон и рост растений в Европе. М.: ИЦ Метеорология и гидрология. 208 С.

Грушко Я. М. 1987. Вредные неорганические соединения в промышленных выбросах в атмосферу. Справочник. Л.: Химия. 104 С.

Тищенко Н .Ф., Тищенко А. Н. 1993. Охрана атмосферного воздуха. Ч. 1. М.: Химия, 193 С.

Hjllbrekke A.G., Solberg S. Ozone measurements 2000. Norwegian Institute for Air Reseach: Kjeller. EMEP/CCC-Report 5/2002.

КОМПЛЕКСНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРЕЙ РОССИИ

***А. Г. Костяной*[1)], *О. Ю. Лаврова*[2)], *М. И. Митягина*[2)]**

[1)]Россия, 117997 Москва, Нахимовский пр. 36, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, kostianoy@online.ru

[2)]Россия, 117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, olavrova@iki.rssi.ru

Реферат. В рамках ряда российских и международных научных и коммерческих проектов объединенный коллектив специалистов в различных областях дистанционного зондирования океанов и морей из космоса ряда научных организаций РАН разработали эффективный комплексный (мультисенсорный и междисциплинарный) подход к оперативному спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения морей России. Впервые такой подход был осуществлен для района юго-восточной Балтики, где в 2004–2005 гг. по контракту с ООО «Лукойл-Калининградморнефть» была фактически создана служба мониторинга нефтяного загрязнения, которая работала в оперативном режиме круглосуточно в течение 18 месяцев. Благодаря этому было обнаружено 274 нефтяных пятна. Впоследствии аналогичный комплексный подход был применен к Азово-Черноморскому бассейну и Каспийскому морю. Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга, представляют собой утечки и сбросы с судов нефтепродуктов вдоль основных судоходных трасс в Балтийском и Черном морях. В Каспийском море наиболее загрязненной акваторией является район Баку – «Нефтяные Камни», где катастрофические разливы нефти вокруг буровых платформ наблюдаются постоянно. Отсутствие системы оперативного спутникового мониторинга приводит к колоссальным затратам, необходимым для ликвидации последствий аварий, аналогичных той, что произошла в ноябре 2007 года в Керченском проливе.

Ключевые слова. Спутниковый мониторинг, нефтяное загрязнение, комплексный подход, радиолокация, экология, моря России.

INTEGRATED SATELLITE MONITORING OF OIL POLLUTION IN THE RUSSIAN SEAS

A. G. Kostianoy[1], *O. Yu. Lavrova*[2], *M. I. Mityagina*[2]

[1] P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovsky Pr., 117997 Moscow, Russia, kostianoy@online.ru

[2] Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, 84/32, Profsoyuznaya Str., 117997 Moscow, Russia, olavrova@iki.rssi.ru

Abstract. In the framework of a set of Russian national and international scientific and commercial projects a team of specialists in different fields of remote sensing of the ocean from space, working in several institutes of the Russian Academy of Sciences, has elaborated an effective complex multisensor and multidisciplinary approach to satellite monitoring of oil pollution of the Russian seas in operational regime. For the first time such a complex approach was realized for the southeastern Baltic Sea in 2004-2005 by a contract with «Lukoil-Kaliningradmorneft» oil company. In fact, we built up an oil pollution monitoring service which worked in operational regime 24 hours a day during 18 months. As a result 274 oil spills have been detected. Later, this methodology was applied to the Black, Azov and Caspian seas. Most of the sea surface anthropogenic pollution, revealed by satellite monitoring, occurs as a result of leakages and releases of oil products from ships along the main ship routes in the Baltic and Black seas. In the Caspian Sea the most polluted area is a region between Baku and «Neftyanye Kamni» where very large oil spills are observed almost daily around oil rigs. Absence of a permanent satellite operational monitoring system leads to great expenses required to accident elimination, that was a case in November 2007 in the Kerch Strait.

Keywords. Satellite monitoring, oil pollution, complex approach, radiolocation, ecology, Russian seas.

Введение

Каждый год корабли и промышленность причиняют ущерб уязвимой экосистеме прибрежных зон во многих частях Мирового океана путем загрязнения прибрежных вод и рек нефтепродуктами. Загрязнение происходит как в результате аварий танкеров, нелегального сброса нефтепродуктов с кораблей, добычи нефти в море, так и из-за естественных сипажей нефти со дна моря.

В последние годы в морях России был построен ряд новых нефтяных терминалов, что сопровождается ростом транспортировки нефти судами и, соответственно, риском аварий и загрязнений обширных

акваторий нефтепродуктами. По статистике, в Мировом океане судоходство является причиной 45% нефтяного загрязнения океана, в то время как добыча нефти на шельфе – только 2%. Например, в Балтийском море ежедневно находится около 2000 больших кораблей и танкеров, поэтому судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону Балтийского моря. Сброс нефти и нефтепродуктов с судов представляет собой значительную угрозу для морских экосистем. Такие сбросы и утечки могут возникать при штатной эксплуатации судов различных типов, во время аварий или быть умышленными. В отчете «Другая сторона нефтяных сликов» международной организации OCEANA говорится, что, так называемое, «хроническое загрязнение» морских вод за счет промывки танков и машинных отделений, слива льяльных вод и различного рода утечек нефтепродуктов в три раза превышает объем загрязнений в результате аварий танкеров (Oceana, 2003, 2004).

В Балтийском море объем нефтяного загрязнения оценивается в 2–5 тыс. т в год (Oceana, 2003, 2004). По оценке Финского института окружающей среды (Finnish Environment Institute, 2004), общее ежегодное количество нефтяных пятен в Балтийском море, возникших в результате эксплуатации судов, составляет около десяти тысяч (или около 10 тыс. т нефтепродуктов). По сравнению с этими цифрами официальные данные ХЕЛКОМ (HELCOM, 2002) о ежегодном количестве обнаруженных и подтвержденных нефтяных пятен – 350–750 пятен за 1989–2002 гг. – кажутся явно заниженными (рис.1).

В Северном море объем нелегельного сброса нефтепродуктов оценивается в 15–60 тыс. т в год, к которым следует добавить еще 10–20 тыс. т разрешенного сброса. Нефтяные и газовые платформы в Северном море (за счет интенсивного сброса буровых растворов, сипажей и утечек) ответственны за 75% всего нефтяного загрязнения моря (UNESCO, 2003).

В Средиземном море нефтяное загрязнение оценивается в 400–1 000 тыс. т в год. Считается, что 50% загрязнения происходит в результате «рутинного судоходства» (хронического загрязнения), другая половина – за счет наземных источников через сток рек (UNESCO, 2003). По другим данным, в Средиземном море ежегодно обнаруживается в среднем около 1700 нефтяных пятен (в 1999–2002 гг.) (OCEANIDES Project, 2003–2005).

В Чёрное море в 80-х гг. прошлого века поступало в среднем 80 тыс. т нефтепродуктов в год (примерно 65 % из них со стоком рек); при этом 1,5-2,0 тыс. т суммарного количества нефтяных углеводородов поступало со сточными водами промышленных предприятий побережья. По данным проекта OCEANIDES в Черном море обнаруживается 200-250 нефтяных пятен ежегодно (в 2000-2002 гг.) (рис.2,

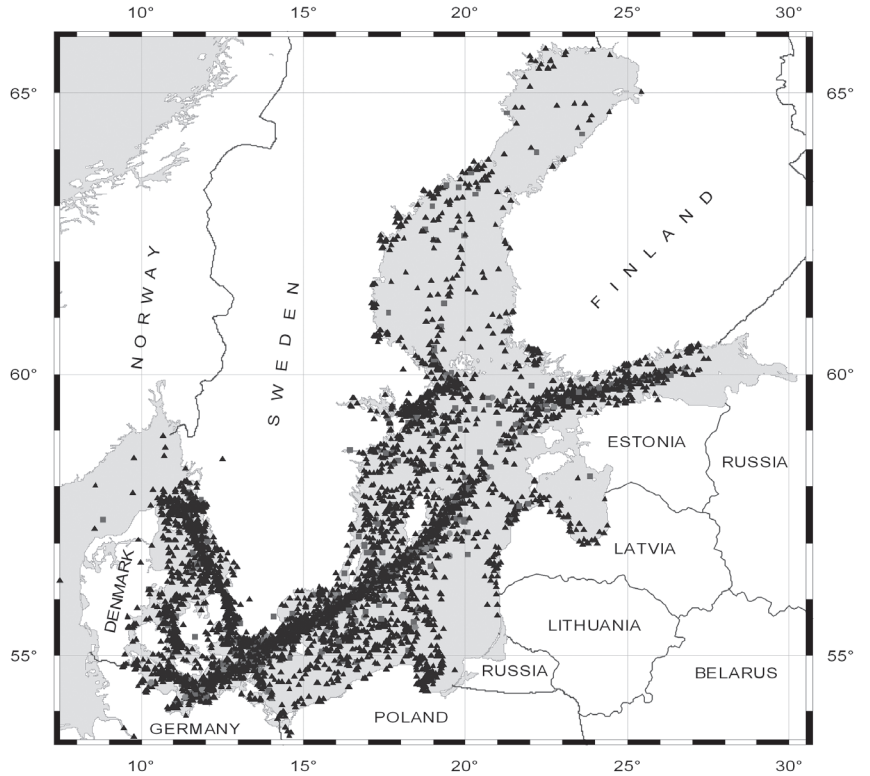


Рис.1. Карта нефтяных пятен, обнаруженных в Балтийском море в 1989 – 2002 гг. (HELCOM, 2002)

OCEANIDES Project, 2003-2005). Аналогичной статистики по Каспийскому морю пока нет.

Одной из основных задач экологического мониторинга как европейских морей, так и морей России является оперативное обнаружение нефтяных загрязнений на поверхности моря воздушными или спутниковыми средствами, определение характеристик нефтяных пятен, установление источников загрязнения и прогноз вероятных траекторий дрейфа пятен. Регулярный мониторинг нефтяных загрязнений в Средиземном, Северном и Балтийском морях обычно ведется с помощью специально оборудованных самолетов, кораблей и спутников. Следует отметить, что такой оперативный мониторинг в Баренцевом, Черном, Азовском и Каспийском морях не проводится. Морские и авиационные средства наблюдений малочисленны и достаточно дорогостоящи, кроме того, они обычно ограничены световым днем и требуют хороших погодных условий. Вследствие больших

размеров акваторий, над которыми должен осуществляться постоянный мониторинг, данная задача может быть решена только на основе спутниковых систем дистанционного зондирования. Радиолокационные спутниковые изображения (РЛИ) водной поверхности могут существенно помочь в обнаружении нефтяных пятен на большой акватории и нацелить воздушные или морские средства на конкретные районы для детальных исследований.

Нефтяные пленки подавляют короткие гравитационно-капиллярные волны и локально видоизменяют шероховатость морской поверхности. Различия в обратно рассеянном сигнале от поверхностей покрытых пленкой и чистых акваторий позволяют радиолокатору определять нефтяные пятна. Радары с синтезированной апертурой имеют преимущества перед оптическими приборами, установленными на самолетах, поскольку дают данные по большой акватории, вне зависимости от облачности и освещенности (день/ночь). Этот тип приборов в настоящее время находится на спутниках ENVISAT и ERS-2 Европейского космического агентства и RADARSAT Канадского космического агентства. Спутник ENVISAT был запущен Европейским космическим агентством в марте 2002 г. Оперативные системы, которые включают 10 приборов, разрабатывались для мониторинга

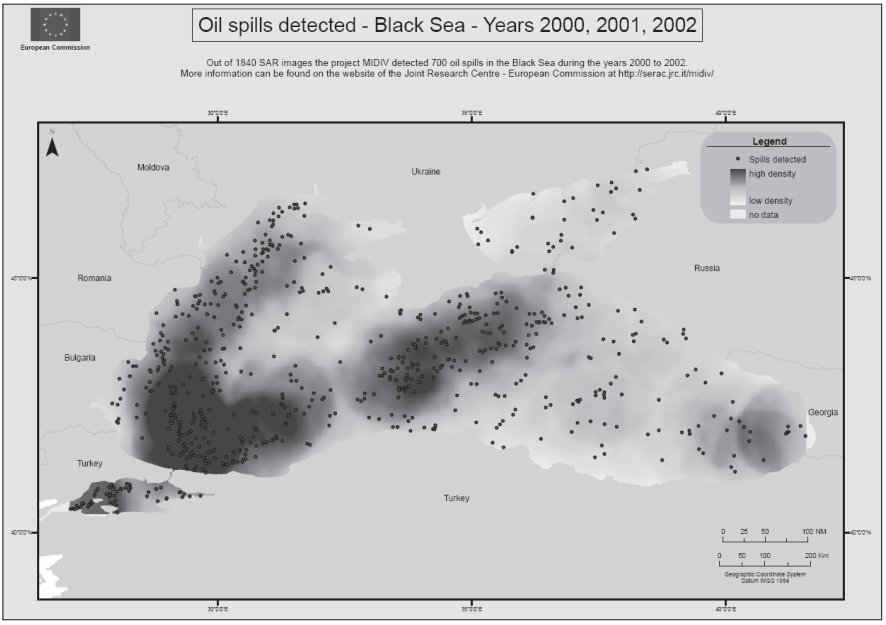


Рис.2. Карта нефтяных пятен, обнаруженных в Черном море в 2000–2002 гг. (OCEANIDES Project, 2003–2005)

океанов, льда, суши и атмосферы. ENVISAT имеет 35-ти суточный цикл повторяемости пролетов по своим трассам, но благодаря широкой полосе захвата многих его приборов, он имеет возможность наблюдать любую точку на поверхности Земли с периодичностью от нескольких часов до нескольких суток. Радиолокатор ASAR (Advanced Synthetic-Aperture Radar) используется для мониторинга нефтяных пятен и льда на поверхности моря, измерений различных океанских явлений (течений, фронтов, вихрей, внутренних волн), определения местоположения судов, поиска нефтегазовых месторождений и других целей. Пользователями этой спутниковой информации являются береговая охрана, национальные агентства по охране окружающей среды, нефтяные, судоходные, рыболовные и страховые компании, а также другие организации.

В начале 90-х годов регулярный авиационный контроль нефтяных загрязнений ряда морей России практически полностью прекратился. Так, например, с 1993 года в российском секторе юго-восточной Балтики и в Финском заливе не выполнялись регулярные авиационные наблюдения нефтяных пятен. В июне 2003 г. ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» инициировало пилотный проект, направленный на организацию комплексного мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики в связи с предстоящим началом (в марте 2004 г.) добычи нефти на месторождении «Кравцовское» (Д-6), расположенном на континентальном шельфе Российской Федерации (рис. 3). В июне 2004 года нами был организован оперативный спутниковый мониторинг юго-восточной Балтики в качестве важной компоненты контроля экологического состояния окружающей среды. Он был основан на ежедневном приеме и анализе разнообразной спутниковой информации (AVHRR NOAA, MODIS-Terra/Aqua, TOPEX/Poseidon, Jason-1, QuikSCAT, ENVISAT ASAR и RADARSAT SAR) о температуре поверхности моря (ТПМ), уровне моря, концентрации хлорофилла, мезомасштабной динамике вод, ветре и волнах, а также о нефтяном загрязнении поверхности моря (Kostianoy et al., 2004a, b, 2005a, b, c, 2006; Lavrova et al., 2006a, b, 2007, 2008; Костяной и др., 2006, 2008). Кроме того, интерактивная численная модель Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI) использовалась для прогноза дрейфа (1) всех больших нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных изображениях (РЛИ) юго-восточной части Балтийского моря, и (2) виртуальных (модельных) нефтяных пятен с платформы Д-6 (Kostianoy et al., 2006).

В Российской Федерации такая комплексная система спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морской акватории впервые была разработана нами и успешно внедрена в компании ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» в 2004 г. Поскольку мониторинг осуществлялся 24 часа в сутки, 7 дней в неделю круглогодично, то

можно считать, что нами была создана служба комплексного мониторинга экологического состояния Балтийского моря, работающая в оперативном режиме. Полных аналогов такой системы не только в России, но в мировой практике нет, а существующие комплексы не обладают широким комплексным подходом к решению поставленных задач и поэтому имеют ряд известных недостатков. Полные или даже превосходящие по объему работ аналоги возникают только в случаях крупных аварийных разливов нефти, например, с танкером «Престиж» в ноябре 2002 г. у берегов Испании (25 тыс. т нефтеродуктов), когда в работу включаются десятки национальных и международных организаций. Основные результаты мониторинга представлены в данной работе.

Рис.3. Нефтедобывающая платформа Д-6 в юго-восточной части Балтийского моря.

Методы и материалы

Целью вышеупомянутого проекта являлись организация и проведение постоянно действующего комплексного спутникового мониторинга юго-восточной части Балтийского моря для выявления случаев загрязнения морской акватории нефтепродуктами, определения районов загрязнения, возможных источников происхождения и путей вероятного переноса загрязнений. Основными задачами мониторинга являлись:

1. Обнаружение нефтяных пятен вблизи платформы Д-6 и российских берегов, а также на акватории всей юго-восточной части Балтийского моря.
2. Идентификация вероятных источников загрязнения.
3. Прогноз направления и скорости дрейфа обнаруженных нефтяных пятен.
4. Систематизация и архивация комплексной информации об экологическом состоянии вод и гидрометеорологических условиях.

Для выполнения задач мониторинга необходимо было выявлять как пятна, образовавшиеся в российской акватории, так и те, которые были занесены извне в результате трансграничного переноса течениями. Исходя из этого, мониторингу был подвергнут район месторождения и обширная прилегающая акватория юго-восточной Балтики.

Регулярный и оперативный мониторинг нефтяного загрязнения поверхности моря основывался на обработке и анализе радиолокационных изображений ASAR со всех пролетов спутника ENVISAT над акваторией юго-восточной части Балтийского моря (периодичность пролетов составляет 12–72 часа, размер снимка – 400 х 400 км, пространственное разрешение – 75 м/пиксел) и SAR RADARSAT (выборочно, в тех случаях, когда между снимками ENVISAT интервал достигал 72 часов, 300×300 км, 25 м/пиксел). Цифровые изображения получались в оперативном режиме, т.е. через 1-2 часа после пролета спутника над акваторией Балтики, из Конгсбергских спутниковых служб (станция KSAT, Тромсе, Норвегия) в соответствии с заключенным контрактом.

Для корректной интерпретации радиолокационных изображений, распознавания образов, отличия сликов естественного происхождения от нефтяного, и оценки скорости и направления дрейфа нефтяных пятен ежедневно собиралась и анализировалась обширная гидрометеорологическая информация из различных источников в Швеции, Германии, Польше, Финляндии, Эстонии, Латвии, Литве и России. Кроме того, использовались данные скаттерометра QuikSCAT и альтиметра JASON-1 для получения информации о скорости приводного ветра и высоте ветровых волн непосредственно на акватории моря.

Также для интерпретации радиолокационных изображений и прогноза дрейфа нефтяных пятен был организован прием, обработка и анализ всех информативных (безоблачных) инфра-красных (ИК) и оптических изображений со всех пролетов спутников серии NOAA, а также Terra и Aqua (MODIS). Пространственное разрешение этой информации составляет 250 м – 1 км. Спутниковая приемная станция Морского гидрофизического института в Севастополе использовалась для оперативного приема данных с AVHRR NOAA 24 часа в сутки, 7 дней в неделю. Эти данные обрабатывались, и на их основе строились карты температуры поверхности моря (ТПМ), оптических характеристик поверхности моря и поверхностных течений. Карты

ТПМ, взвеси, концентрации хлорофилла и цветения вод (высокая концентрация сине-зеленых водорослей в поверхностном слое в летний период) позволяют выявить особенности мезо- и мелкомасштабной структуры и динамики вод Балтики, такие как: течения, вихри, диполи и мультиполи, струи, филаменты, речные плюмы и вытоки из Вислинского и Куршского заливов. Последовательность ежедневных ИК и оптических изображений MODIS позволяет реконструировать реальные поля поверхностных течений (направление и скорость) с разрешением 0,25–1 км, что чрезвычайно важно для прогноза направления и скорости дрейфа нефтяных пятен. Комбинация радиолокационных изображений ASAR ENVISAT и изображений MODIS позволяет понимать, почему пятна имеют ту или иную форму, а также прогнозировать их перенос мезомасштабными течениями.

Кроме того, на основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI) рассчитывается прогноз дрейфа: (1) всех крупных нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках ASAR ENVISAT в юго-восточной Балтике, и (2) виртуальных (модельных) пятен с платформы Д-6. Этот ежедневный прогноз позволяет планировать и корректировать действия по ликвидации нефтяного загрязнения в результате потенциально возможной аварии на Д-6 и делать оценки экологических рисков, связанных с загрязнением нефтью акватории моря и побережья Куршской косы. Модель Seatrack Web – это уникальная европейская модель, позволяющая рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф (и трансформацию) пятен различных нефтепродуктов на 5 суток вперед с пространственным разрешением 1 миля, с учетом обновляющегося прогноза поля ветра (и ряда других метеорологических параметров) и течений каждые 3 часа (европейские оперативные модели ECMWF, HIRLAM и HIROMB). Модель рассчитывает на каждый шаг по времени состояние пятна (координаты, размеры, скорость и направление дрейфа, содержание нефтепродуктов и др.). Она также позволяет восстанавливать историю дрейфа пятен до 30 суток назад. Эта модель сегодня активно используется в Швеции, Дании, Финляндии, Польше, Эстонии, Латвии, Литве и России (Kostianoy et al., 2008).

Таким образом, задача прогноза скорости и направления вероятного переноса пятен решалась комплексно с учетом анализа: (1) состояния поверхности моря по спутниковым РЛИ; (2) ежедневных спутниковых изображений поверхности моря в инфракрасном и оптическом диапазонах спектра; (3) спутниковой информации о скорости приводного ветра; (4) метеорологической информации; (5) результатов численного моделирования на основе оперативной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии. Эта модель также использовалась для прогноза дрейфа виртуальных (модельных) пятен с платформы Д-6.

Преимущества методов

Для радиолокационных изображений ASAR: (1) уникальный метод идентификации пятен нефтепродуктов (уникальность обусловлена тем, что из всех известных в настоящее время датчиков только РСА обладает абсолютной чувствительностью к шероховатости морской поверхности в сантиметровом диапазоне спектра волн, который в наибольшей степени подавляется нефтяными плёнками); (2) не зависит от облачности и освещенности (день/ночь); (3) размер кадра 400 х 400 км; (4) пространственное разрешение 75 м/пиксел для спутника ENVISAT и 25 м/пиксел для RADARSAT (позволяет обнаруживать не только пятна, но и суда); (5) повторяемость съемки – от 12 до 72 часов.

Для данных ИК и оптического диапазона: (1) стандартный метод идентификации течений, вихрей, струй и других мезомасштабных динамических структур; (2) полоса обзора спутника (ширина кадра) 3000 км; (3) пространственное разрешение 0,25–1,1 км; (4) повторяемость съемки 3–6 часов.

Для альтиметрических данных (уровень, скорость ветра, высота волн): (1) измерение аномалий уровня моря, скорости ветра и высоты ветровых волн непосредственно на акватории моря; (2) не зависит от облачности и освещенности (день/ночь); (3) глобальное покрытие земного шара; (4) пространственное разрешение 5 км.

Модель Seatrack: (1) уникальная европейская модель Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI), позволяющая рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф (и трансформацию) пятен различных нефтепродуктов на 5 суток вперед с учетом обновляющегося прогноза поля ветра и течений каждые 3 часа; (2) позволяет восстанавливать историю дрейфа пятен до 30 суток назад; (3) позволяет рассчитывать дрейф предметов на поверхности моря: лодки, шлюпки, яхты, человек в воде, человек в спасательном жилете, буи и пр.; (4) позволяет рассчитывать случаи как разового сброса, так и продолжительной утечки, при этом задаются и объем сброса, и время утечки; (5) позволяет различные способы визуализации дрейфа пятен (окончательное положение пятна, траектория дрейфа – линия, траектория дрейфа и размыва пятна – «факел»); (6) позволяет рассчитывать на каждые 3 часа состояние пятна (координаты, размеры, скорость и направление дрейфа, объем смеси с водой, процент испарившейся, диспергированной и осадившейся нефти, воды); (7) не зависит от погодных условий; (8) разрешение (шаг) по времени 3 часа, (9) пространственное разрешение – 1 морская миля.

Ограничения методов

Для радиолокационных изображений ASAR: (1) ветер в диапазоне 2-10 м/с (согласно статистике, ветер в районе платформы Д-6 нахо-

дился в указанном диапазоне в среднем в 80% случаев); (2) временной интервал при съемке в режиме широкого захвата может достигать 3-х суток; (3) в ряде случаев сигнатуры нефтяных пятен мало отличаются от зон пониженного радиолокационного сигнала, вызванных другими причинами – естественными плёнками, локальным ослаблением ветра, внутренними волнами, апвеллингом.

Для данных ИК и оптического диапазона: (1) наличие сплошной облачности над исследуемым районом; (2) необходимость присутствия трассера (градиентов температуры и/или оптических свойств); (3) для оптического диапазона – наличие дневного света.

Для альтиметрических данных (уровень, скорость ветра, высота волн): (1) зондирование вдоль треков; (2) периодичность зондирования 10 суток; (3) нет направления ветра и волн.

Модель Seatrack: (1) не всегда полностью воспроизводит особенности мезомасштабной и мелкомасштабной динамики вод.

Комплексный подход в использовании различных методик и данных позволяет минимизировать естественные ограничения, имеющиеся у каждого подхода, метода и типа используемых данных.

Результаты

Балтийское море

Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга юго-восточной акватории Балтийского моря, представляют собой утечки и сбросы с судов нефтепродуктов и содержащих их жидкостей. Катастрофические разливы нефтепродуктов, прежде всего, при авариях танкеров, происходят довольно редко, и, как правило, не остаются без внимания прессы и общественности. Гораздо чаще загрязнение поверхности моря происходит при рутинных операциях на судах. В открытом море причинами сбросов являются эксплуатационные сливы, утечки, повреждения судового оборудования, аварии и др. В ожидании загрузки в порту танкеры зачастую промывают свои танки. Таким образом, основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов. Как выяснилось, подобные незаконные сбросы настолько распространены, что в совокупности наносят гораздо больший ущерб экосистеме Балтийского моря, чем отдельные катастрофические разливы нефти.

Как отмечалось выше, успешное обнаружение нефтяных загрязнений средствами спутниковой радиолокации в некоторой степени обусловлено погодными условиями. Этим объясняется тот факт, что, по радиолокационным данным, наибольшее число загрязнений при-

ходится на период с мая по сентябрь, когда скорость ветра и волнение преимущественно умеренные или слабые. С октября по апрель нередко наблюдаются ветра скоростью более 12 м/с и шторма – условия, при которых пленки нефтяных загрязнений быстро разрушаются и тонут, и заметного выглаживания морской поверхности не происходит.

Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить нефтяное пятно на РЛИ, является его геометрическая форма. С этой точки зрения, сбросы с кораблей можно условно разделить на два класса – сбросы с судов во время их движения и сбросы с неподвижных судов. В обоих случаях на РЛИ пятна выглядят «инородными телами» на фоне общей структуры изображения.

При сбросе с судна в движении пятно нефтепродуктов, в отсутствие сильного ветра и волнения, проявляется на РЛИ в виде узкой полосы понижения сигнала, повторяющей маршрут движения корабля. Чаще всего, это узкая прямая полоса или полоса с изломом. Если сброс происходил во время радиолокационной съемки или непосредственно перед ней, то полоса сужается в сторону более свежей её части, и, как правило, удается идентифицировать и судно-виновника сброса. Суда могут сбрасывать нефтепродукты на протяжении нескольких десятков километров своего пути.

На рис. 4 приведен пример «идеальных» свежих сбросов с судов. Данные получены в условиях умеренного ветра и небольшого волнения. Сужение полосы к северу свидетельствует о том, что судно, сбрасывающее нефтепродукты, движется в этом направлении. Яркая белая точка на северном конце полосы показывает текущее положение судна. Полоса загрязнений тянется на 31 км, а ее площадь составляет 9,6 км^2.

Нередко суда производят многократные сбросы загрязненных вод в движении. На рис. 5 и 6 представлены три таких примера. На первом рисунке на широте г. Клайпеда выделяется четкий прерывистый след протяженностью около 34 км (площадь 8,6 км^2). Заканчивается он яркой точкой, отмечающей положение движущегося судна. Разлив происходит в момент радиолокационной съемки, растекание пленки еще в самом начале – полоса сужена по направлению к судну и контраст её с окружающей поверхностью невысок. Гораздо большим контрастом с окружающим фоном и степенью растекания пленки отличается прерывистая полоса протяженностью 22 км, расположенная к западу от м. Таран (рис.5). Этот разлив произошел несколькими часами раньше, и судно-виновника выявить невозможно. На рис. 6 от южной оконечности о. Готланд почти на 80 км тянется прерывистый след за судном (яркая точка), движущимся на северо-восток. Очевидно, сброс осуществлялся в несколько этапов, общая площадь загрязнений на момент радиолокационной съемки составляет порядка 67,5 км^2.

Усложнение гидрометеорологических условий – усиление или ослабление приводного ветра (штиль, ветровая тень), развитие волнения, появление льда, цветение водорослей, выпадение интенсивных осадков, прохождение резких атмосферных и ветровых фронтов, появление внутренних волн в океане и атмосфере – все это затрудняет распознавание нефтяных пленок. В некоторых случаях осложняющим фактором является неустойчивая стратификация пограничного слоя море-атмосфера, дающая неровный, ячеистый фон на радиолокационном изображении. При сбросе с неподвижного судна, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Однако наличие ветра и волнения может оказать существенное влияние на структуру пятна. В некоторых случаях пятно может вытянуться в линию так, как будто сброс произошел с движущегося судна.

Ветер существенно влияет на внутреннюю структуру нефтяного разлива, как напрямую, так и опосредовано. Под непосредственным воздействием ветра пленка нефти перемещается, а нефть аккумули-

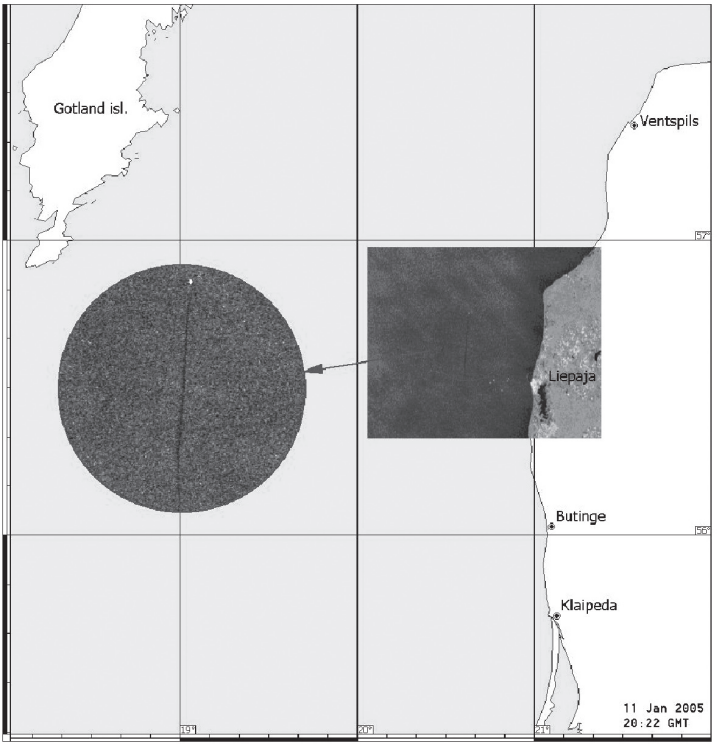


Рис.4. Сброс нефтепродуктов с судна 11 января 2005 г.

Рис.5. Сброс нефтепродуктов с трех судов 25 августа 2005 г.

руется на подветренной стороне пятна. Кроме того, приповерхностный ветер возбуждает динамические процесса в верхнем слое воды. Наиболее распространенный из таких процессов – циркуляция Ленгмюра, представляющая собой вытянутые по ветру вихри перемежающихся направлений. Движение воды в вихрях происходит в плоскости, перпендикулярной направлению скорости ветра. Тем самым на поверхности моря возникают перемежающиеся зоны дивергенции и конвергенции. В последних и концентрируется нефть. Пятно приобретает характерный вид «гребенки».

Как уже упоминалось ранее, выявление нефтяных загрязнений часто затруднено из-за наличия так называемых «подобий нефтяных пятен» – явлений и процессов, радиолокационные образы которых сходны с проявлениями нефтяных пятен. Чаще всего возникает необходимость различать сбросы нефтепродуктов и полосы и пятна понижения сигнала, связанные с наличием пленок поверхностно-актив-

ных веществ биогенного происхождения и цветением водорослей.

Анализ фактической эволюции пятен нефтяных загрязнений в случаях, когда данные позволяют это сделать, имеет большое значение с точки зрения совершенствования моделей, используемых для расчета дрейфа и трансформации пятен нефтяных загрязнений.

Всего на 230 радиолокационных изображениях ASAR ENVISAT и 17 изображениях SAR RADARSAT, полученных с июня 2004 г. по ноябрь 2005 г., было обнаружено 274 нефтяных пятна (рис.7). Не обнаружено ни одного пятна, исходящего от платформы Д-6, что подтверждает эффективность экологической и промышленной безопасности на платформе. Основными источниками нефтяных загрязнений являются морские суда. Для вспомогательных целей было получено, обработано и проанализировано около 1600 инфракрасных и оптических изображений AVHRR (NOAA) и MODIS (Terra и Aqua), построено около 240 карт поля приводного ветра по данным скаттерометра (QuikSCAT) и 73 карты высоты ветровых волн по данным альтиметра со спутника JASON-1. На основе численной модели Шведского института метеорологии и гидрологии выполнено около 550

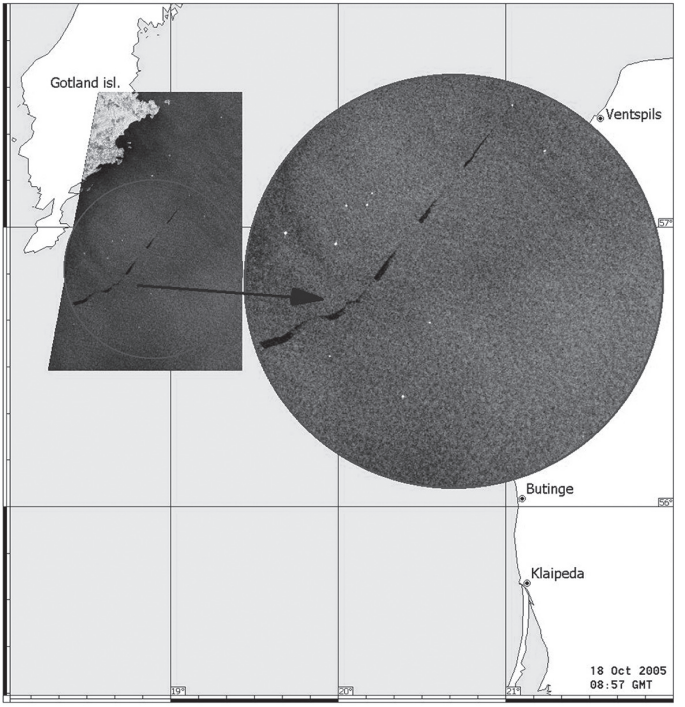


Рис.6. Сброс нефтепродуктов с судна 18 октября 2005 г.

оперативных прогнозов дрейфа реальных и виртуальных (с платформы) нефтяных пятен (рис. 8). Результаты, полученные в 2004-2005 гг., показали эффективность комплексного спутникового мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики (Kostianoy et al., 2004a, b, 2005a, b, c, 2006; Lavrova et al., 2006a, b, 2007, 2008; Костяной и др., 2006, 2008; Литовченко, Костяной, 2007).

Рис. 7. Карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате анализа РЛИ ASAR ENVISAT и SAR RADARSAT с июня 2004 г. по ноябрь 2005 г.

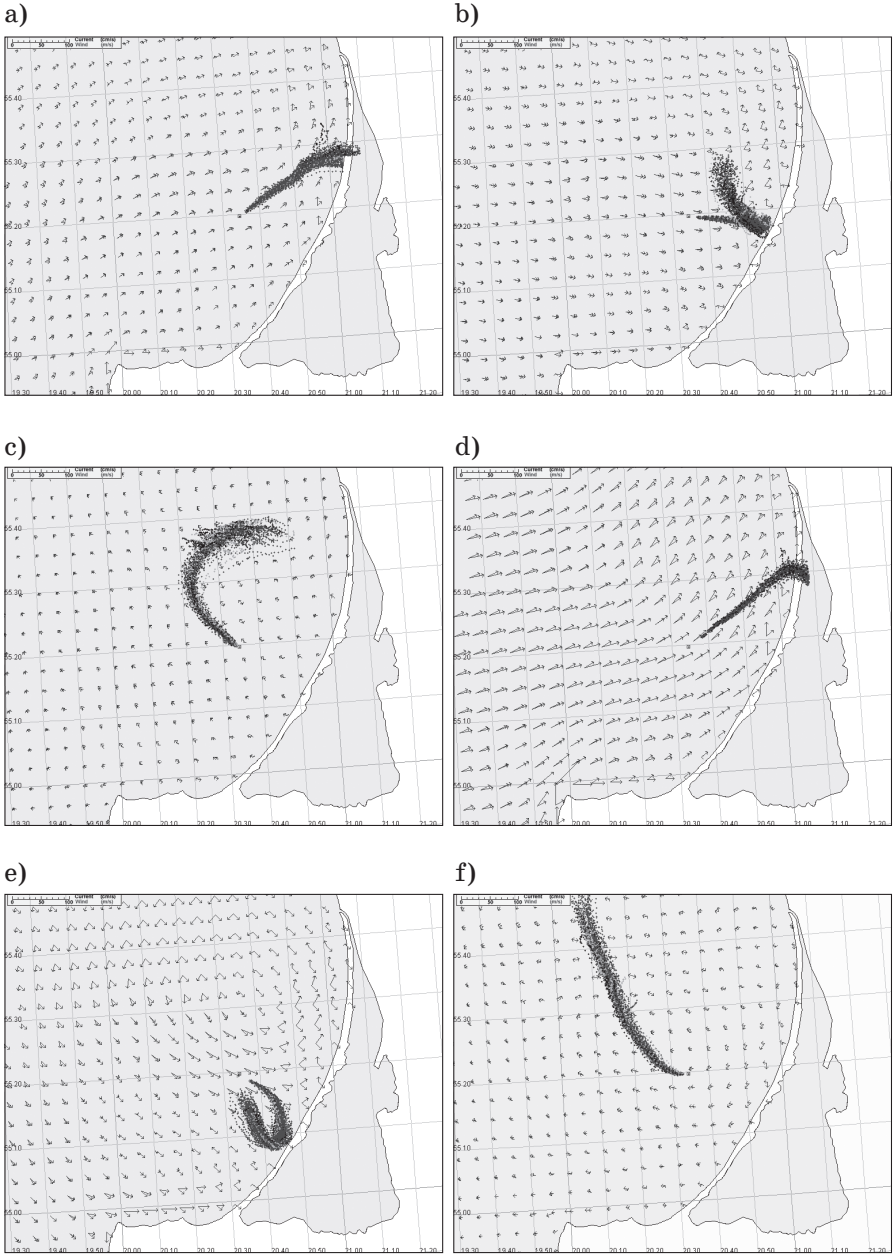


Рис.8.(a–f) Прогноз дрейфа виртуального (модельного) пятна с платформы Д-6 за 23–28 октября 2005 г.

g) h)

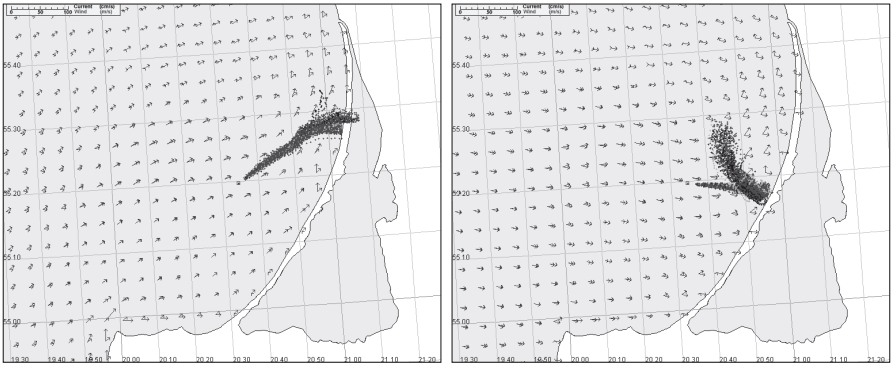


Рис.8.(g–h) Прогноз дрейфа виртуального (модельного) пятна с платформы Д-6 за 29–30 октября 2005 г.

Черное и Азовское море

Начиная с 1999 года, Институт космических исследований РАН проводит регулярный мониторинг прибрежной зоны Черного моря в районе Новороссийск – Геленджик (Булатов и др., 2003; Mityagina et al., 2004; Лаврова и др., 2005; Lavrova, Bocharova, 2006; Lavrova et al., 2006a, b, 2007, 2008; Литовченко и др., 2006; Бедрицкий и др., 2007; Gade et al., 2007). Данный мониторинг базируется в первую очередь на изображениях, получаемых с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на спутниках ERS-2 и Envisat. Подспутниковые наблюдения, которые проводятся в летне-осенний период на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, включают в себя оптическую съемку с высокого берега и измерения всех необходимых гидрометеорологических параметров (Лаврова и др., 2005). В августе-сентябре 2004 года подспутниковые наблюдения были дополнены оптическими наблюдениями с вертолета, осуществлявшиеся ГУ «Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей» (г. Сочи) (Литовченко и др., 2006).

В соответствии с поручением Правительства Российской Федерации от 10.02.2003 г. № МК-П9-01617 в 2003 – 2007 гг. Росгидромет совместно с Институтом космических исследований РАН проводит работы по спутниковому мониторингу загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды российского сектора Азово-Черноморского бассейна (Бедрицкий и др., 2007; Кровотынцев и др., 2007). Актуальность выполнения этих работ обусловлена рядом факторов. Черное и Азовское моря имеют слабый водообмен с Мировым океа-

ном, поэтому загрязнения, попадающие в эти моря, практически в них и остаются. В тоже время большую опасность для загрязнения моря представляют объекты интенсивно развивающегося нефтегазового комплекса. На Черноморском побережье России расположено несколько крупных нефтяных терминалов (г. Новороссийск, г. Туапсе и м. Железный Рог), осуществляющих загрузку крупнотоннажных танкеров. Только через порт Новороссийск ежегодно переправляется 32 млн. т нефти, а в ближайшие 10 лет объем перекачки с учетом увеличения экспорта каспийских месторождений и строительством нефтепровода Бургас–Александропулос может увеличиться втрое.

Кроме того, ввод в эксплуатацию в 2002 г. газопровода Россия–Турция «Голубой поток», проектирование строительства газопроводов по дну Черного моря «Голубой поток-2» в Турцию, «Южный поток» в Болгарию, вдоль российского побережья – Джубга–Адлер, а также нефтепровода из Грузии в Украину, делают задачу мониторинга морской акватории Черного моря крайне необходимой.

К основным источникам антропогенного загрязнения моря этого района также относятся речной сток (на российском побережье Азово-Черноморского бассейна впадает 45 малых рек), сточные воды и утечки минеральных и органических веществ из населенных пунктов и промышленных предприятий, а также сбросы с судов (Фащук, Шапоренко, 1995; Kostianoy, Kosarev, 2008). Повторяемость (в процентах от общего количества съемок района) обнаружения нефтяных пятен интенсивностью более 250 мг/м^2 в отдельных районах Чёрного моря по данным авиасъёмок в 1981–1990 гг. составила: прибрежные воды Крыма – 37 %; Керченский пролив – 11 %, прибрежные воды Российской Федерации – 17 %, прибрежные воды Грузии – 91 % (Синицына и др., 1997). Среди природных факторов наиболее значимыми являются биогенные загрязнения, связанные с цветением фитопланктона.

Побережье Азово-Черноморского бассейна является курортной зоной России, где ежегодно отдыхает 10–15 млн человек. Здесь расположены курорты Анапы, Геленджика, Большого Сочи и др. В Сочи проводятся важные международные политические, экономические и культурные форумы, а в 2014 г. город станет столицей XXII зимних Олимпийских игр. Перечисленные обстоятельства накладывают повышенные требования к экологической чистоте этого региона и, прежде всего, к чистоте прибрежных вод. В связи с этим спутниковый мониторинг загрязнения водной среды, в том числе, нефтепродуктами, должен проводиться регулярно, комплексно и в оперативном режиме. Как показали события ноября 2007 года, когда в результате шторма в Керченском проливе затонуло несколько судов, и огромная акватория и береговая линия были загрязнены нефтепродуктами, отсутствие такой системы приводит к колоссальным затратам, необходимым для ликвидации последствий таких аварий.

В рамках выполнения этих работ была создана технология спутникового мониторинга состояния и загрязнения водной среды по данным видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов. Технология разрабатывалась на основе модернизации базового программного комплекса обработки спутниковых данных ГУ «НИЦ «Планета» (Асмус и др., 2005). В технологии воплощено сочетание автоматизированных и интерактивных процессов. В автоматизированном режиме осуществляется предварительная обработка спутниковых изображений (географическая привязка, трансформирование космических изображений в картографические основы, формирование многозональных изображений из различных комбинаций спектральных каналов) и тематическая обработка (распознавание и классификация водных объектов, картографирование температуры морской поверхности, скорости и направления приводного ветра, концентрации хлорофилла-а, пространственного перемещения водных масс и др.). В интерактивном режиме на основе совместного анализа космических снимков, результатов их автоматизированного распознавания и наземных данных осуществляется дешифрирование динамических структур (примерного положения Основного черноморского течения; положения и размеров прибрежных антициклонических вихрей, циклонических вихрей, вихревых диполей и др.) и параметров загрязнения (границ распространения взмученных вод речного стока, пленок нефтяных загрязнений, пленок поверхностно-активных веществ биогенного происхождения и др.).

За период наблюдений с 2003 по 2007 год было принято и обработано более 5500 спутниковых изображений видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов (ИСЗ серий EOS (TERRA, AQUA), NOAA, ERS, Envisat, IRS, QuikSCAT, JASON, TOPEX/Poseidon, METEOSAT, МЕТЕОР и МОНИТОР). Регулярно с использованием разработанной технологии выпускается 14 видов спутниковой информационной продукции, включая карты загрязнения моря нефтепродуктами, циркуляции вод, распределения фитопланктона и водорослей, концентрации хлорофилла-а, распределения коэффициента диффузного ослабления, температуры морской поверхности, приводного ветра, изменений уровня моря, результатов автоматизированного распознавания водных объектов и др., а также обобщенную карту-схему состояния водной среды.

Одновременно со спутниковой информацией производится систематизация и анализ данных наземных измерений на метеорологических станциях Сочи, Туапсе, Новороссийск, Керчь, Приморско-Ахтарск и Ростов-на-Дону, а также на гидрологических постах, расположенных в устьях рек Дон, Кубань и Сочи. Эти данные используются для комплексного анализа гидрометеорологической и экологической обстановки.

Выпускаются декадные, месячные и итоговые отчеты с результатами анализа спутниковых данных и оценки гидродинамической обстановки и загрязнения водной среды, которые передаются потребителям. Выпускаются ежемесячные и итоговые бюллетени с результатами спутникового мониторинга российского сектора Черного и Азовского морей. Итоговый бюллетень имеет приложение в виде «Альбома космических изображений высокого разрешения и результатов их дешифрирования». Бюллетени передаются для последующего распространения через Северо-Кавказский УГМС.

Систематизация спутниковых данных по загрязнению моря нефтепродуктами, сброшенными с проходящих судов, позволила выявить районы наиболее частого сброса вдоль судоходных трасс Стамбул – Новороссийск и Стамбул – Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу мыс Железный Рог (рис.9), что полностью согласуется с данными проекта OCEANIDES (рис.2). Другое место с повышенной антропогенной нагрузкой находится в Керченском проливе, где на якорной стоянке происходит перегрузка нефти и нефтепродуктов с малых нефтеналивных судов на крупнотоннажные танкеры. Это еще раз подтверждает данные, полученные в (Ferraro et al., 2008), о том, что по количеству случаев и объему сброшенных с судов нефтепродуктов судоходные трассы европейских морей существенно превосходят остальные акватории. Ежегодно, в рамках данной работы, в российском секторе Черного и Азовского морей нами выявляется около 80 больших нефтяных разливов, самые крупные из которых составляли по протяженности до 30 км и до 40 км^2 по площади.

Анализ спутниковых данных показал, что в летне-осенний период в районе Новороссийск – Геленджик регулярно происходит загрязнение морской поверхности нефтепродуктами, что в свою очередь приводит к загрязнению береговой зоны и пляжей одного из крупнейших курортов России на Черном море. Данные, накопленные с 1999 года, свидетельствуют о том, что источниками загрязнений являются сбросовые воды с судов, которые следуют в порт и к нефтяным терминалам Новороссийска или ожидают погрузки на якорной стоянке в районе мыса Дооб (рис. 9-10). На рис. 11 для каждого месяца в летне-осенние периоды с 1999 по 2004 год представлено общее количество нефтяных пятен, обнаруженных на основе анализа радиолокационных изображений, и количество пятен, находившихся на расстоянии менее 20 км от берега. Как видно из диаграммы, наиболее неблагоприятным в экологическом плане месяцем является август. Отметим, что при построении диаграммы выбирались только те пятна пониженного рассеяния, которые бесспорно можно отнести к загрязнениям нефтепродуктами. Исходными данными служили не только имеющиеся в нашем распоряжении радиолокационные данные высокого разрешения, но и все радиолокационные данные, имеющиеся в архиве EoliSa Евро-

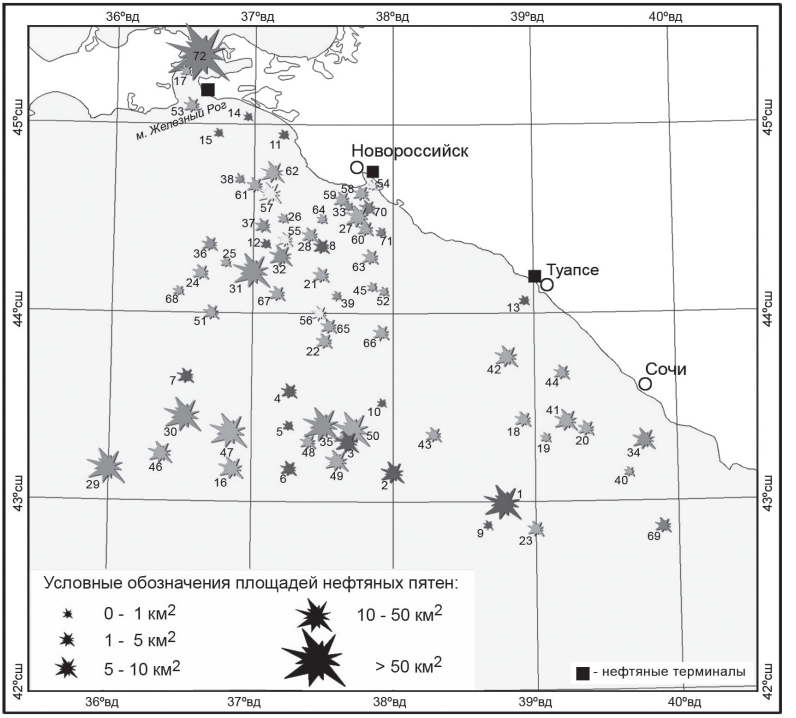


Рис.9. Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений в российском секторе Черного моря в апреле-ноябре 2007 г. по данным ИСЗ Envisat/ASAR. Цифры на рисунке – порядковый номер обнаруженного загрязнения

пейского космического агентства *(http://eoli.esa.int/geteolisa/index.html)*. Общее число нефтяных пятен могло бы быть гораздо больше, если бы учитывались все подозрительные пятна. Как правило, пятна пониженного рассеяния, связанные с нефтяными загрязнениями локализованы в Цемесской бухте и на подходе к ней.

Кроме того, было установлено, что, в период выпадения ливневых осадков в предгорьях Кавказа антропогенные загрязнения (бытовые и промышленные отходы, нефтепродукты, удобрения и др.), поступающие со всего водосбора в море с речным стоком, многократно возрастают. Антропогенные загрязнения усиливаются потоками грязи с подтапливаемых площадей. Особенно это касается горных рек с незарегулированным стоком (Мзымта, Шахе и др.). В этот период в прибрежных акваториях, примыкающих к устьям рек, по спутниковым данным наблюдается существенное увеличение зон распространения внутриводной взвеси, появление локальных вспышек цветения фитопланктона, увеличение количества плавающего мусора, пены, по-

верхностно-активных веществ (включая пленки нефтепродуктов). Усиление речного стока горных рек носит кратковременный характер (2-3 суток), но именно в этот период происходят самые масштабные загрязнения моря.

В Азовском море по данным многолетних спутниковых наблюдений были определены районы повышенного содержания загрязняющих веществ, к которым относятся северо-восточная часть Таганрогского залива, а также Ейский и Бейсугский лиманы. Было также установлено, что более чистые воды находятся в южной и юго-восточной части Азовского моря, что объясняется поступлением в этот район относительно чистых черноморских вод в результате водообмена через Керченский пролив.

11 ноября 2007 года штормовой ветер, скорость которого достигала 30-35 м/с, и волнение моря 6-7 баллов привели к крушению 12 судов в Керченском проливе. Российский танкер класса река-море «Волгонефть-139» разломился пополам и около полутора тысяч тонн нефтепродуктов вылилось в море. Носовая часть осталась на якоре

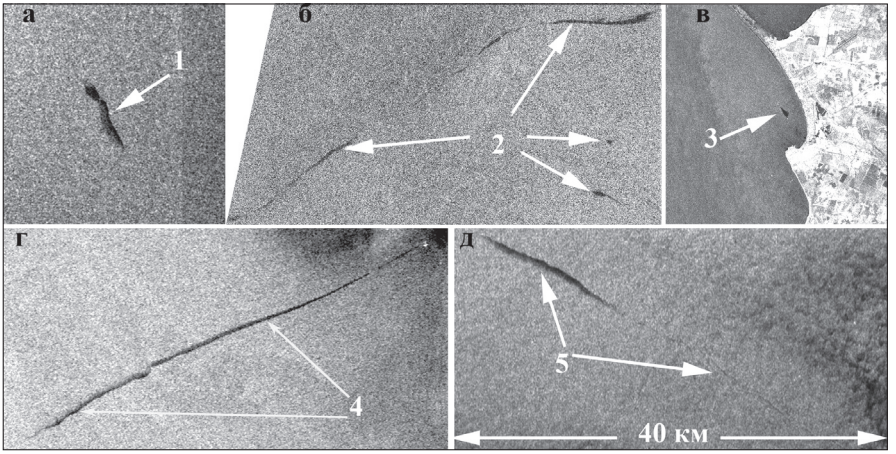


Рис.10. Нефтяные загрязнения на радиолокационных изображениях спутника Envisat в северо-восточной части Чёрного моря (© ESA):
а)11.07.2006 19:19 GMT. Площадь нефтяного загрязнения 4 км^2
б)17.04.2006, 07:32 GMT. Протяженность нефтяного загрязнения от движущегося судна 30,4 км.
в)17.04.2007, 19:19 GMT. Сброс с неподвижного судна загрязненных вод в 2 км от детских здравниц в Анапе. Общая площадь загрязнений – 0,4 км^2
г)19.09.2006, 19:19 GMT. Протяженность нефтяного загрязнения от движущегося судна 42 км. Общая площадь загрязнений – 9 км^2.
д) 28.08.2006, 19:19 GMT. Площадь нефтяного загрязнения 6,4 км^2

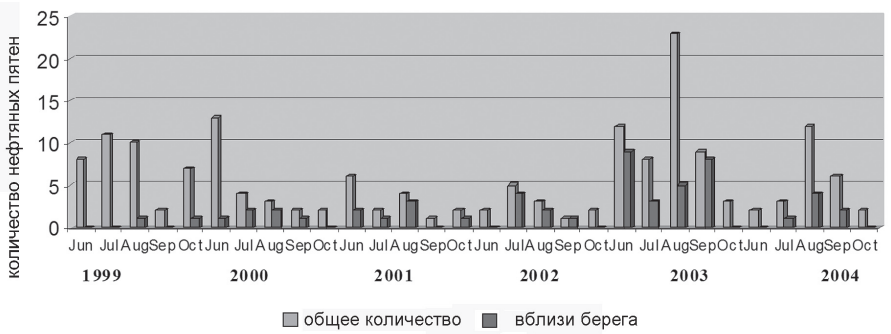


Рис. 11. Количество обнаруженных на РЛИ нефтяных пятен в районе Новороссийск-Геленджик в 1999–2004 гг

и затонула южнее косы Тузла, а кормовая часть была посажена на мель, а затем отбуксирована вместе с экипажем в порт Кавказ.

По данным Росгидромета сильный юго-юго-западный ветер сформировал сильное течение в проливе, направленное из Черного моря в Азовское, с ответвлением в Таманский залив. Водные массы, загрязненные мазутом, огибая косу Тузла, переносились течением вдоль западного берега косы Чушка в сторону Азовского моря, а часть попала в Таманский залив. В результате этого особенно сильному загрязнению подверглись остров и коса Тузла и коса Чушка.

С 16 ноября 2007 года по настоящее время нами проводится спутниковый радиолокационный мониторинг Керченского пролива с помощью ASAR Envisat. На рис. 12 представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 16 ноября 2007 г. в 19:25 UTC, т.е. через 5,5 суток после аварии. Цифрами отмечены возможные пятна нефтяных загрязнений (в трактовке European Maritime Safety Agency). Место аварии отмечено крестиком. В последующие дни, вследствие усиления ветра, загрязнения не идентифицировались на радиолокационных изображениях вплоть до середины июня 2008 года, когда температура воды прогрелась до 20°С и началось вторичное загрязнение морской поверхности, как и предупреждали экологи. Носовая часть с остатками мазута оставалась на дне до 13 августа 2008 г., и все это время на радиолокационных изображениях детектировались загрязнения нефтепродуктами морской поверхности, которые распространялись в зависимости от направления ветра и течения, как на юг, так и на север на несколько километров (рис.13). После того, как носовая часть была отбуксирована в порт Кавказ, наблюдается заметное уменьшение площади загрязнения. Радиолокационные изображения Керченского пролива, на которых выявлены вторичные загрязнения, представлены на сайте http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_moni.htm

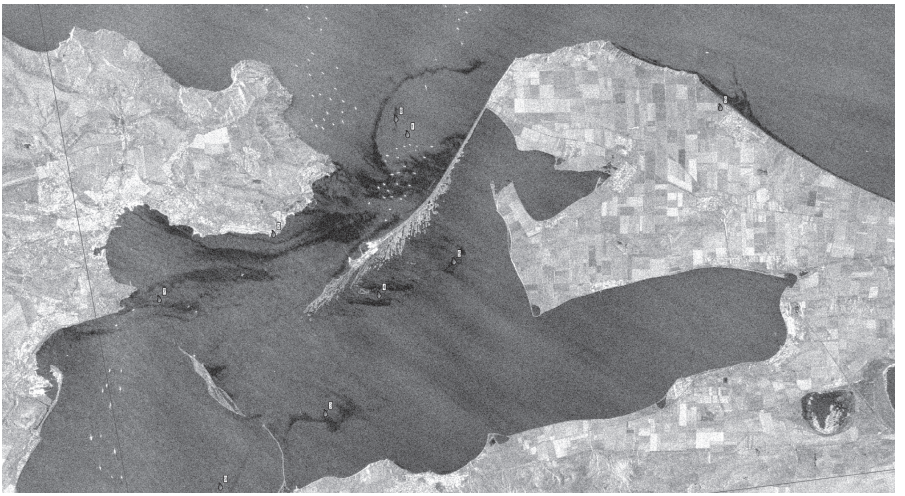


Рис. 12. Фрагмент ASAR Envisat изображения Керченского пролива, полученного 16 ноября 2007 г. в 19:25 UTC (EMSA CleanSeaNet).

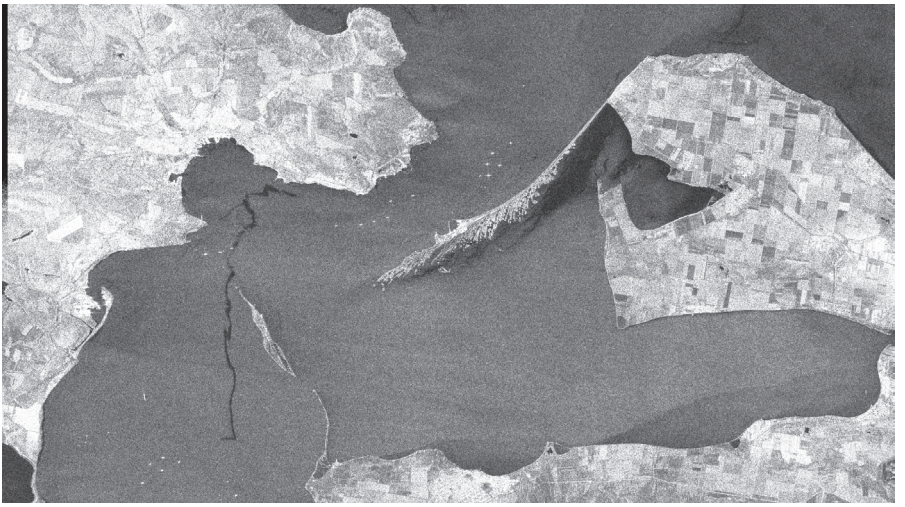


Рис. 13. Фрагмент ASAR Envisat изображения от 18.07.08, 19:25:09 UTC (© ESA). Пространственное разрешение исходного изображения 12,5 м в точке. Ветер южный, 6-8 м/с. Нефтяное загрязнение (черная полоса) распространяется на север практически через всю западную часть Керченского пролива. Общая длина следа более 20 км. Трудно определить, что явилось причиной такого большого загрязнения морской поверхности, но источник загрязнений находится примерно там, где лежит носовая часть танкера «Волгонефть-139» (http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_moni.htm).

Каспийское море

Каспийская программа по защите окружающей среды отмечает, что Каспийское море подвержено возрастающему антропогенному воздействию. В результате наблюдается рост эвтрофикации вод, загрязнение вод нефтепродуктами, тяжелыми металлами, химическими продуктами, а также катастрофическое уменьшение биологических ресурсов Каспийского моря (Kostianoy, Kosarev, 2005). Среди задач, требующих немедленного решения, выделяется борьба с биологическим вселенцем *Mnemiopsis leidyi* и нефтяными загрязнениями. Основными источниками загрязнения моря являются: речной сток; промышленные и муниципальные стоки; добыча нефти в море и на берегу; транспортировка нефтепродуктов; затопление береговой зоны в результате подъема уровня Каспия.

Каспийское море является первым крупным водоемом в мире, который начал подвергаться масштабному нефтяному загрязнению. По расчетам специалистов, с эпохи открытия Бакинской нефти в Южный Каспий поступило (при добыче и транспортировке) 2,5 млн. т сырой нефти, что в корне изменило условия среды на западном шельфе. Изношенность оборудования на старейших морских буровых платформах только ухудшает ситуацию, приводя практически к ежедневным выбросам нефтепродуктов в море. Согласно Каспинфо (www.caspinfo.net), интенсивная добыча нефти и газа в Каспийском регионе привела к серьезному загрязнению воды, суши и воздуха, деградации флоры и фауны, исчерпанию природных ресурсов, выводу из равновесия экосистем, опустыниванию и значительным потерям в биологическом разнообразии. Отрицательные изменения в окружающей среде вызвали рост заболеваемости и смертности населения, продолжительность жизни которого на 15-20 лет меньше, чем в развитых странах.

Оценки подтвержденных запасов сырой нефти в Каспийском регионе варьируются в значительных пределах. Администрация по энергетической информации (www.eia.doe.gov) оценивает эти запасы в диапазоне от 17 до 33 миллиардов баррелей, что сравнимо с членом ОПЕК – Катаром (минимальная оценка) и Соединенными Штатами (максимальная оценка). В 2002 г. добыча нефти в регионе достигла примерно 1,6 миллиона баррелей в день, что сравнимо с годовой добычей Бразилии, второй страной в Южной Америке по добыче нефти. К 2010 году планируется, что страны Каспийского региона будут производить от 3 до 4,7 миллиона баррелей в день, что превышает годовую добычу крупнейшего производителя нефти в Южной Америке – Венесуэлы.

Возрастающий экспорт нефти из Каспийского региона через российские и грузинские порты Черного моря привел к увеличению количества танкеров (и риску аварий), проходящих через узкие и извилистые турецкие проливы (Дарданеллы, Мраморное море и Босфор). В результате значительно увеличился риск загрязнения и даже эко-

логической катастрофы в Черном и Средиземном море. Согласно данным Администрации по энергетической информации (www.eia.doe.gov), около 50 тысяч судов ежегодно (или одно судно каждые 10 минут) проходят через турецкие проливы. Каждое десятое судно – это танкер с нефтью или с сжиженным газом. Все это привело к росту числа аварий. Только в период с 1988 по 1992 г. произошло 155 столкновений в проливах, некоторые из которых закончились разливом тысяч тонн нефтепродуктов (Kostianoy, 2005, 2006, 2008).

Регулярный спутниковый мониторинг Каспийского моря нами не проводился, однако анализу подвергся целый ряд снимков, полученные в разные годы и в разные сезоны в районе Баку – «Нефтяные камни» (современное название «Нефт дашлары») (Литовченко и др., 2004; Иванов и др., 2004; Лаврова и др., 2005; Lavrova et al., 2006a, b, 2007, 2008; Gade et al., 2007; Kostianoy et al., 2007). Дополнительно был произведен ретроспективный анализ радиолокационных изображений, находящихся в базе данных EoliSa. Практически на всех радиолокационных изображениях этого района присутствуют нефтяные пятна вокруг буровых платформ, что соответствует регулярному ежедневному загрязнению морской поверхности значительными количествами нефти. На рис. 14 представлено радиолокационное изображение, полученное с помощью Envisat ASAR Wide Swath 10 сентября 2004 года. Общая площадь нефтяных загрязнений, выявленных только на этом фрагменте, составляет порядка 200 км^2. Если исходить из оценки средней поверхностной плотности сырой нефти 62 т/ км^2 (Боев, Матвеев, 2005), то общий объем нефти вылитой на морскую поверхность составит порядка 12 тыс. т. В данном случае можно говорить уже о катастрофическом разливе, однако анализ спутниковых изображений за разные периоды времени показывает, что такая ситуация в этом районе Каспийского моря наблюдается постоянно.

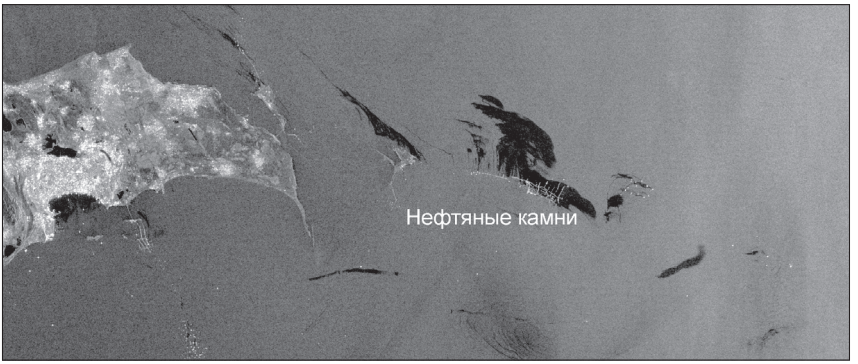


Рис. 14. Катастрофические разливы нефти в районе «Нефтяных камней». Фрагмент изображения, полученного Envisat ASAR 10 сентября 2004 г. (© ESA). Общая площадь нефтяных загрязнений составляет 200 км^2

Нефтяные пятна, образованные тяжелой Бакинской нефтью, практически не растекаются со временем, а опускаются на дно, поэтому для данного района вопрос о различении собственно нефтяных пятен и сликов ПАВ не является первостепенным. Образуя толстую пленку на морской поверхности, нефтяные загрязнения в Каспийском море хорошо идентифицируются на радиолокационных изображениях даже при наличии таких затрудняющих факторов, как конвективные процессы в приводном слое атмосферы или наличие большого количества сликовых полос при слабом ветре.

Заключение

В рамках ряда российских и международных научных и коммерческих проектов объединенный коллектив специалистов в различных областях дистанционного зондирования океанов и морей из космоса Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Института космических исследований РАН, Геофизического центра РАН, Российского НИИ космического приборостроения, а также специалистов из Морского гидрофизического института (г. Севастополь) разработали эффективный комплексный (мультисенсорный и междисциплинарный) подход к оперативному спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения морей России. Впервые такой подход был реализован на практике для района юго-восточной Балтики, где в 2004-2005 гг. по контракту с ООО «Лукойл-Калининградморнефть» нами была фактически создана служба мониторинга нефтяного загрязнения, которая работала в оперативном режиме круглосуточно в течение 18 месяцев. Впоследствии аналогичный комплексный подход был применен к Азово-Черноморскому бассейну и Каспийскому морю, однако эти работы проводились уже не в оперативном режиме. Результаты, полученные в 2004-2008 гг., показали эффективность комплексного спутникового мониторинга экологического состояния Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей. Разработанная технология оперативного комплексного спутникового мониторинга и приобретенный опыт могут быть легко перенесены на другие моря Российской Федерации, так же как и районы Мирового океана.

Полученные результаты докладывались в 2004-2008 гг. на более чем 20 международных конференциях и были опубликованы в многочисленных изданиях, полный список которых представлен в цитируемой литературе.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Европейскому космическому агентству (ESA, http://www.esa.int/esaCP/index.html) и Конгсберг-

ским спутниковым службам (KSAT, Тромсе, Норвегия, www.ksat.no/) за получение радиолокационных данных ASAR ENVISAT (контракт 04-10095-A-C); НОАА (http://www.noaa.gov/) и Лаборатории информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН (http://smis.iki.rssi.ru/) за предоставление данных радиометра AVHRR; Годдардскому центру космических полетов НАСА (NASA Goddard Space Flight Center) за предоставление данных радиометра MODIS (спутники Terra и Aqua) (http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html); Центру данных по физической океанографии Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (PODAAC, JPL NASA, ftp://podaac.jpl.nasa.gov) за предоставление данных спутников QuikSCAT и JASON-1; Шведскому институту метеорологии и гидрологии (SMHI, www.smhi.se/) за предоставление оперативного доступа к численной модели дрейфа нефтяных пятен (Seatrack Web model).

Работа по комплексному мониторингу юго-восточной части Балтийского моря была инициирована и поддержана компанией ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть».

Ряд работ был выполнен в рамках международных и национальных проектов: проект ИНТАС № 06-1000025-9091 «MOPED: Monitoring of Oil Pollution using Earth Observation Data: a multisensor, multiplatform approach»; ИНТАС № 03-51-4987, РФФИ №№ 03-02-16763, 04-02-16629, 07-07-13535-офи_ц. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ESA) в рамках проектов C1P.1027, AO3.224 и Bear 2775.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Макриденко Л. А. и др. 2005. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации. В сб. трудов НИЦ «Планета». № 1 (46)/ С. 3-21.

Бедрицкий А. И., Асмус В. В., Кровотынцев В. А., Лаврова О. Ю., Островский А. Г. 2007. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003-2007 гг. Метеоролоия и гидрология. № 11. С. 5-13.

Боев А. Г., Матвеев А. Я. 2005. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования. Радиофизика и Радиоастрономия. Т. 11, № 2. С. 178-188.

Булатов М. Г., Кравцов Ю. А., Кузьмин А. В., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Раев М. Д., Скворцов Е. И., Александров Д. В. 2003. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999-2000). М.: КДУ. 143 С.

Иванов А. Ю., Востоков С. В., Ермошкин И. С. 2004. Картографирование плёночных загрязнений морской поверхности по данным космической радиолокации (на примере Каспийского моря). Исследование Земли из космоса. № 4. С. 82-92.

Костяной А. Г., Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю., Станичный С. В., Соловьев Д. М., Лебедев С. А., Си-

рота А. М. 2006. Оперативный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения в юго-восточной части Балтийского моря. Труды III Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 14-17 ноября 2005), М.: Азбука-2000. Т. 1. С. 22-31.

Костяной А. Г., Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю., Лебедев С. А., Станичный С. В., Соловьев Д. М., Сирота А. М. 2008. Опыт организации комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения поверхности моря. В кн.: «Нефть и окружающая среда». Калининград: Лукойл-Калининградморнефть. (в печати).

Кровотынцев В. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Островский А. Г. 2007. Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна. В сб.: Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Выпуск 4. Том 1. М.: Азбука-2000. С. 295-303.

Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г., Литовченко К. Ц. 2005. Радиолокационный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений в прибрежной зоне российских морей. В сб.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей под ред. Лупяна Е. А., Лавровой О. Ю. М.: GRANP Polygraph. 2005. Т. 2. С. 124-130.

Литовченко К. Ц., Костяной А. Г., Иванов А. Ю. 2004. Космическая радиолокация нефтяных загрязнений в Каспийском море. Вестник Каспия. № 1. С. 96-106.

Литовченко К. Ц., Костяной А. Г. 2007. Оперативный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений на морском шельфе. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформатика в нефтегазовой и горной отраслях», Москва, 27 февраля – 1 марта 2007, CD-ROM 1(32), файл 35697.html. ГИС-Ассоциация 2007.

Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Иванов А. Ю., Юренко Ю. И. 2007. Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация. Исследования Земли из космоса 2007. № 1. С. 81-94.

Синицына Н. Н., Субботин А. А., Савоськин В. М. и др. 1997. Влияние загрязняющих стоков на морские экологические системы Черного моря и поиск методов их расчета и контроля. Сб. трудов научн. конф. «Диагноз состояния экосистемы Чёрного моря и зоны сопряжения суши и моря». 29 сентября-3 октября 1997 г.. Севастополь. С. 81-85.

Фащук Д. Я., Шапоренко С. И. 1995. Загрязнение прибрежных вод Черного моря: источники, современный уровень, межгодовая изменчивость. Водные ресурсы, Т. 22, №3. С. 273-281.

Ferraro G., Meyer-Roux S., Muellenhoff O., Pavliha M., Svetak J., Tarchi D., Topouzelis K. 2008. Long term monitoring of oil spills in European seas. – International Journal of Remote Sensing (in press, http://mc.manuscriptcentral.com/tres).

Finnish Environment Institute. 2004. (http://www.ymparisto.fi/).

Gade M., Byfield V., Ermakov S., Kostianoy A., Lavrova O., Mamedov R., Mitnik L., daSilva J., Stanichny S., Woolf D. 2007. Marine surface films in the coastal zone: what can we learn using remote sensing data? – Proc. 8th Int. Conf. Mediterr. Coast. Environ., MEDCOAST '07, E. Цzhan (ed.). Alexandria, Egypt. 13-17 Nov. 2007. P. 1395-1406.

HELCOM. 2002. (www.helcom.fi).

Kostianoy A. G. 2005. Satellite monitoring of oil pollution in the Black, Azov, Caspian and Baltic seas. Proceedings, «Black Sea and Caspian Ecology 2005» 3d International Caspian and Black Sea Ecology Summit and Showcase, 24-25 November 2005. Istanbul, Turkey, P. E27-E28 (in English). P. 135-R137 (in Russian).

Kostianoy A. G. 2006. Satellite monitoring of oil pollution in the European seas. Proc., ISRS 2006 PORSEC Conference. BEXCO. Busan, Korea. 2-4 November 2006. P. 977-980.

Kostianoy A. G. 2007. Session on oil spill monitoring. Bulletin of the PORSEC Association, March 2007/ V. 1, № 1. P. 4-5.

Kostianoy A. G. 2008. Satellite monitoring of oil pollution in the European Coastal Seas. OCEANIS (in press).

Kostianoy A., Ambjцrn C., Soloviev D. 2008. Seatrack Web: a numerical tool to protect the Baltic Sea marine protected areas. Proc., US/EU Baltic 2008 International Symposium «Ocean Observations, Ecosystem-Based Management and Forecasting», May 27-29. 2008. Tallinn, Estonia.

Kostianoy A. G., Kosarev A. N. (Eds.) 2005. «The Caspian Sea Environment». The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5: Water Pollution, Part 5P. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 271 P.

Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.) 2008. «The Black Sea Environment». The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5: Water Pollution, Part 5Q. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 457 P.

Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Litovchenko K. Ts., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M. 2007. Complex monitoring of oil pollution in the Baltic, Black and Caspian Seas. Proceedings, Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland. 23-27 April 2007.

Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E. 2004a. Oil spill monitoring in the southeastern Baltic Sea. Proceedings on CD, USA-Baltic International Symposium «Advances in Marine Environmental Research, Monitoring and Technologies». Klaipeda, Lithuania. 15-17 June 2004.

Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E. 2004b. Satellite remote sensing of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea. Gayana, V.68, № 2, Part 2. Proceedings of PORSEC-2004, Concepcion, Chile, 29 November – 3 December, 2004. P.327-332.

Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E. 2005a. Oil spill monitoring in the Southeastern Baltic Sea. Environmental Research, Engineering and Management. № 3 (33), P. 73-79.

Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Soloviev D. M., Pichuzhkina O. E. 2005b. Satellite monitoring of the Southeastern Baltic Sea. Annual Report 2004. Lukoil-Kaliningradmorneft, Kaliningrad. 36 P.

Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M., Pichuzhkina O. E. 2006. Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience. Environmental Research, Engineering and Management. № 4 (38). P.70-77.

Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Pichuzhkina O. E. 2005c. Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea. IEEE Conference Proc. Oceans 2005 – Europe V. 1, 20-23 June 2005. P.182-183. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1511706.

Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu. 2006. Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone. Advance in Space Research, 38 (10). P. 2162-2168.

Lavrova O., Bocharova T., Kostianoy A. 2006a. Satellite radar imagery of the coastal zone: slicks and oil spills. In: Global Developments in Environmental Earth Observation from Space, Andre Marcal (Ed.), Millpress Science Publishers. Rotterdam, Netherlands. P.763-771.

Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoy A. G. 2006b. An approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones. In: Advances in SAR Oceanography from Envisat and ERS Missions. SEASAR-2006, 23-26 January, 2006, Frascati, Roma, Italy.

Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. 2007. Multi-Sensor Observation of Meso-Scale Features in European Coastal Waters. In: Remote Sensing of the European Seas. Eds. V. Barale and M. Gade. Springer. P. 463-474.

Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Kostianoy A., Krovotyntsev V. 2008. Multisensor approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones. Proceedings, IGARSS, 6-11 July 2008.

Mityagina M., Churyumov A., Lavrova O. 2004. Problems in detecting oil pollution in Black Sea coastal zone by satellite radar means. Proceedings of the 2004 ERS & Envisat Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.

Oceana. 2003. The other side of oil slick. The dumping of hydrocarbons from ships into the seas and oceans of Europe. 31 P.

Oceana. 2004. The EU fleet and chronic hydrocarbon contamination of the oceans. 58 P.

OCEANIDES Project. 2003-2005. (http://oceanides.jrc.cec.eu.int/).

UNESCO. 2003. The integrated, strategic design plan for the coastal ocean observations module of the Global Ocean Observing System. GOOS Report N 125, IOC information Documents Series N 1183, 190 P.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СЕРДЕЧНЫЙ РИТМ МИДИЙ

И. Н. Бахмет

Россия, 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Институт Биологии Карельского Научного Центра РАН, igor.bakhmet@gmail.com

Реферат. С помощью дистантной регистрации сердечной ритмики исследовано влияние нефтепродуктов на частоту сердечных сокращений (ЧСС) беломорских мидий *Mytilus edulis* L. Показано, что концентрации загрязняющего вещества от 8,41 до 38,8 мг/л вызывают повышение сердечной активности с выраженной флуктуацией сердечного ритма. При содержании нефтепродуктов от 0,35 до 1,88 мг/л роста ЧСС не выявлено, однако сердечная активность мидий также характеризовалась значительными колебаниями.

Ключевые слова. Нефтепродукты, частота сердечных сокращений, мидия, *Mytilus edulis* L.

ESTIMATION OF OIL PRODUCT'S EFFECTS ON THE MUSSEL CARDIAC RHYTHM

I. N. Bakhmet

Institute of Biology Karelian Research Centre, 11, Pushkinskaya str., 185910 Petrozavodsk, Russia, igor.bakhmet@gmail.com

Abstract. An influence of oil products on the mussel (Mytilus edulis L.) heart rate was studied applying noninvasive monitoring. It was shown that mussels responded to pollution level of 8.41-38.8 mg/l by sharp increase in their heart rate. The cardiac activity in that case fluctuated. Any changes in the heart rate under pollution level of 0.35 – 1.88 mg/l have not been detected. However, some fluctuations in cardiac activity were observed.

Key words. Oil products, heart rate, mussel, *Mytilus edulis* L.

Введение

Двустворчатый моллюск мидия *Mytilus edulis* L. используется в биомониторинге природных вод более 30 лет. Это объясняется следующими причинами:

1. Повсеместным распространением моллюска, включая и некоторые из внутренних морей;
2. Литораль и верхняя сублитораль, типичные места обитания мидий, наиболее подверженны антропогенному воздействию;
3. Мидия активно накапливает загрязняющие вещества;
4. Являясь видом-эдификатором, моллюск определяет структуру сообщества, что позволяет отслеживать отдаленные последствия загрязнений;
5. Размеры мидии достаточно малы для сбора необходимого количества материала и достаточно велики для выделения отдельных органов и тканей.

Благодаря этим показателям, в настоящее время мидии используются в программе биомониторинга "mussel watch" в США (Farrington et al., 1983; Choiseul et al., 1998), при оценке накопления загрязняющих веществ в тканях моллюсков (Awad, 1979; NAS, 1980; Widdows, Donkin, 1992 и др.) и в других работах (Widdows et al., 1987; Shigenaka, Henry, 1993).

Известно, что при проведении мониторинга окружающей среды наиболее эффективно использование долговременных наблюдений за какой-либо интегральной (дыхание, сердечная активность и т.д.) функцией организма-биоиндикатора (Handy et al., 2003). Однако мидии редко применялись в подобных мониторингах в связи с методическими трудностями (Depledge et al., 1992; Taylor et al., 2000). К примеру, широкое использование такого информативного показателя, как скорость сердцебиения было затруднено из-за различных артефактов, вызванных имплантацией электродов и/или другими повреждающими воздействиями (Segal, 1961; Bayne, 1973). В последнее время этот недостаток был преодолен, благодаря разработке новой методики дистантной регистрации частоты сердечных сокращений (Depledge, Andersen, 1990; Marshall, McQuaid, 1993). Исследования показали наличие достоверной корреляции между изменениями сердечной ритмики морских беспозвоночных и варьированием природных факторов (Marshall, McQuaid, 1993; 1994; Santini et al., 2000; Bakhmet et al., 2005). В дальнейших работах была установлена высокая чувствительность сердечной активности моллюсков к тяжелым металлам (Marchan et al., 1999; Curtis et al., 2000) и аммиаку (Bloxham et al., 1999). На этом фоне обращает на себя внимание отсутствие работ по изучению влияния на физиологию мидий таких токсичных веществ, как нефтепродукты. В наше время эта проблема особенно важна в связи с интенсивными работами по освоению новых нефтяных месторождений в прибрежной и шельфовой морских зонах (месторождения Штокмановское, Сахалин-1, Сахалин-2). Биомониторинг природных вод с использованием сердечной ритмики моллюсков может стать достаточно удобным

инструментом отслеживания качества морских вод в потенциально опасных районах.

Целью нашей работы была оценка влияния нефтепродуктов на сердечную активность мидии *Mytilus edulis* L. для последующего использования методики в биомониторинге морских прибрежных вод.

Методы и материалы

Сбор и содержание моллюсков.

Работа была выполнена в сентябре 2005 года на Беломорской биологической станции им. О. А. Скарлато Зоологического института РАН. Мидий собирали в бухте Круглой Чупинской губы Кандалакшского залива Белого моря с установок для культивирования моллюсков (глубина 2 м) при температуре воды 8°С. После сбора у моллюсков была измерена длина и определен возраст по кольцам зимней остановки роста раковины. Перед началом наблюдений животных в течение 7 суток акклиматизировали к лабораторным условиям. Моллюсков содержали в аквариумах из оргстекла с аэрируемой фильтрованной морской водой соленостью 25‰ при постоянном освещении и температуре 10°С. Соленость проверяли ежесуточно перед сменой воды с помощью рефрактометра. Температура поддерживалась на одном уровне при помощи термореле. Ежесуточно проводилась частичная смена воды. Поскольку питание, по-видимому, оказывает специфическое динамическое действие на сердечную активность животных, кормление мидий не производилось.

За сутки до начала эксперимента к раковинам тестируемых животных приклеивали оптические сенсоры (см. ниже) и помещали по 15 особей в аквариумы объемом 15 литров с постоянной продувкой. Ежесуточно осуществлялась частичная смена воды. Всего в эксперименте было использовано 75 мидий.

Регистрация сердечного ритма и обработка полученных данных.

Регистрацию ЧСС проводили через каждые 2 часа в течение суток перед добавлением нефтепродуктов и 6 суток после воздействия. Запись сердечного ритма осуществлялась индивидуально при помощи методики дистантной регистрации изменения объема сердечной мышцы (плетизмограмма), основанной на излучении инфракрасного света в область расположения сердца и приема измененных отраженных лучей (Depledge, Andersen, 1990). Были использованы оптические сенсоры CNY-70. С помощью специально разработанного усилителя с системой фильтров и портативного цифрового осциллографа

Fluke 125 сигнал передавался на персональный компьютер, где записывался в виде последовательных волн сердечных сокращений и обрабатывался при помощи программы FlukeView 3.0 (De Pirro et al., 1999; Santini et al., 2000). Для каждого моллюска регистрировали три последовательных интервала плетизмограмм длительностью 60 секунд каждая. При расчете ЧСС получали количество сокращений в одну минуту. Как известно, сердечная активность мидий характеризуется апериодическими остановками сердечных сокращений (так называемые «периоды покоя» (Бахмет и др., 2005; Bakhmet et al., 2005)). Средние показатели ЧСС мидий в нашей работе определялись с учетом вышеуказанных периодов, однако отдельно подсчитывались и длительности периодов покоя. На графиках приведены средние арифметические значения числа сокращений сердца мидий в минуту и их средние квадратические ошибки.

Проведение эксперимента.

В качестве нефтепродуктов было использовано тяжелое дизельное топливо. Для избежания расслоения первоначально 100 мл дизтоплива разбавляли в 900 мл морской воды и взбалтывали в течение 10 минут. Далее, в каждый из 3 аквариумов добавляли 15, 50 и 150 мл полученной смеси. Таким образом, мы получали 3 расчетные концентрации нефтепродуктов (таблица). Концентрации выбирались с расчетом охвата от ПДК до максимальных сублетальных. Добавление нефтепродуктов производилось ежесуточно после смены морской воды в аквариумах. В четвертый аквариум добавление нефтепродуктов не проводилось. Однако, учитывая высокую поглощающую способность морской воды, был взят дополнительный 5 аквариум, так называемый «контроль контроля», который поместили в отдельную изотермическую комнату с такими же условиями содержания моллюсков.

Определение концентрации нефтепродуктов

Мы учитывали, что часть нефтепродуктов испаряется, часть сорбируется на стенках аквариума и часть поглощается мидиями. Считается, что растворенные нефтепродукты составляют сотые доли процента от пролитой нефти и не тождественны сырой нефти ни в качественном, ни в количественном отношении. В связи с этим в конце суток, перед сменой воды, бралась проба для определения истинной концентрации. Определение концентрации нефтепродуктов проводилось экстракционно-фотометрическим методом с колоночной хроматографией на Al_2O_3 и ИК – спектроскопическим окончанием. (РД 52.24.476-95). По расчетам и в результате химического анализа были получены следующие концентрации нефтепродуктов (табл.).

Таблица.

Концентрации нефтепродуктов, используемые в эксперименте

	1	2	3	4	Контроль
Расчетные (мл/л)	1,0	0,3	0,1	0	0
Расчетные (мг/л)	700	210	70	0	0
Истинные (мг/л)	38,80	8,41	1,88	0,35	0,02

Результаты

В эксперименте были использованы мидии 6–7-летнего возраста. Длина раковин варьировала от 58,3 до 73,5 мм и составила в среднем 66,6 мм. Полученные плетизмограммы мидий позволяли четко разделять сокращения предсердия (короткий и высокий пик) и желудочка (пик более длительный и уплощенный) (рис. 1). Сила регистрируемого сигнала (по показаниям осциллографа) достигала 7 В. ЧСС моллюсков в контроле изменялась от 0 до 14,8 уд/мин и составила в среднем 11,3 ± 0,2 уд/мин. Сердечная активность у всех мидий до воздействия достоверно не различалась. Отметим тенденцию к понижению ЧСС мидий в контроле (рис. 2, 3).

Через 1 сутки после добавления нефтепродуктов происходило достоверное повышение сердечной активности при высоких концентрациях загрязняющего вещества (рис. 2). Через 2 суток после воздействия ЧСС мидий в случае самой высокой концентрации падала ниже контрольного уровня, а на 4-е сутки происходил существенный и достоверный подъем. Далее до конца эксперимента сердечная активность достоверно не снижалась (рис. 2). При концентрации 8,41 мг/л цикл «подъем-падение-подъем» сердечной активности мидий происходил в течение 3 суток. Через 4 суток ЧСС моллюсков возвращалась к контрольному уровню. В дальнейшем сердечная ритмика возрастала и оставалась достоверно более высокой, чем в контроле до конца эксперимента (рис. 2).

При пониженных концентрациях нефтепродуктов наблюдались недостоверные флуктуации ЧСС мидий с достоверным понижением сердечной активности через 4 суток после воздействия. Возврат сердечной активности моллюсков к контрольному уровню наблюдался на 7 сутки опыта (рис. 3).

Количество и длительность периодов покоя в экспериментальной и контрольной группах было равным. Таким образом, рост и понижение ЧСС моллюсков в опыте происходили именно за счет изменения количества сокращений в минуту (периодов сердечной активности).

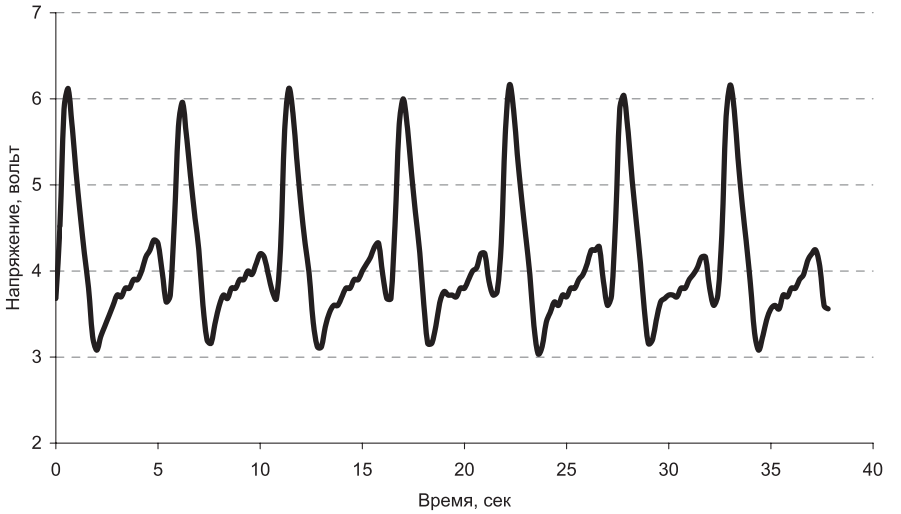


Рис. 1. Типичная плетизмограмма (кардиограмма) мидии.

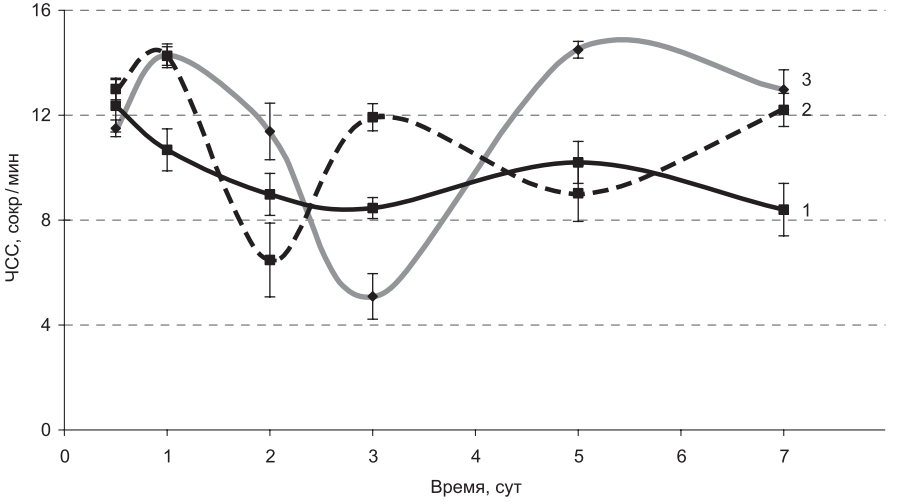


Рис. 2. Изменение частоты сердечных сокращений мидий при воздействии высокой концентрации нефтепродуктов:
1 – контроль, 2 – 38,8 мг/л, 3 – 8,41 мг/л

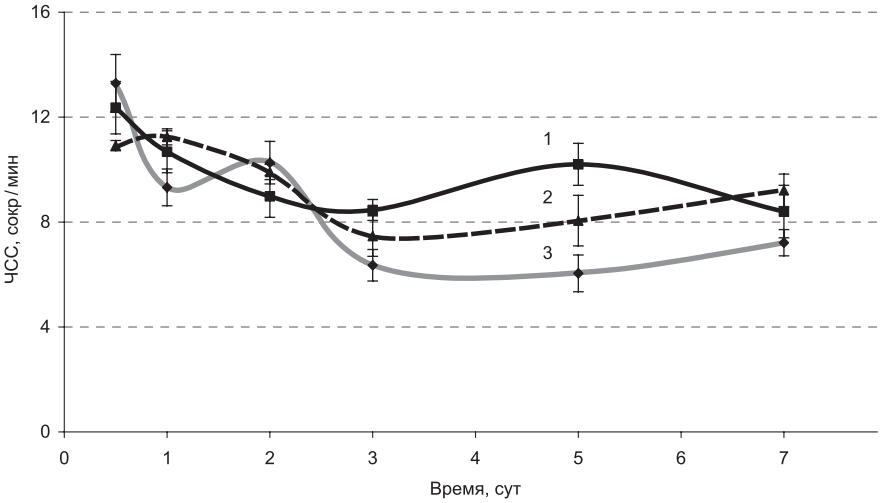


Рис. 3. Изменение частоты сердечных сокращений мидий при воздействии низкой концентрации нефтепродуктов:
1 – контроль, 2 – 1,88 мг/л, 3 – 0,35 мг/л

Дискуссия

Нефтяные углеводороды, особенно алифатические и полициклические ароматические (PAHs) характеризуются канцерогенными и мутагенными свойствами (Choiseul et al., 1998; Dyrynda et al., 2000). Летальный эффект растворенных углеводородов вызывают концентрации нефти от 1 до 100 ppm в зависимости от вида взрослых морских животных (GESAMP, 1993). К примеру, для черноморской креветки *Leander adsperus* летальными оказались концентрации 50-70 мг/л (Замбахидзе, 1975). В нашей работе мы не ставили задачу оценки летальных концентраций, в связи с чем было выбрано максимальное содержание нефтепродуктов около 40 мг/л. Повышение ЧСС моллюсков в данном случае свидетельствует о возрастании потребления кислорода и, соответственно, общего уровня обмена веществ. Учитывая, что мидия является активным фильтратором, возможны две причины данного эффекта. Первая - моллюскам необходима дополнительная энергия для выведения нефтепродуктов из тканей. Вторая - дополнительный кислород используется при окислении загрязняющих веществ. Добавим, что в данном случае происходит хроническое воздействие. Следовательно, можно выдвинуть гипотезу об акклимации мидий к присутствию нефтепродуктов в окружающей среде. Это предположение основано на колебательном процессе изменения ЧСС на протяжении всего эксперимента, что характерно для адаптацион-

ных процессов (Бергер, 1986). Сходный эффект был получен и при концентрации нефтепродуктов 8,41 мг/л.

При более низких концентрациях – 1,88 и 0,35 мг/л – достоверные изменения ЧСС мидий сразу после воздействия нефтепродуктами не отмечены. С другой стороны в этом случае наблюдались сходные флуктуации сердечной ритмики (рис. 2). Как уже было сказано, колебательный характер самых различных функций организма протекает во время акклимации организма животных к изменяющимся факторам среды и отражает инерционность адаптационных механизмов (Бергер, 1986). Следовательно, можно предположить, что малые концентрации нефтепродуктов также оказывают определенное воздействие на организм морских беспозвоночных. Принцип воздействия пока неясен, однако можно предположить, что, как и в случае с высокими концентрациями, в процессе адаптации мидий к нефтяным углеводородам происходит перестройка внутриклеточных процессов, направленная на утилизацию и выведение загрязняющих веществ. Ранее отмечалось, что в различных тканях мидий происходит окисление полиароматических углеводородов для последующего удаления этих веществ (Dyrynda et al., 2000). Меньшая выраженность колебаний и отсутствие повышения сердечной активности объясняется малыми дозами загрязняющих веществ.

В хронических экспериментах при добавлении нефтепродуктов (1–4 мл/л), по крайней мере, у рыб было отмечено повышение содержания адреналина и снижение концентрации норадреналина (Восилене, 1975). Возможно, что в нашем случае также происходит повышение концентрации таких нейромедиаторов, как 5-ГТ, FMFR-амиды и кардиоактивных пептидов, способствующих повышению сердечной активности (McMahon et al., 1997). В особенности следует обратить внимание на биогенные амиды FMRF, уровень которых возрастает во время стресса (Yamagishi et al., 2004). Эти предположения требуют дальнейших исследований с применением анализа содержания вышеуказанных веществ в организме моллюсков.

Тенденция же к понижению сердечной активности мидий в контроле и при малых дозах нефтепродуктов объясняется недостаточностью питания моллюсков, что было отмечено ранее (Бахмет и др., 2005; Bakhmet et al., 2005).

Заключение

Наша работа показала перспективность использования сердечного ритма в мониторинге прибрежных вод. Особо хотелось бы подчеркнуть, что в настоящее время при биомониторинге прибрежных вод активно используется система регистрация закрытия створок раковины у мидий «MusselMonitor» (Kees et al., 1989; Allen et al.,

1996; и др.). Однако вышеуказанная система, во-первых, на порядок менее чувствительна, чем сердечный ритм. Во-вторых, регистрация сердечной активности позволяет использовать несколько показателей для оценки степени воздействия загрязняющих веществ: частоту сердечного ритма, вариабельность (дисперсию), наличие определенных флуктуаций ЧСС. Для успешного внедрения данной методики необходимы дополнительные работы по оценке влияния загрязняющих веществ самого широкого спектра на сердечную ритмику мидий.

Благодарность

Хотелось бы выразить свою признательность заведующему лаборатории гидрохимии Института Водных Проблем Севера д.х.н. Лозовику Петру Александровичу и сотруднице лаборатории Басовой Светлане Васильевне за неоценимую помощь в работе. Также пользуюсь случаем поблагодарить сотрудников Беломорской биологической станции им. О. А. Скарлатто ЗИН «Картеш» за предоставленную возможность проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бахмет И. Н., Бергер В. Я., Халаман В. В. 2005. Сердечный ритм у мидии *Mytilus edulis* L. (*Bivalvia*) при изменении солености. Биология моря. Т. 31, № 5. С. 363-366.

Бергер В. Я. 1986. Адаптации морских моллюсков к изменениям солености среды. Л.: Наука. 214 С.

Восилене М. Е. 1975. Влияние хронического воздействия нефти на катехоламины в мозговой ткани серебряного карася (аквариальные опыты). Тез. докл. III всесоюзн. научн. конф. по водной токсикологии «Проблемы водной токсикологии». Т. 1. С. 136-139.

Замбахидзе Н. П. 1975. Влияние растворенных нефтепродуктов на черноморскую креветку *Leander adsperus*. Тез. докл. III всесоюзн. научн. конф. по водной токсикологии «Проблемы водной токсикологии». Т. 1. С. 178-179.

РД 52.24.476-95. 1995. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов ИК-фотометрическим методом. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. Гидрохимический институт. Ростов-на-Дону. 14 С.

Allen H. J., Waller W. T., Acevedo M. F., Morgan E. L., Dickson K.L., Kennedy J. H.. 1996. A minimally invasive technique to monitor valve-movement behavior in bivalves. Env. Tech.. V. 17. P. 501-507.

Awad H. 1979. Determination of rate of hydrocarbon accumulation by mussels in chronic pollution conditions. Science et Peche. № 291. P. 9–15.

Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. 2005. The effect of salinity change on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. V. 318. Is. 2. P. 121-126.

Bayne B. 1973. The responses of three species of bivalve mollusc to declining oxygen tension at reduced salinity. Comp Biochem Physiol A. 1; V. 45, № 3. P. 793-806.

Bloxham M.J., Worsfold P.J., Depledge M.H. 1999. Integrated Biological and Chemical Monitoring: In situ Physiological Responses of Freshwater Crayfish

to Fluctuations in Environmental Ammonia Concentrations. Ecotoxicology. V.8, № 3. P. 225-237.

Choiseul V., Wilson J. G., Nixon E. 1998. The distribution of hydrocarbons on the east and south-west Irish costs and in the Liffe estuary. Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy, V. 98B, № 2. P. 75-86.

Curtis T. M, Williamson R., Depledge M. H. 2000. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper. Mar. Biol. V. 136, № 5. P. 0837-0846.

De Pirro M., Santini G., Chelazzi G. 1999. Cardiac responses to salinity variations in two differently zoned Mediterranean limpets. J. of Comp. Physiol. B. V. 169. Is. 7. P. 501-506.

Depledge M. H., Andersen B. B. 1990. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates. Comp. Biochem. Physiol. № 96, P. 474-477.

Depledge M. H., Amaral-Mendes J. J., Daniel B., Halbrook R. S., Kloepper-Sams P., Moore M. N., Peakall D. B. 1992. The conceptual basis of the biomarker approach. In: D. B. Peakall and L. R. Shugart (eds.) Biomarkers: Research and application in the assessment of the environmental health. NATO ASI Series H: Cell Biology. V. 86. P. 15-29.

Dyrynda E. A., Law R. J., Dyrynda P. E. J., Kelly C. A., Pipe R. K., Ratcliffe N. A. 2000. Changes in immune parameters of natural mussel *Mytilus edulis* populations following a major oil spill ('Sea Empress', Wales, UK). Mar. Ecol. Prog. Ser. № 206, P. 155-170.

Farrington J. W., Goldberg F. D., Risebrough R. W., Martin J. H., Bowen V. T. 1983. US Mussel watch, 1976–1978: An overview of the trace metal. DDT, PCB, hydrocarbon and artificial radionuclide data. Environmental Science and Technology. № 17. P. 490–496.

GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution: IMO:FAO:UNECSO: WMO:WHO:IAEA:UN:UNEP). Impact of oil and related chemicals and wastes on the marine environment. Reports and Studies of GESAMP 1993. № 50. P. 1–180.

Kees J. M. K., Jenner H. A., de Zwart D. 1989. The valve movement response of mussels: a tool in biological monitoring. Hydrobiol. V. 188/89. P. 433-443.

Marchan S., Davies M. S., Fleming S., Jones H. D. 1999. Effect of copper and zinc on the heart rate of the limpet *Patella vulgata* L. J. Comp. Biochem. Physiol. A. № 123, P. 89-93.

Marshall D. J., McQuaid C. D. 1993. Effects of hypoxia and hyposalinity on the heart beat of the intertidal limpets *Patella granularis* (*Prosobranchia*) and *Siphonaria capensis* (*Pulmonata*). Comp. Biochem. Physiol. A. 106. P. 65-68.

Marshall D. J., McQuaid C. D. 1994. Seasonal and diel variations of in situ heart rate of the intertidal limpet *Siphonaria oculus* Kr. (*Pulmonata*). J. Exp. Mar. Biol. Ecol.,V. 179, № 1. P. 1-9.

McMahon B. R., Wilkens J. L., Smith P .J. S. 1997. Invertebrate circulatory systems. Section 13. In.: Handbook of Physiology. Comparative Physiology. V. II. NY. Oxford. P. 931-1008.

National Academy of Sciences (NAS): The International Mussel Watch, Publications office, National Research Council, Washington, D. C., U.S.A. 1980. 248 P.

Handy R. D., Galloway T. S., Depledge M. H. 2003. A proposal for the use of biomarkers for the assessment of chronic pollution and in regulatory toxicology. Ecotoxicol. № 12. P. 331-343.

Santini G., Williams G. A., Chelazzi G. 2000. Assessment of factors affecting heart rate of the limpet *Patella vulgata* on the natural shore. Mar. Biol. V. 137, № 2. P. 291-296.

Segal E. 1961. Acclimation in mollusks. Amer. Zoologist. V. 1, № 2. P. 235-244.

Shigenaka G., Henry C. B. 1993. Use of mussels and semipermeable membrane devices to assess bioavailability of residual polynuclear aromatic hydrocarbons three years after the Exxon Valdez oil spill. In: Wells P. G., Butler J. N., Hughes J. S. (eds) Exxon

Valdez oil spill: fate and effects in Alaskan waters. American Society for Testing and Materials, Philadelphia. P. 239–260.

Taylor L. N., McGeer J. C., Wood C. M., McDonald D. G. 2000. Physiological effects of chronic cooper exposure to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in hard and soft water: evaluation of chronic indicators. Environ. Toxicol. Chem. № 19. P. 2298-2308.

Widdows J., Donkin P., Salkeld P. N., Evans S. V. 1997. Measurement of scope for growth and tissue hydrocarbon concentrations of mussels (*Mytilus edulis*) at sites in the vicinity of Sullom Voe: a case study. - In: Kuipers J., Van den Brink W. J. (eds) Fate and effects of oil in marine ecosystems. Nijhoff, Dordrecht. P. 269–277.

Widdows J., Donkin P. 1992. Mussels and environmental contaminants: bioaccumulation and physiological aspects. - In: Gosling E. (ed) The mussel *Mytilus*: ecology, physiology, genetics and aquaculture. Elsevier, Amsterdam. P. 383–424.

Yamagishi H., Takano S., Tanaka K. 2004. Dual effects of dopamine on the adult heart of the isopod crustacean *Ligia exotica*. Zool. Sci. № 21. P. 15-21.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Издается с 1978 года. Является продолжающимся изданием Института глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН (http://www.igce.comcor.ru).

В издании публикуются работы о явлениях и процессах регионального и глобального масштабов, связанных с антропогенным влиянием на климат и природные экосистемы, о методах их изучения с помощью мониторинга и моделирования.

К рассмотрению принимаются оригинальные 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 в соответствии с правилами рукописи направляйте по адресу:

РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии, В. В. Ясюкевичу

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ**

Том XXII

Редактор *В. В. Ясюкевич*
Корректор *В. В. Ясюкевич*
Компьютерная верстка *А. Ю. Филиппов*

Подписано в печать 15.11.2008
Тираж 150 экз.

Отпечатано на фабрике офсетной печати
249030, Калужская обл.,
г. Обнинск, ул. Королева, 6