

Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур

А.Ю. Богданович^{1, 4)}, В.Н. Павлова²⁾, Э.Я. Ранькова^{1, 3)}, С.М. Семенов^{1, 3, 5)}

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

²⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии,
Россия, 249030, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Ленина, 82

³⁾ Институт географии РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., дом 29

⁴⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

⁵⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

* адрес для переписки: *bogda-anton@yandex.ru*

Реферат. В работе используются предоставленные Климатическим центром Росгидромета (КЦР) климатические данные 1990-1999 гг., 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг. для территории России. Модельный расчет соответствует сценарию RCP8.5. При этом были внесены поправки, максимально сближающие результаты модельного расчета для 1990-1999 гг. с данными массива CRU TS v.4.04, созданного Отделом исследования климата (Climatic Research Unit, CRU) Университета Восточной Англии, Великобритания. По полученным результатам, для расчетного климата 1990-1999 гг. на территории нескольких субъектов РФ отмечаются условия, при которых практически достоверно частота сильных засух p превосходит значение 0.5. Это означает непригодность для культивирования зерновых. Так, это обнаруживается практически на всей территории Астраханской области и Республики Калмыкия, на востоке Республики Дагестан и Ростовской области, на юге и востоке Волгоградской области, а также на юге Саратовской и Оренбургской областей. Аналогичные условия в данный период, весьма вероятно, отмечаются и на северо-востоке Крымского полуострова. Для климата 2030-2039 гг., в целом, отмечается возрастание уверенности в том, что частота сильных засух превосходит 0.5. Это ожидается как в тех районах субъектов РФ, где уверенность уже была значительная в 1990-1999 гг., так и в новых районах и субъектах РФ. Существенное расширение таких территорий к северу можно отметить в Оренбургской и Саратовской областях, вплоть до южных границ Челябинской и Самарской областей, а также Республики Башкортостан. Заметное расшире-

ние отмечается и в Волгоградской и Ростовской областях в направлении северо-запада и запада, вплоть до восточной границы с Воронежской областью. Небольшое расширение также заметно в Республиках Калмыкия и Дагестан до границы с Чеченской Республикой. Кроме этого, рост значения уверенности отмечается на юге Западной Сибири: в Алтайском крае и Новосибирской области. На Крымском полуострове положительная тенденция отмечается на севере и востоке, тогда как в центральной его части заметно небольшое улучшение ситуации. В условиях климата 2050-2059 гг. ожидаются аналогичные изменения, однако они будут еще более выражены на всех перечисленных территориях.

Ключевые слова. Изменения климата, Россия, XXI век, засуха, вероятностная оценка, возделывание зерновых, пригодность территорий.

Influence of changes in aridity in Russia in the XXI century on the suitability of territories for the cultivation of grain crops

A. Yu. Bogdanovich^{1, 4)}, V.N. Pavlova²⁾, E. Ya. Rankova^{1, 3)}, S.M. Semenov^{1, 3, 5)}*

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20b, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology,
Lenin Ave., 82, 249030, Kaluga Region, Obninsk, Russian Federation

³⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
Staromonetny lane, 29, 119017, Moscow, Russian Federation

⁴⁾ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russian Federation

⁵⁾ National Research University Higher School of Economics,
Myasnitskaya, 20, 101000, Moscow, Russian Federation

* Correspondence address: bogda-anton@yandex.ru

Abstract. Climate of Russia of 1990-1999, 2030-2039 and 2050-2059 used in the paper was provided by the Climate Center of Roshydromet (CCR). The calculation corresponds to the RCP8.5 scenario. Some corrections were made to adjust the results of model calculations for 1990-1999 to respective data from the CRU TS v. 4.04 data massif created by the Climatic Research Unit (CRU) of the University of East Anglia, UK. Under conditions of such climate for 1990-1999, in several subjects of the Russian Federation, in some areas the frequency of severe droughts p exceeds 0.5 (*virtually certain*). This means that the territories are not suitable for cultivation of grain crops. This is found practically throughout the entire territory of the Astrakhan oblast and the Republic of Kalmykia, in the east of the Republic of Dagestan and the Rostov oblast, in the south and east of the Volgograd oblast, as well as in the south of the Saratov and Orenburg oblasts. In addition, it should be noted that this is *very likely* in this time period in the northeast of the Crimean Peninsula. For the climate of 2030-2039, in general, there is an

increase in confidence that the frequency of severe droughts exceeds 0.5. This is expected both in those areas of subjects of the Russian Federation, where confidence was already substantial in 1990-1999, and in some other areas and subjects of the Russian Federation. A significant expansion of such territories to the north can be noted in the Orenburg and Saratov oblasts up to the southern territories of the Chelyabinsk and Samara oblasts, as well as of the Republic of Bashkortostan. A noticeable expansion is also noted in the Volgograd and Rostov oblasts in the direction of the northwest and west up to the eastern border with the Voronezh oblast. A slight expansion is also noted in the Republics of Kalmykia and Dagestan up to the border with the Chechen Republic. In addition, an increase in confidence is noted in the south of Western Siberia: Altai Territory and Novosibirsk oblast. In the Crimean peninsula, a positive trend takes place in the north and east, while in its central part a slight improvement in the situation is seen. Under climate conditions 2050-2059, the similar changes are expected. However, they will be even more pronounced in all of the above subjects of the Russian Federation.

Keywords. Climate change, Russia, 21st century, drought, probabilistic assessment, cultivation of crops, suitability of territories.

Введение

Одним из экстремальных, опасных погодных явлений является засуха. Сохраняющиеся продолжительное время высокие уровни температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы и дефицит осадков приводят в различных временных масштабах к многообразным негативным последствиям для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения. В пределах сезона возникают лесные и степные пожары, горение торфяников, массовое усыхание сельскохозяйственных растений и связанные с ним потери урожая, массовое размножение некоторых вредителей сельскохозяйственных культур. Волны жары и повышенное загрязнение атмосферы продуктами горения создают дополнительные угрозы здоровью и даже жизни для некоторых групп населения, в частности, детей, пожилых людей, сельскохозяйственных рабочих. Возникают серьезные угрозы продовольственной безопасности. В табл. 1 приведены драматические цифры, характеризующие число жертв экстремальных засух, по данным ФАО (Продовольственная и Сельскохозяйственная Организация Объединенных Наций, <http://www.fao.org/3/mb738r/mb738r.pdf>).

В современной России засухи также составляют заметную проблему для производства продовольствия. Так, в 2020 г. режим чрезвычайной ситуации из-за засухи был объявлен в Алтайском крае, во многих районах Новосибирской и Челябинской областей. Проблемы с засухой возникали и в Республике Башкортостан, Омской, Волгоградской и Ростовской областях, в Ставропольском и Краснодарском краях. Наблюдаемое и ожидаемое в дальнейшем в XXI веке потепление глобального климата может привести к усилению засушливости (IPCC, 2019). Негативные тенденции отмечаются в том числе на территории России (Черенкова, 2017; Черенкова и др., 2020).

Таблица 1. Экстремальные засухи, 1900-2011 гг. *)

Table 1. Extreme droughts, 1900-2011 *)

Страна	Год	Число жертв, тыс. человек
Эфиопия	1983-1985	300
Судан	1982-1984	150
Эфиопия	1973	100
Индия	1965	1 500
Бангладеш	1943	1 900
Индия	1942	1 500
Китайская Народная Республика	1928	3 000
Советский Союз	1921	1 200
Китайская Народная Республика	1920	500
Индия	1900	1 250

*)Источник: "EM-DAT: OFDA/CRED Международная база данных по стихийным бедствиям", Католический университет Лёвена, Брюссель, Бельгия (<https://www.emdat.be/>).

Цель данной работы: используя критерий засушливости, оценить влияние изменения климата в среднесрочной перспективе и к середине XXI века на пригодность территорий в России для возделывания зерновых культур.

Данные и методы

Климатические данные

В работе используются данные о климате трех десятилетий: 1990-1999 гг., 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг.

Источником фактических данных о климате является массив CRU TS v.4.04 (Harris et al., 2020), созданный Отделом исследования климата (Climatic Research Unit, CRU) Университета Восточной Англии, Великобритания. На ИНТЕРНЕТ-ресурсе <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> в открытом доступе имеются данные, в том числе за период 1990-1999 гг., о значениях среднемесячной температуры в приповерхностном слое атмосферы и месячных сумм осадков. Это глобальные данные, представленные для узлов регулярной пространственной сетки $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Значения получены путем статистической обработки данных наблюдений на сети метеорологических станций.

Модельные оценки климата для территории Российской Федерации по пространственной сетке $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ предоставлены Климатическим центром Росгидромета (КЦР), см. <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/>. Они соответствуют сценарию RCP8.5 сильного антропогенного воздействия на климатическую систему Земли в XXI веке. Эти оценки характеризуют не только будущие периоды времени – 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг., – но и прошедший период 1990-1999 гг. Расчетные данные по каждому периоду представлены 50 траекториями, полученными в результате расчетов с помощью региональной климатической модели (РКМ), созданной в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) (см., например, (Школьник, Ефимов, 2015)).

При расчетах с помощью современных климатических моделей нет методологической возможности начинать расчет в точности с климата заданного начального периода времени (в данном случае 1990-1999 гг.). Начальный момент времени находится в отдаленном прошлом, что дает возможность модельной климатической системе со временем прийти в состояние, близкое к современному. Однако это состояние все же несколько отличается от фактического, хотя в данном случае это отличие незначительное – см. далее, раздел Дискуссионные вопросы. Мы использовали следующий алгоритм поправки модельных расчетных данных. Цель применения этой процедуры – привести в максимальное соответствие расчетный климат и фактический климат 1990-1999 гг. по тем переменным, которые используются в данной работе при последующих оценках воздействий на сельскохозяйственные системы (среднемесячные значения температуры и месячные суммы осадков).

Предварительно данные CRU были приведены к пространственной сетке КЦР. Заметим, что узлы сетки CRU являются одновременно узлами сетки КЦР. Сначала интерполяция выполнялась в узлы последней сетки, принадлежащие меридианам, проходящим через узлы сетки CRU. При этом использовалось среднее взвешенное значение в двух соседних узлах сетки CRU, принадлежащих тому же меридиану. Веса выбирались пропорциональными косинусам широт этих соседних узлов. Далее при интерполяции в узлы сетки КЦР, не принадлежащие этим меридианам, использовалось среднее арифметическое значений в двух соседних точках, принадлежащих той же параллели.

Таким образом, для точки пространства (в нашем случае – узла сетки КЦР) имеются две совокупности месячных данных о значениях температуры и суммы осадков, характеризующих I лет (например, десятилетие 1990-1999 гг.): $\{C_{ij}\}$ и $\{G_{ijl}\}$. В рассматриваемом случае C – данные массива CRU TS v.4.04, а G – расчетные данные КЦР. Здесь i – порядковый номер года (от 1 до I , в данном случае $I = 10$), j – порядковый номер месяца в календарном году (от 1 до 12), l – номер модельной траектории (от 1 до L , в данном случае $L = 50$).

Для температуры: вычисляются 12 поправок для значений температуры для каждого месяца календарного года

$$\Delta_j = [(C_{1j} - G_{1j*}) + (C_{2j} - G_{2j*}) + \dots + (C_{Ij} - G_{Ij*})] / I, j = 1, 2, \dots, 12,$$

где (*) означает арифметическое осреднение по L траекториям модели. Затем организуется поправленный (adjusted) массив $\{G^a_{ijl}\}$, $G^a_{ijl} = G_{ijl} + \Delta_j$.

Для коррекции значений, рассчитанных моделью РКМ для будущих периодов времени (например, 2030-2039 гг. или 2050-2059 гг.), используем те же 12 поправок $\Delta_j, j = 1, 2, \dots, 12$.

Для осадков: вычисляются 12 поправок для значений суммы осадков для каждого месяца календарного года ($j = 1, 2, \dots, 12$)

$$\delta_j = [(C_{1j} + C_{2j} + \dots + C_{Ij}) / I] / [(G_{1j*} + G_{2j*} + \dots + G_{Ij*}) / I],$$

где (*) означает арифметическое осреднение по L траекториям модели. Затем организуется поправленный массив $\{G^a_{ijl}\}$, $G^a_{ijl} = \delta_j G_{ijl}$.

Для коррекции значений, рассчитанных для будущих периодов времени (например, 2030-2039 гг. или 2050-2059 гг.), используем те же 12 поправок $\delta_j, j = 1, 2, \dots, 12$.

Исходный и поправленный массивы данных будут далее обозначаться соответственно 'климат КЦР8.5' и 'климат КЦР^a8.5'.

Критерий возникновения сильной засухи и оценка пригодности климата территории для возделывания зерновых культур

Для оценки засушливости вегетационного периода конкретного года используется гидротермический коэффициент Селянинова – ГТК (Селянинов, 1958). Поскольку явление засухи, существенно влияющее на продукцию растениеводства, наблюдается на территории России, в основном, в южных и центральных ее частях, то расчет значения гидротермического коэффициента проводится по следующей упрощенной формуле:

$$\text{ГТК}_{\text{май-август}} = \frac{(\text{сумма осадков, мм})}{0.1 (\text{сумма среднесуточных значений } t, ^\circ\text{C})}$$

То есть ГТК вычисляется, исходя из месячных сумм осадков и среднемесячных значений температуры за май-август. Последние значения легко находятся по результатам модельного расчета, поскольку эти результаты представлены в виде средних за месяц суточных сумм осадков (мм/сут) и средних за месяц значений среднесуточной температуры ($^\circ\text{C}$).

Считается, что в вегетационный период данного года произошла сильная засуха, если значение гидротермического коэффициента меньше 0.6 (Павлова и др., 2020). Обозначим вероятность этого события через p . В соответствии с (Правила..., 2015), климат территории считается неблагоприятным для возделывания зерновых культур, если $p > 0.5$. Истинное значение p для климата, соответствующего условиям заданного отрезка времени в I лет, неизвестно. Ему можно дать лишь вероятностную оценку, используя фактическое число лет из данных I , когда ГТК был меньше 0.6.

Предполагаем, что различные модельные траектории ($l = 1, \dots, L$) представляют независимые реализации климата временного отрезка в I лет ($i = 1, \dots, I$), а в пределах данной реализации события возникновения сильной засухи независимы в разные годы. Тогда, используя общее число лет во всех реализациях $N = I \times L$ (в данном случае $N = 500$) и число k лет, в которые в какой-либо реализации возникла сильная засуха, можно дать вероятностную оценку параметра p распределения Бернулли. А именно, можно найти такие $k_{\min}$, что при $k \geq k_{\min}$ гипотеза $p \leq 0.5$ отвергается. Алгоритм изложен в работе (Semenov et al., 2019). Вычисления выполнены для следующих значений вероятности ошибки ε этого заключения: 0.66, 0.33, 0.10 и 0.01. Тем самым, число k определяет, в каком из полуинтервалов (0.33, 0.66], (0.66,

0.90], (0.90, 0.99], (0.99, 1.00] находится $PR = 1 - \varepsilon$, т.е. «уверенность»¹⁾ в том, что значение p превосходит 0.5.

Следуя терминологии, принятой в МГЭИК, эти диапазоны словесно характеризуются соответственно следующим образом: ‘маловероятно’, ‘средне-вероятно’, ‘вероятно’, ‘весьма вероятно’, ‘практически достоверно’ (Mastrandrea et al., 2010).

Средства вычисления и картографирования

При вычислениях использовались Intel Visual Fortran и пакет MATLAB. Карты-схемы строились с помощью пакета QGIS.

Результаты

Для климата 1990-1999 гг., соответствующего результатам моделирования климата КЦР^a8.5, построена карта-схема, характеризующая уверенность в том, что частота p возникновения сильной засухи превосходит 0.5, что означает непригодность точки географического пространства для культивирования зерновых. Принятая шкала диапазонов для характеристики уверенности и соответствующее цветовое отображение приведены в табл. 2. Результаты картографирования представлены на рис. 1.

Таблица 2. Цветовое отображение и балльная оценка для уверенности PR в том, что частота сильной засухи $p > 0.5$ для климата 1990-1999 гг., соответствующего результатам моделирования КЦР^a8.5

Table 2. Color display and scoring for likelihood PR that frequency of severe drought $p > 0.5$ for the climate of 1990-1999 corresponding to the results of modeling КЦР^a8.5

Диапазон значений для $PR = 1 - \varepsilon$	Словесная характеристика *)	Цвет при картографическом отображении	Балл
$PR \leq 0.33$	Маловероятно	Белый	0
$0.33 < PR \leq 0.66$	Средне-вероятно	Желтый	1
$0.66 < PR \leq 0.90$	Вероятно	Темно-желтый	2
$0.90 < PR \leq 0.99$	Весьма вероятно	Коричневый	3
$0.99 < PR \leq 1.00$	Практически достоверно	Темно-коричневый	4

*) Соответствует принятой в МГЭИК (Mastrandrea et al., 2010)

Как видно на рис. 1, в условиях расчетного климата КЦР^a8.5 для 1990-1999 гг. на территории нескольких субъектов РФ отмечаются условия, при которых практически достоверно частота сильных засух p превосходит значение 0.5. Это означает непригодность для культивирования зерновых. Так, это обнаруживается практически на всей территории Астраханской области и Республики Калмыкия, на востоке Республики Дагестан и Ростовской области, на юге и востоке Волгоградской области, а также на юге Саратовской и Орен-

¹⁾ Исходный английский термин «likelihood», употреблявшийся в руководстве (Mastrandrea et al, 2010), здесь можно переводить так же, как «возможность» или «правдоподобие». Но эти варианты перевода неудобны при дальнейшем употреблении по-русски во многих контекстах.

бургской областей. Кроме этого, следует отметить, что это весьма вероятно в данный период времени на северо-востоке Крымского полуострова.

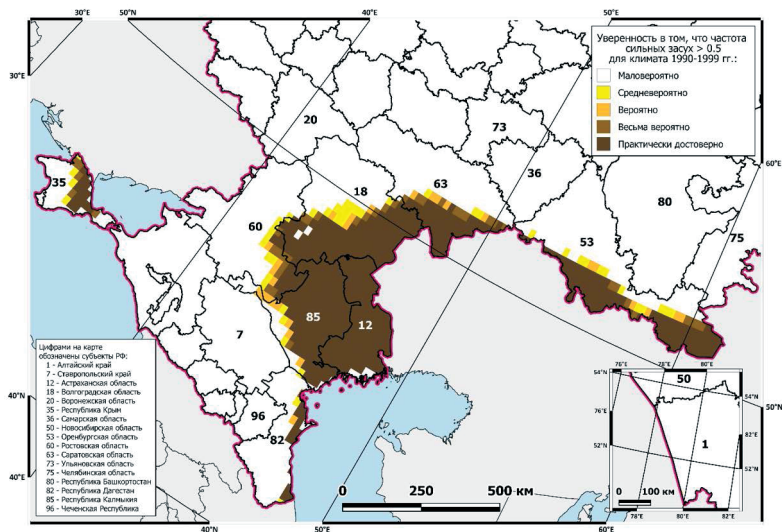


Рисунок 1. Пространственное распределение оценок уверенности в том, что точка географического пространства непригодна для культивирования зерновых (частота сильных засух $p > 0.5$); климат 1990-1999 гг., соответствующий результатам моделирования КЦР^а8.5
Figure 1. Spatial distribution of estimates of likelihood that a point of geographic space is unsuitable for the cultivation of grain crops (the frequency of severe droughts $p > 0.5$); climate of 1990-1999 corresponding to the results of modeling КЦР^а8.5

Для анализа ситуации в 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг. в сравнении с базовым периодом 1990-1999 гг., построены карты-схемы изменений балльных оценок уверенности в том, что частота возникновения сильной засухи $p > 0.5$, что, напомним, означает непригодность территории для культивирования зерновых. Словесные характеристики и цветовое отображение изменений балльных оценок приведены в табл. 3. Результаты представлены на рис. 2 (панели а и б).

Таблица 3. Словесные характеристики и цветовое отображение для изменения балльных оценок уверенности в том, что частота возникновения сильной засухи $p > 0.5$ (Семенов и др., 2020)

Table 3. Verbal characteristics and color display for changing the scores of likelihood that the frequency of severe drought p exceeds 0.5 (Semenov et al., 2020)

Изменение балльной оценки	Словесная характеристика		Цвет
4	Увеличение	Очень сильное	Фиолетовый
3		Сильное	Темно-красный
2		Среднее	Красный
1		Слабое	Розовый
0	Изменение не выявлено		Белый
-1	Уменьшение	Слабое	Салатовый
-2		Среднее	Светло-зеленый
-3		Сильное	Зеленый
-4		Очень сильное	Темно-зеленый

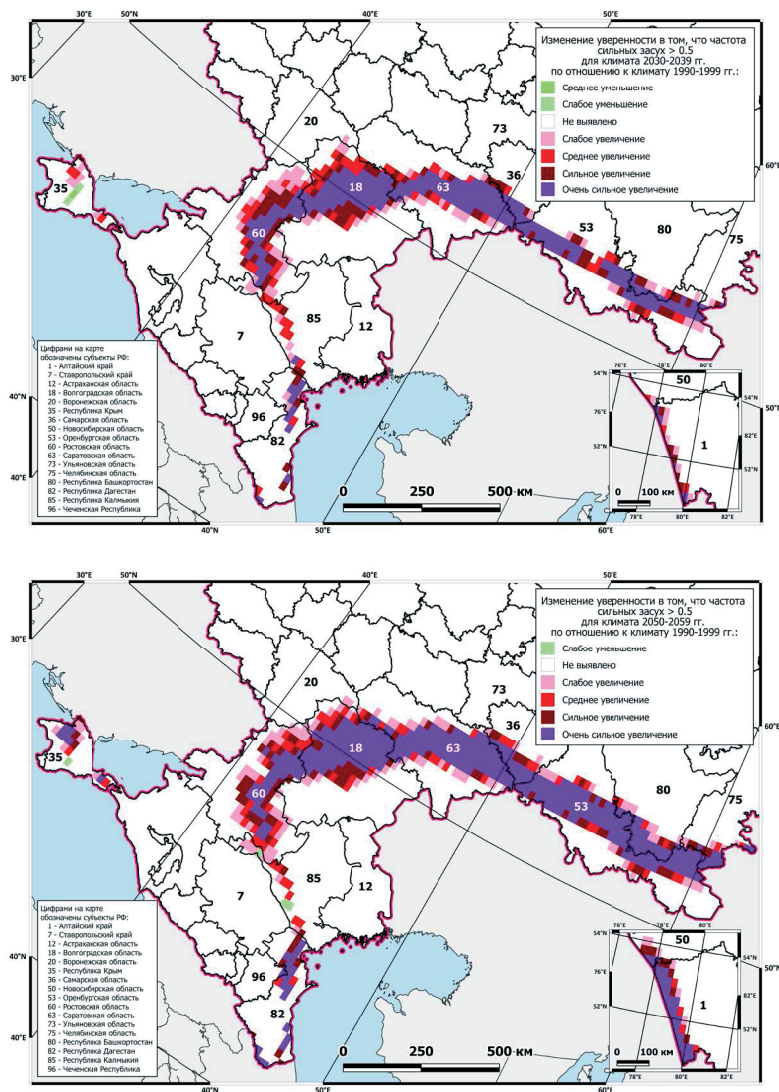


Рисунок 2. Пространственное распределение изменений балльных оценок уверенности в том, что точка географического пространства непригодна для культивирования зерновых (частота сильных засух $p > 0.5$): верхняя панель – 2030-2039 гг. vs. 1990-1999 гг; нижняя панель – 2050-2059 гг. vs. 1990-1999 гг. Климат соответствует результатам моделирования КЦР^a8.5

Figure 2. Spatial distribution of changes in the scores of likelihood that a point of geographic space is unsuitable for the cultivation of grain crops (frequency of severe droughts $p > 0.5$): upper panel – 2030-2039 vs. 1990-1999; lower panel – 2050-2059 vs. 1990-1999. Climate corresponds to the results of modeling КЦР^a8.5

Для климата 2030-2039 гг., в целом, отмечается возрастание уверенности в том, что частота сильных засух превосходит 0.5. Это ожидается как в тех районах субъектов РФ, где уверенность уже была значительная в 1990-1999 гг., так и в тех районах и субъектах РФ, где ранее это было маловероятно. Существенное расширение таких территорий к северу можно отметить в Оренбург-

ской и Саратовской областях вплоть до южных территорий Челябинской и Самарской областей, а также Республики Башкортостан. Заметное расширение отмечается и в Волгоградской и Ростовской областях в направлении северо-запада и запада вплоть до восточной границы с Воронежской областью. Небольшое расширение также заметно в Республиках Калмыкия и Дагестан до границы с Чеченской Республикой. Кроме этого, рост значения уверенности отмечается на юге Западной Сибири: в Алтайском крае и Новосибирской области. На Крымском полуострове положительная тенденция отмечается на севере и востоке полуострова, тогда как в центральной его части заметно небольшое улучшение ситуации.

В условиях климата 2050-2059 гг. ожидаются аналогичные изменения, однако они будут еще более выражены во всех перечисленных субъектах РФ.

Дискуссионные вопросы

Поправки результатов моделирования климата

В методологическом разделе описана процедура введения поправок в результаты моделирования климата. Здесь мы более подробно изложим мотивы введения таких поправок.

Рассмотрим две совокупности данных:

– $\{C_{ij}\}$ среднемесячные значения температуры за месяц j календарного года ($j = 1, 2, \dots, 12$) в годы $i = 1, 2, \dots, I$, полученные по результатам наблюдений;

– $\{G_{ijl}\}$ среднемесячные значения температуры за месяц j календарного года ($j = 1, 2, \dots, 12$) в годы $i = 1, 2, \dots, I$, полученные по результатам моделирования климата, где l – номер модельной траектории, $l = 1, 2, \dots, L$.

Далее, положим $X_j = G_{*j*} - C_{*j}$, где $(*)$ означает арифметическое осреднение по соответствующему индексу. Смысл X_j – различие в рассматриваемый период времени между климатическим значением среднемесячной температуры j -го месяца по результатам моделирования и по данным наблюдений. Для характеристики достоверности этого различия используются следующие статистики:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (c_{ij} - c_{*j})^2}{(I-1)}} ; \quad S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L (G_{ijl} - G_{*j*})^2}{(N-1)}} , \text{ где } N = I \times L$$

$$s_{dj} = \sqrt{\frac{(I-1) s_j^2 + (N-1) S_j^2}{I + N - 2}} ;$$

$$t_j = \frac{X_j}{s_{dj} \sqrt{\frac{1}{I} + \frac{1}{N}}} - \text{критерий Стьюдента.}$$

На рис. 3 для мая, июня, июля и августа ($j = 5, 6, 7, 8$) представлены карты-схемы пространственного распределения значений X_j . Штрихами отмечены области географического пространства, где модуль значения критерия Стьюдента $|t_j|$ превосходит 3.3 (при этом гипотеза о равенстве истинных климатических значений средней температуры j -го месяца в модели и по данным наблюдений отвергается на уровне значимости $\alpha = 0.001$).

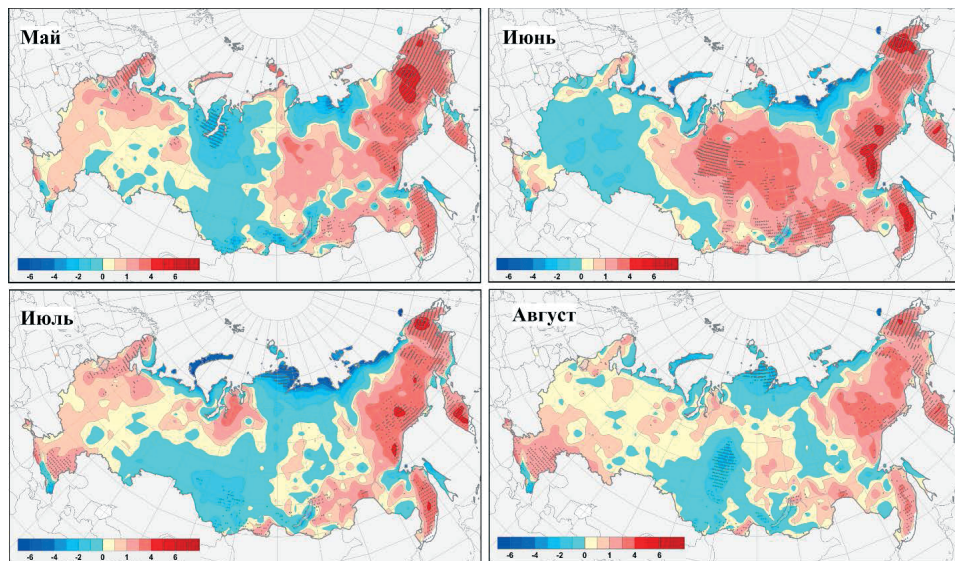


Рисунок 3. Распределение на территории России разности средних значений температуры (°C) мая, июня, июля и августа, рассчитанных по данным моделирования (КЦР8.5) и по данным наблюдений (CRU); штриховкой показаны области, в которых различие достоверно на уровне значимости $\alpha = 0.001$

Figure 3. Distribution over the territory of Russia of the difference in average temperature values (°C) in May, June, July and August, calculated, from modeling data (КЦР8.5) and from observational data (CRU); shaded areas show the areas in which the difference is significant at the level of $\alpha = 0.001$

Как видно на рис. 3, для каждого из рассматриваемых месяцев существуют обширные области географического пространства, где климатические значения температуры, оцененные по результатам моделирования (КЦР 8.5), достоверно отличаются от полученных по данным наблюдений (CRU).

Отметим, что для целей данной работы наиболее существенны те отличия, которые обнаружены на юге Европейской части России (ЕЧР), где расположены важные зернопроизводящие районы. Таким образом, описанные в методологическом разделе и использованные при расчетах поправки данных моделирования необходимы – они позволили элиминировать эти систематические различия.

Проведение сравнительного анализа

Для оценки пригодности территорий для культивирования зерновых культур в будущем выше использовались результаты моделирования климата 1990-1999 гг., 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг., поправленные с использованием

данных наблюдений за базовый период 1990-1999 гг. Цель введения поправок к результатам моделирования – элиминирование различий между климатами, соответствующими результатам модельного расчета и фактическим данным. Подчеркнем, что речь идет именно о климатах этих периодов, как если бы они сохранялись без изменений в будущем.

Возникает вопрос: с чем следует сравнивать полученные оценки пригодности территорий для будущих десятилетий 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг., а именно, с соответствующими оценками для базового периода, полученными с использованием поправленных результатов моделирования, или с полученными лишь по данным наблюдений? Считаем, что в подобных случаях для базового периода надо использовать именно поправленные результаты моделирования по следующей причине.

Климатическая модель (с учетом описанных выше поправок в результаты расчета) позволяет получить совокупность независимых реализаций климата для заданного периода времени, в том числе для базового периода. Поправки элиминируют систематические различия в климатических значениях тех переменных, которые используются для оценки пригодности территорий для культивирования зерновых. Поэтому, при значительном числе реализаций такую оценку можно получить с весьма большой точностью.

В то же время данные наблюдений предоставляют лишь одну траекторию для заданного периода времени, и основанные лишь на ней оценки пригодности будут значительно менее точны. Можно, конечно, ее добавить к совокупности модельных траекторий, но это лишь незначительно изменит результат, поскольку в рассматриваемом случае модельных траекторий значительное число – 50.

Заключение

При модельном описании распределения в географическом пространстве какого-либо климатогенного явления, т.е. зависящего от климата, часто используется техника «климатических предикторов». Это прикладные климатические индексы или же собственно значения гидрометеорологических переменных (Семенов и др., 2006). Рассматриваемому климатогенному явлению (например, засухе) соответствуют определенные диапазоны значений специфических для него климатических предикторов (для засухи – температуры и суммы осадков). Обычно используются средние значения температуры в приповерхностном слое или суммы осадков за определенный период года, число суток в году со средней температурой, превышающей заданный порог, суммы активных или эффективных температур за год, различные гидротермические коэффициенты.

Если при таких вычислениях использовать средние характеристики климата заданного периода времени (например, десятилетия), то в географическом пространстве определится область, где рассматриваемое явление имеет место при этом климате. Однако при таком подходе не характеризуется неопределенность в положении границы такой области. В работе (Семенов и др.,

2020) предложена модификация этого подхода, позволяющая оценивать неопределенность положения границы при анализе последствий наблюдаемых, фактических изменений климата.

В данной работе оценка возникновения явления (а именно засухи) для заданной точки географического пространства проводилась ежегодно для десятилетнего периода времени для каждой модельной траектории. Исходя из числа лет с засухой из десяти статистическим методом определялась степень уверенности (вероятности, *likelihood*) в том, что частота засух превышает 0.5 для климата, соответствующего данному десятилетию (что означает непригодность для возделывания зерновых культур). При таком подходе степень уверенности имеет несколько градаций – от «маловероятно» до «практически достоверно». При этом граница области, где возникает засуха, становится размытой (*fuzzy*), т.е. имеется возможность оценивать неопределенность ее положения.

Благодарности

Авторы признательны И.М. Школьникову за предоставление массива данных КЦР8.5 Климатического центра Росгидромета.

Авторы благодарны за поддержку следующим программам и проектам:

Темы НИР по Плану Фундаментальных научных исследований государственных академий наук № 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2 «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» (анализ концепции риска);

Тема 3.1. «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций» Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утвержденного приказом от 31.12.2019 № 745;

Список литературы

Павлова В.Н., Богданович А.Ю., Семенов С.М. (2020) Об оценке благоприятности климата для культивирования зерновых, исходя из частоты сильных засух. – *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 95-101.

«Правила отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям». (2015) Постановление Правительства РФ от 27.01.2015 № 51. Электронный ресурс. URL: <http://base.garant.ru/70853938/>.

Селянинов Г.Т. (1958) Принципы агроклиматического районирования территории СССР. – В кн.: *Вопросы агроклиматического районирования СССР*. – М., Изд. Минсельхоза СССР, с. 7-14.

Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. (2006) *Выявление климатогенных изменений*. – М., Издательский центр «Метеорология и гидрология», 324 с.

Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. (2020) Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата. – *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 59-65.

Черенкова Е.А. (2017) Опасная атмосферная засуха на Европейской части России в условиях современного летнего потепления. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 130-143, doi: 10.21513/2410-8758-2017-2-130-143.

Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семёнов В.А. (2020) Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины. – *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-19.

Школьник И.М., Ефимов С.В. (2015) Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии. – *Труды ГГО*, вып. 5766, с. 201-211.

Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P.D., Lister, D. (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 7, Article number:109, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3/>.

IPCC, (2019) *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers*, 41 p., available at: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.

Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W. (2010) Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties, *IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties*. – Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010, *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, available at: <http://www.ipcc.ch>.

Semenov, S.M., Insarov, G.E., Mndez, C.L. (2019) Characterization of uncertainties in assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 103-119, doi: 10.21513/2410-8758-2019-2-103-119.

References

Pavlova, V.N., Bogdanovich, A.Yu., Semenov, S.M. (2020) Ob otsenke blagopriyatnosti klimata dlya kul'tivirovaniya zernovykh, iskhodya iz chastoty sil'nykh zasukh [Assessment of Climate Favorability for the Grain Cultivation Based on the Frequency of Severe Droughts], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 95-101.

«Pravila otneseniya territoriy k neblagopriyatnym dlya proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii territoriyam» ["Rules for assigning territories to

territories unfavorable for the production of agricultural products"], postanovleniye Pravitel'stva RF ot 27.01.2015 no. 51, available at: <http://base.garant.ru/70853938/>.

Selyaninov, G.T. (1958) Printsipy agroklimaticheskogo rayonirovaniya territorii SSSR [Principles of agroclimatic zoning of the territory of the USSR]. *Voprosy agroklimaticheskogo rayonirovaniya SSSR* [Questions of agroclimatic zoning of the USSR], Izd. Minsel'khoza SSSR, Moscow, Russia, pp. 7-14.

Semenov, S.M., Yasyukevich, V.V., Gel'ver, Ye.S. (2006) *Iyyavleniye klimatogennykh izmeneniy* [Identification of climatogenic changes], Izdatel'skiy tsentr Meteorologiya i gidrologiya, Moscow, Russia, 324 p.

Semenov, S.M., Popov, I.O., Yasyukevich, V.V. (2020) Statisticheskaya model' dlya otsenki formirovaniya klimatogennykh ugroz po dannym monitoringa klimata [Statistical Model for Assessing the Formation of Climate-related Hazards Based on Climate Monitoring Data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 59-65.

Cherenkova, Ye.A. (2017) Opasnaya atmosfernaya zasukha na Yevropeyskoy chasti Rossii v usloviyakh sovremennogo letnego potepleniya [Dangerous atmospheric drought in European Russia under recent summer warming], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 130-143, doi: 10.21513/2410-8758-2017-2-130-143.

Cherenkova, Ye.A., Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Semonov, V.A. (2020) Vliyaniye dolgoperiodnoy izmenchivosti temperatury poverkhnosti okeana v Severnoy Atlantike i izmeneniy atmosfernoy tsirkulyatsii na povtoryayemost' sil'nykh atmosferynykh zasukh letom na yuge Vostochno-Yevropeyskoy ravniny [Influence of long-term variability of ocean surface temperature in the North Atlantic and changes in atmospheric circulation on the recurrence of severe atmospheric droughts in summer in the south of the East European Plain], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-19.

Shkol'nik, I.M., Yefimov, S.V. (2015) Regional'naya model' novogo pokoleniya dlya territorii severnoy Yevrazii [A regional model of a new generation for the territory of northern Eurasia], *Trudy GGO*, issue 576, pp. 201-211.

Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P.D., Lister, D. (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 7, Article number: 109, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3/>.

IPCC, (2019) *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers*, 41 p., available at: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.

Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W. (2010) Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties, *IPCC Cross-Working*

Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. – Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), available at: <http://www.ipcc.ch>.

Semenov, S.M., Insarov, G.E., Méndez, C.L. (2019) Characterization of uncertainties in assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 103-119, doi: 10.21513/2410-8758-2019-2-103-119.

Статья поступила в редакцию (Received): 05.03.2021;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 25.03.2021;

Принята к публикации (Accepted): 06.05.2021.

Для цитирования / For citation:

Богданович А.Ю., Павлова В.Н., Ранькова Э.Я., Семенов С.М. (2021) Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 1, с. 20-35. DOI:10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.

Bogdanovich A.Yu., Pavlova V.N., Rankova E.Ya., Semenov S.M. (2021) Influence of changes in aridity in Russia in the XXIst century on the suitability of territories for the cultivation of grain crops. – *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 1, pp. 20-35. DOI:10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.