

УЯЗВИМОСТЬ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР К ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И ВАРИАНТЫ АДАПТАЦИИ

© 2021 г. М. В. Николаев*

Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт Петербург, Россия

**E-mail: clenrusa@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2020 г.

После доработки 17.05.2021 г.

Принята к публикации 20.05.2021 г.

Оценивается воздействие избытка атмосферной влаги на устойчивость растениеводства при ожидаемом в ближайшем будущем изменении климата в Нечерноземье Европейской России. Акцент сделан на полевых культурах, так как они имеют важное продовольственное значение и являются кормовой базой для ведения молочного животноводства. Их уязвимость к переувлажнению охарактеризована повторяемостью лет со значениями гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова (ГТК), превышающими 1.8, которые соответствуют внешним условиям для возникновения полегания. С использованием транзитивных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), обладающих полнотой описания физических механизмов и связей внутри модельных блоков, оценено изменение температуры воздуха, количества осадков и значений ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. Показано, что при реализации сценария контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу, отвечающего инициативам ООН для обеспечения устойчивого развития до 2030 г., наиболее уязвимой к эффектам переувлажнения оказывается северная часть Нечерноземья Европейской России. Появление резкого переувлажнения посевов также может иметь место и в средней части этой зоны. Обсуждается ряд адаптационных мер и стратегий, направленных на смягчение негативных проявлений изменения климата.

Ключевые слова: Нечерноземье Европейской России, полевые культуры, переувлажнение, транзитивные МОЦАО, оценка уязвимости, варианты адаптации

DOI: 10.31857/S0869607121040030

ВВЕДЕНИЕ

Высокоурожайные полевые культуры – продовольственные (озимая пшеница и озимая рожь), зернофуражные (озимый райграс, некоторые сорта пшеницы и ржи), силосные (кукуруза и подсолнечник на зеленую массу) и стеблевые сеяные травы на сенаж в силу их морфометрических параметров часто подвержены полеганию в избыточно влажных условиях, возникающих в Нечерноземье Европейской территории России (ЕТР) [18]. Переход на короткостебельные виды и сорта лишь отчасти обеспечивает достижение высоких и устойчивых урожаев, поскольку их биологическая продуктивность ниже: например, продуктивность травостоев из клевера и люцерны уступает продуктивности стеблевых злаковых травостоев более чем в два раза [5].

В то же время, многие из перечисленных культур составляют ценную кормовую базу для ведения молочного животноводства, обеспечивающего население высококачественной молочной продукцией. Прослеживающееся повышение температурного фо-

на служит фактором, способствующим продвижению к северу посевов высокоурожайных культур и, следовательно, увеличению потенциала продуктивности сельскохозяйственных земель. Но в целом лимитирующими факторами для выращивания зерновых и кормовых культур в этой зоне, с одной стороны, остаются ограниченные ресурсы тепла, с другой – погодные условия, приводящие к избытку атмосферной влаги. Поэтому по агроклиматической классификации Г.Т.Селянинова, Нечерноземье ЕТР отнесено к зоне избыточного увлажнения со значениями ГТК ≥ 1.3 [21]. Приведенный по данным З.А. Шостак в [23] анализ типов погод в Нечерноземье ЕТР показал, что для озимой ржи в период ее созревания (июль) оптимальное количество осадков составляет 30 мм при средней температуре воздуха около 17.0°C , а для мягкой озимой пшеницы такими показателями являются: сумма осадков 50 мм и средняя температура воздуха немногим выше 16.0°C . Согласно данным из агроклиматических справочников, у силосных культур интенсивное листообразование происходит в июле при средней температуре воздуха от 16.5 до 19.0°C , а интенсивный рост стебля сенажных трав при средней температуре воздуха от 16.5 до 17.5°C , в обоих случаях при осадках от 40 до 50 мм [1]. То есть оптимум условий в период формирования урожая культур лежит в пределах $0.7 < \text{ГТК VII} < 1.1$.

Однако при нарастающих изменениях климата потери их урожая из-за продолжительных и обильных дождей становятся сопоставимыми с потерями от появления без дождей¹, но при этом существенно снижается и качество полученного урожая [3, 14, 23, 34]. Далее приводимые оценки показывают, что в ожидаемых климатических условиях уязвимость полевых культур к эффектам переувлажнения может возрасти. Поэтому понадобится применение комплекса адаптационных мер, чтобы обеспечить устойчивое производство растениеводческой продукции и сведение к минимуму ущерба от негативных проявлений изменения климата.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах Нечерноземья ЕТР выбрано десять станций, относящихся к хвойно-широколиственно-лесной (Трубчевск), южно-таежно-лесной (Смоленск, Псков, Кострома и Вологда) и средне-таежно-лесной (Вытегра, Петрозаводск, Шенкурск, Котлас и Сыктывкар) зонам согласно природно-сельскохозяйственному районированию территории России [19]. Длительные метеорологические наблюдения на этих станциях обеспечили возможность составить непрерывные ряды средних месячных значений температуры воздуха и помесечных сумм осадков с 1945 по 2017 гг. На их основе рассчитаны значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова [21], рекомендуемого Росгидрометом и ВМО для проведения агроклиматических исследований и представляемого в общем виде:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum P}{0.1 \sum T},$$

где: $\sum P$ – сумма выпавших осадков (мм) и $\sum T$ – сумма температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за период (или отрезок вегетации) со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C .

Для оценки отрицательного воздействия избыточного увлажнения на посевы удобно воспользоваться значениями ГТК, превышающими его среднюю многолетнюю величину. По долговременным обследованиям состояния посевов установлено, что надежным индикатором условий возникновения их корнево-стеблевого полегания слу-

¹ В условиях Нечерноземья ЕТР бездождья непродолжительны, и при их появлении происходит иссушение верхнего слоя почвы, тогда как в нижних слоях запасы влаги остаются высокими. Устранение отрицательного воздействия бездождий на растения достигается орошением. В то же время, затяжные дожди или ливни могут приводить к снижению урожая (относительно средней его величины) для сеяных трав на 25–35%, для озимых колосовых на 40–60%, а для гибридов кукурузы в отдельные годы на 80%.

жит пороговое значение ГТК = 1.8 [18]. Следуя этому критерию, а также исходя из сравнения значений ГТК в июле, когда формируется конечный урожай мелкозернистых озимых злаков и происходит интенсивное накопление зеленой массы силосных и сенажных культур, для характеристики степени полегания нами разработаны градации ГТК: $1.8 < \text{ГТК VII} \leq 2.5$ – выраженное полегание; $2.5 < \text{ГТК VII} \leq 3.5$ – сильное полегание; $3.5 < \text{ГТК VII} \leq 4.5$ – очень сильное полегание [15]. Градации отражают усиливающееся воздействие обильных осадков на степень полегания культур из-за возникновения условий, которые одновременно приводят к разжиженному состоянию поверхности почвы и увеличению механической нагрузки на стебель. Такому состоянию почвы способствует преобладание суглинистых почв со свойственной им слабой водопроницаемостью и часто близкое к поверхности расположение зеркала грунтовых вод [20].

Эмпирический анализ данных с применением математических методов их обработки позволил выявить наблюдаемые тенденции в изменении температуры воздуха и количества осадков в теплое время года в пределах Нечерноземья ЕТР. Так, в изменяющемся климате наблюдается увеличение средней месячной температуры воздуха в июле. Для временного отрезка 1982–2017 гг. (по сравнению с временным отрезком 1945–1981 гг.) такое увеличение для выбранных станций составляет от 0.6 до 1.3°C, тогда как для других летних месяцев отличия в средних значениях температур менее выражены. Для станций также проведено сравнение хода 7-летних скользящих средних значений температуры воздуха в июле за весь рассматриваемый период. Такое сравнение показало, что условия тепло-обеспеченности на северных станциях в последние два десятилетия приближаются к условиям теплообеспеченности на более южных станциях в ранние десятилетия. Например, по величине сумм температур условия в Петрозаводске приближаются к условиям в Костроме, в Вытегре к условиям в Смоленске, а в Пскове к условиям в Трубчевске [17].

Вместе с тем, в Нечерноземье ЕТР отмечается учащение экстремально высокого количества выпадающих осадков, включая июльские их суммы, из-за усиления циклонической активности в северной Атлантике [7–10, 29]. Это находит преломление в наблюдаемом расширении территорий, подверженных атмосферному переувлажнению и изменении их конфигурации [11, 13]. Сопоставление гистограмм отклонений сумм сезонных осадков от тренда показало, что такие гистограммы для летних осадков в последующие после 1979 г. десятилетия отличаются положительной асимметрией, а рост величины стандартного отклонения обусловлен возрастающей частотой экстремально высоких их сумм [15]. С помощью функционального анализа, при котором ГТК представляется в виде функции от двух переменных, выявлен усиливающийся вклад обильных осадков в высокие значения ГТК в июле по сравнению с вкладом сумм температур. В свою очередь, это проявляется в увеличении тесноты регрессионных связей между возрастающими суммами июльских осадков и высокими значениями ГТК вследствие снижения остаточной дисперсии [17]. Однако в северной части Нечерноземья ЕТР очень высокие значения ГТК за июль фиксируются при суммах температур заметно выше их средних многолетних показателей [16]. Из сводных таблиц, помещенных в [15, 17], также следует, что процент лет с эффектами сильного и очень сильного полегания, отвечающими пороговым значениям ГТК выше 2.5 и 3.5, значительно возрос в среднетаежной зоне, для которой характерны подзолистые суглинистые почвы с признаками оглеения.

Оценка ожидаемой повторяемости переувлажнения посевов в следующем десятилетии основывается на результатах численного моделирования климата по транзитивным моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). При выборе МОЦАО предпочтение отдано таковым, которые отличаются полнотой описания физических механизмов и связей внутри модельных блоков. Отметим, что такими качествами обладают семейства моделей, созданных в известных центрах моделирования

глобального климата – Метеорологическом отделении Института им. М. Планка (Германия), Метеорологическом офисе Центра им. Дж. Хэдли (Великобритания) и Канадском центре климатического моделирования и анализа, а также модель Европейского Сообщества Earth3, широко применяемая в странах Европы в последние годы. Размеры и форма ячеек регулярных сеток моделей несколько отличаются. Последние версии моделей Института им. М. Планка имеют размер ячейки регулярных сеток по градусам широты и долготы $0.935^\circ \times 0.9375^\circ$; Канадского центра – $2.79^\circ \times 2.8125^\circ$; Центра им. Дж. Хэдли – $1.25^\circ \times 1.875^\circ$ (вытянутая ячейка). У европейской модели размер ячейки наименьший и составляет $0.702^\circ \times 0.703^\circ$. Между тем, использование моделей, созданных в других странах мира, оказывается затруднительным, так как их регулярные сетки лишь частично покрывают исследуемую нами территорию: например, модель CESM2 – WACCM Национального центра атмосферных исследований (NCAR, США), модель ACCESS – ESM1.5 Организации Содружества Научных и Индустриальных Исследований (CSIRO, Австралия) и модель MRI – ESM-2-0 Метеорологического научно-исследовательского института (Meteorological Agency, Япония).

Подробное описание выбранных моделей приводится в [30–32, 35]. Интерполяция модельных оценок из узлов регулярных сеток моделей в координаты станций осуществлена с помощью билинейной интерполяции. Модельные оценки отнесены для сценария контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу RCP4.5² [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования привлечены результаты численного моделирования полей температуры воздуха и осадков по недавно созданным моделям и их модельным экспериментам, а именно:

- MPI – ESM1-2 – HR (модель Института им. М. Планка, модельные эксперименты 1 и 2);
- Had GEM3- GC31 – LL (модель Центра им. Дж. Хэдли, модельный эксперимент 1);
- EC – Earth3 (модель Европейского Сообщества, модельные эксперименты 9 и 15);
- Can ESM5 (модель Канадского центра климатического моделирования и анализа, модельные эксперименты 14, 23).

Предпочтение в выборе конкретных модельных экспериментов обусловлено полнотой представления оценок в моделируемых рядах текущего климата (1945–2014 гг.), достаточной длительностью моделируемых рядов на перспективу и очень незначительными, но все же существующими различиями в вариантах описания физических связей в модельных блоках. По британской модели пока выполнен один эксперимент, который позволяет получить оценки на перспективу после 2020 г. Но он дает возможность оценить значения температуры воздуха и ГТК в Смоленске и Трубчевске только для 6 лет внутри десятилетия 2021–2030 гг. по причине пропусков данных о температуре в узлах регулярной сетки. Так как по модели MPI – ESM1-2 – HR представлены результаты только двух экспериментов, для сбалансированности получаемых оценок также выбрано по два эксперимента по моделям EC – Earth3 и Can ESM5, но исходя из упомянутых выше критериев их отбора. Иначе говоря, какой-либо из моделей изначально не отдается приоритета.

Процедуру построения и обработки моделируемых временных рядов иллюстрирует рис. 1. В качестве примера выбрана станция Петрозаводск. На рисунке показаны ход

² Сценарий контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу предполагает движение мирового сообщества по “Общему социально-экономический пути 5” (“Shared Socioeconomic Pathway 5” – SSP 245). Согласно этому сценарию, стремление к устойчивому развитию основывается на инновациях, способствующих быстрому технологическому прогрессу, и инвестициях в здравоохранение и образование в сочетании с эксплуатацией ресурсов ископаемого топлива и принятием ресурсоемкого и энергоемкого образа жизни во всем мире.

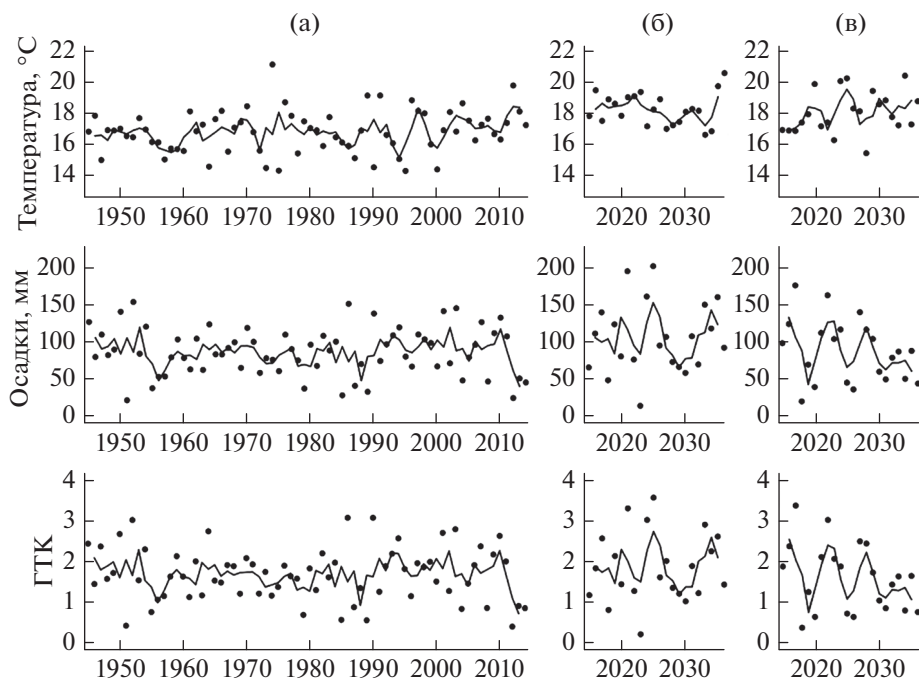


Рис. 1. Тенденции в изменении и вариабельности средней месячной температуры воздуха, количества осадков и значений ГТК в июле в Петрозаводске, оцененные по модели MPI – ESM1-2-HR (Институт им. М. Планка), и их проекции исходя из сценария контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу. а – смоделированные ряды с 1945 по 2014 гг.; б – проекция на 2015–2036 гг. по модельному эксперименту 1; в – проекция на 2015–2036 гг. по модельному эксперименту 2; точки – ежегодные оценки; линии – 3-летние скользящие средние оценки.

Fig. 1. Trends in change and variability of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Petrozavodsk simulated by MPI – ESM1-2-HR model (Max Planck Institute) and their projections according to the scenario of controlled greenhouse gas emission into the atmosphere. а – modeled series since 1945 till 2014; б – projection from 2015 to 2036 by model run 1; в – projection from 2015 to 2036 by model run 2; dots – year to year estimates; lines – 3-yr moving average estimates.

переменных моделируемого текущего климата и их проекция для климата ближайшего будущего, настроенная на эмиссионный сценарий контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу. Проекция получена по двум модельным экспериментам (1 и 2) с привлечением модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR. Тенденции в изменении и вариабельности климатических переменных более наглядно прослеживаются в динамике 3-летних скользящих средних, изображаемых на графиках в виде пилообразных линий.

Результаты обоих экспериментов показывают, что условия увлажнения в июле в Петрозаводске на десятилетия 2021–2030 гг. становятся более экстремальными по сравнению с 70-летним периодом с 1945 по 2014 гг., но с преобладанием “выбросов” в сторону очень высоких сумм осадков и значений ГТК при повышающемся температурном фоне.

Поскольку модельные эксперименты основаны на единых физических принципах описания связей в модельных блоках, а в рядах климатических переменных присут-

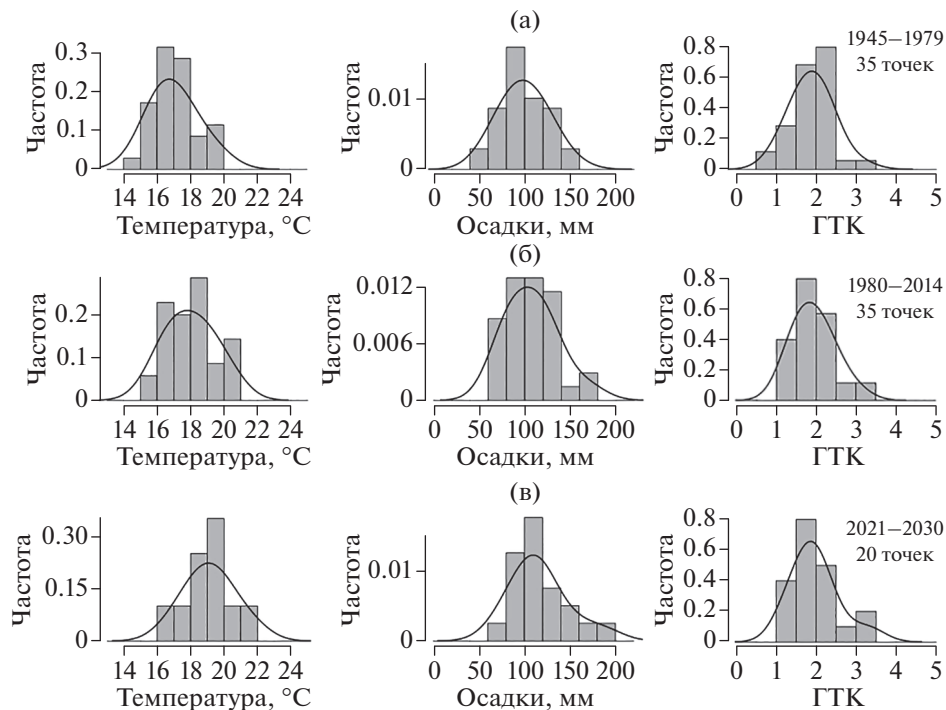


Рис. 2. Гистограммы распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле для станции Котлас, полученные по модели Can ESM5 (Канадский центр климатического моделирования и анализа): а – период 1945–1979 гг.; б – период 1980–2014 гг.; в – десятилетие 2021–2030 гг. (объединение экспериментов 14 и 23).

Fig. 2. Histograms of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Kotlas based on the simulation by Can ESM5 model (Canadian Center for Climate Modelling and Analysis): а – interval 1945–1979; б – interval 1980–2014; в – slice 2021–2030 (conjunction of run 14 and run 23).

стует стохастичность, целесообразно объединить результаты экспериментов для каждой модели, тем самым увеличив количество случаев, и представить оценки в вероятностной интерпретации. На рис. 2–4 изображены гистограммы (с их сглаженным методом свертки видом) смоделированных оценок для двух периодов, отличающихся по степени антропогенного влияния на климат [2, 4, 6, 24] и для десятилетия 2021–2030 гг. с учетом выбранного эмиссионного сценария. Примеры расчетов взяты произвольно, но таким образом, чтобы наглядно продемонстрировать оценки по разным моделям, охватив всю природно-сельскохозяйственную зональность Нечерноземья ЕТР.

На рис. 2 приведены гистограммы смоделированных для периодов 1945–1979 гг., 1980–2014 гг. и десятилетия 2021–2030 гг. распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 для станции Котлас (среднетаежная зона). Распределения для десятилетия 2021–2030 гг. построены путем объединения результатов двух модельных экспериментов – 14 и 23.

Из графиков видно, что распределения средней месячной температуры воздуха в июле для всех трех временных отрезков имеют почти симметричный вид, но при смещении моды в сторону более высокой температуры с появлением диапазона температурного максимума для десятилетия 2021–2030 гг. В распределении количества осад-

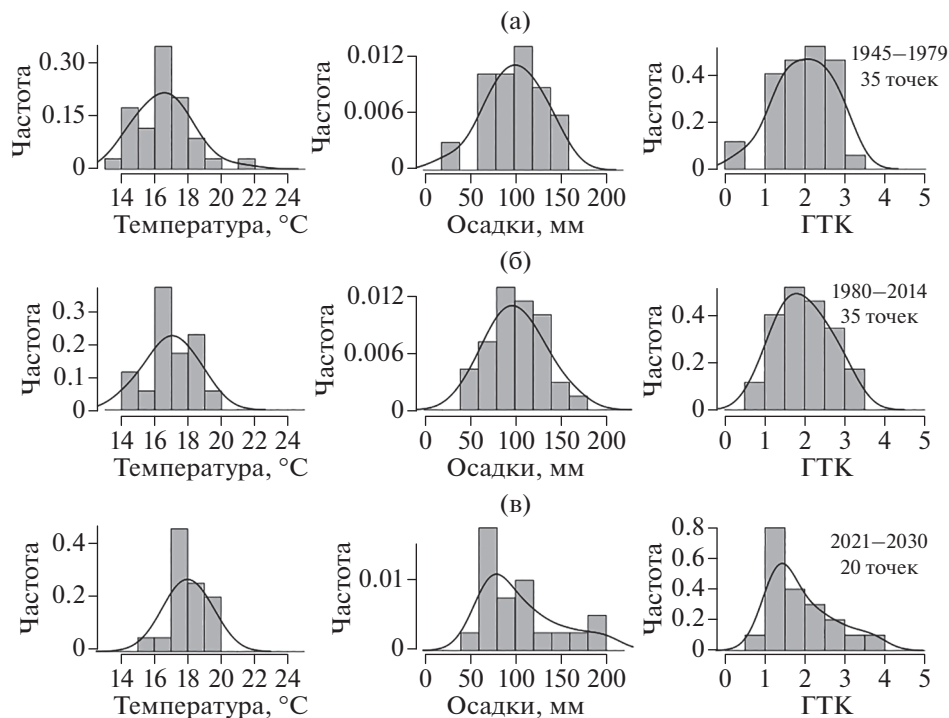


Рис. 3. Гистограммы распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле для станции Вологда, полученные по модели MPI – ESM1-2-HR (Институт им. М. Планка): а – период 1945–1979 гг.; б – период 1980–2014 гг.; в – десятилетие 2021–2030 гг. (объединение экспериментов 1 и 2).

Fig. 3. Histograms of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Vologda based on the simulation by MPI – ESM1-2-HR model (Max Planck Institute): а – interval 1945–1979; б – interval 1980–2014; в – slice 2021–2030 (conjunction of run 1 and run 2).

ков для периода 1980–2014 гг. прослеживается асимметрия в сторону их увеличения. Такая асимметрия становится выраженной для десятилетия 2021–2030 гг. с одновременным появлением диапазона очень высоких сумм июльских осадков. Для распределения ГТК на этом же временном отрезке характерно заметное увеличение частоты экстремально высоких значений ГТК (до 0.2). Для периодов 1945–1979 и 1980–2014 гг. их частота соответственно составляет 0.07 и 0.1.

Нужно отметить, что характер распределений отражает изменяющийся во времени вклад влажностного и термического факторов в величину экстремально высоких значений ГТК, и это подтверждается из данных наблюдений. Так, на станции Котлас в течение периода 1945–1979 гг. экстремально высокое значение ГТК = 4.18 в июле 1951 г. фиксируется при сумме температур, равной 450°C (85% средней многолетней величины) и сумме осадков, равной 188 мм (261% нормы). В течение периода 1980–2014 гг. экстремально высокое значение ГТК = 4.14 в июле 2000 г. достигается при сумме температур, равной 603°C (113% средней многолетней величины), и сумме осадков, равной 250 мм (347% нормы). Увеличение количества осадков на повышенном термическом фоне по сравнению с их количеством на пониженном термическом фоне, по-видимому, объяснимо дополнительным вкладом конвекции. Но все же роль адвективных

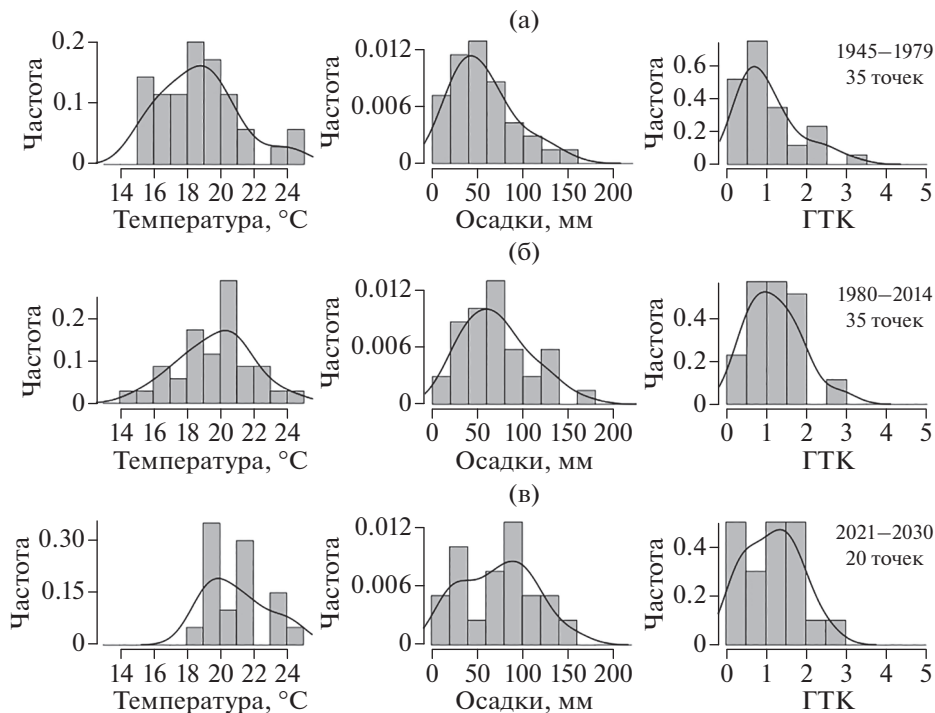


Рис. 4. Гистограммы распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле для станции Трубчевск, полученные по модели EC – Earth3 (Европейское Сообщество): а – период 1945–1979 гг.; б – период 1980–2014 гг.; в – десятилетие 2021–2030 гг. (объединение экспериментов 9 и 15).

Fig. 4. Histograms of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Trubchevsk based on the simulation by EC–Earth3 model (European Community): а – interval 1945–1979; б – interval 1980–2014; в – slice 2021–2030 (conjunction of run 9 and run 15).

осадков, обусловленных циклоничностью, остается определяющей, поскольку высокие значения ГТК в июле чаще отмечаются на пониженном термическом фоне.

Аналогичным образом, на рис. 3 показаны гистограммы смоделированных распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле по модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2-HR для станции Вологда (южно-таежно-лесная зона) с объединением для десятилетия 2021–2030 гг. результатов двух модельных экспериментов – 1 и 2.

В распределениях средней месячной температуры воздуха в июле также выявляется смещение моды в сторону более высокой температуры. Все распределения количества осадков показывают увеличение частоты высоких июльских осадков, а для десятилетия 2021–2030 гг. вероятность появления очень высоких сумм осадков. Это также отражается и в асимметрии распределения значений ГТК в июле для десятилетия 2021–2030 гг. с появлением диапазона значений ГТК > 3.5 , характеризующегося вероятностью 0.1.

По данным наблюдений в течение периода 1945–1979 гг. появление экстремально высокого значения ГТК = 3.06 в июле 1954 г. соответствовало сумме температур 588°C (111% средней многолетней величины) и сумме осадков 180 мм (247% нормы). В течение периода 1980–2014 гг. экстремально высокое значение ГТК = 3.18 в июле 1998 г.

отвечало сумме температур 516°C (99% средней многолетней величины) и сумме осадков 165 мм (226% нормы).

Рис. 4 иллюстрирует гистограммы смоделированных распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле по модели Европейского Сообщества ЕС – Earth3 для станции Трубчевск (зона хвойно-широколиственных лесов) с объединением для десятилетия 2021–2030 гг. результатов двух модельных экспериментов – 9 и 15.

В распределениях средней месячной температуры воздуха в июле в целом присутствует смещение моды в сторону более высокой температуры. Однако вид гистограммы для периода 1980–2014 гг. существенно отличается от ее вида для десятилетия 2021–2030 гг. В первом случае наблюдается преобладание диапазонов с температурой воздуха ниже 20°C , тогда как во втором случае, наоборот – с температурой воздуха выше 20°C при отсутствии диапазонов с температурой воздуха ниже 18°C . Распределения количества июльских осадков показывают смещение моды в сторону высоких их сумм при прослеживаемой бимодальности для десятилетия 2021–2030 гг. за счет заметного увеличения частоты сумм осадков в диапазоне от 20 до 40 мм и в диапазоне от 80 до 100 мм. Распределение ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. имеет более плоскую вершину вследствие равенства частот для диапазонов $\text{ГТК} < 0.5$ и $1.0 < \text{ГТК} < 2.0$.

В течение периода 1945–1979 гг. экстремально высокое значение $\text{ГТК} = 3.31$ в июле 1979 г. отмечалось при сумме температур, равной 477°C (83% средней многолетней величины), и сумме осадков, равной 158 мм (193% нормы). В течение периода 1980–2014 гг. экстремально высокое значение $\text{ГТК} = 3.55$ в июле 1984 г. соответствовало сумме температур, равной 489°C (85% средней многолетней величины), и сумме осадков, равной 174 мм (212% нормы). Близкое количество осадков, равное 170 мм, также наблюдалось в июле 1999 г., но при сумме температур, равной 642°C (111% средней многолетней величины).

На повышающемся температурном фоне тенденции к росту частоты высоких осадков и значений ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. (по сравнению с предшествующими двумя 35-летними периодами) прослеживаются и для других станций. Так, по модели Can ESM5 для Шенкурска обнаруживается появление дополнительного диапазона осадков от 200 до 220 мм и значений ГТК от 3.5 до 4.0 (при вероятности 0.1). По модели MPI – ESM1-2-HR для Петрозаводска предсказывается появление двух дополнительных диапазонов осадков от 180 до 200 мм и от 200 до 220 мм и значений ГТК от 3.0 до 3.5 (при вероятности 0.3) и от 3.5 до 4.0 (при вероятности 0.1). По модели ЕС–Earth3: для Сыктывкара прогнозируется появление дополнительного диапазона осадков от 180 до 200 мм и увеличение частоты значений ГТК от 3.0 до 3.5 (при вероятности 0.3); для Вытегры – увеличение частоты осадков в диапазоне от 140 до 160 мм и значений ГТК от 2.0 до 2.5 (при вероятности 0.5); для Костромы – увеличение частоты осадков в диапазоне от 120 до 140 мм и значений ГТК от 2.0 до 2.5 (при вероятности 0.4).

Но ряд модельных экспериментов не позволяет выявить тенденции к росту частоты высоких сумм осадков и значений ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. Например, по модели Had GEM3-GC3.1 – LL в Вологде предсказывается учащение сумм осадков в диапазоне от 60 до 80 мм и значений ГТК от 1.0 до 1.5 (при вероятности 0.7). Модель Can ESM5 для Пскова выявляет рост повторяемости еще более низких сумм осадков в диапазоне от 40 до 60 мм и значений ГТК от 0.5 до 1.0 (при вероятности 0.8). Модель MPI – ESM1-2-HR для Трубчевска также показывает учащение повторяемости сумм осадков в диапазоне от 40 до 60 мм и значений ГТК от 0.5 до 1.0 (при вероятности 0.5).

Для того, чтобы судить о достоинствах или недостатках каждой модели, которые состоят в степени отличия описываемого текущего климата от действительного, осуществлена верификация выбранных моделей. Для оценки точности воспроизведения моделями характеристик реального климата в табл. 1–3 приведены разности между

смоделированными и фактическими значениями осредненных климатических переменных за период с 1945 по 2014 гг. (за 70 лет) для станций Нечерноземья ЕТР.

Как видно из данных табл. 1, наименьшие расхождения между оцененной и фактической нормой июльских осадков достигаются по модели ЕС – Earth3 (для некоторых станций погрешность расчета составляет менее 5%). Модель MPI – ESM1-2-HR обеспечивает наибольшую близость смоделированных норм июльских осадков их фактическим нормам только для двух южных станций.

Если сравнить смоделированное количество осадков с наблюдаемым их количеством в последующие годы: 2015, 2016 и 2017 гг., то также можно обнаружить, что наиболее часто очень близкое (менее ± 10 мм) или полное совпадение смоделированных и наблюдаемых сумм осадков достигается моделью ЕС–Earth3 – 14 случаев. Для модели MPI – ESM1-2-HR число таких случаев – 9; для модели Can ESM5 – 8 и для модели Had GEM3-GC3.1 – LL.

Табл. 2 показывает, насколько отличаются смоделированные и реальные величины средней многолетней температуры воздуха в июле. Из данных этой таблицы следует, что наименьшие расхождения в величинах температуры воздуха обеспечиваются моделями Can ESM5 и MPI – ESM1-2-HR (в среднем погрешность находится в пределах ± 0.5 – 0.7°C). Но если модель Can ESM5 показывает преобладание положительных отклонений, то модель MPI – ESM1-2-HR – наоборот, отрицательных отклонений. Модели Had GEM3-GC3.1 – LL и ЕС – Earth3 температуру воздуха несколько занижают, в особенности модель Had GEM3-GC3.1 – LL.

Сравнение по трем последующим годам после 2014 г. также показало, что очень близкое (менее 0.5°C) или полное совпадение между смоделированными и наблюдаемыми величинами июльской температуры воздуха достигается моделью Can ESM5 в 7 случаях, а моделью MPI – ESM1-2-HR в трех случаях. По модели ЕС – Earth3 в пяти случаях расхождения составляют менее 1°C , в то время как модель Had GEM3-GC3.1 – LL дает более выраженную погрешность.

В табл. 3 сведены невязки значений ГТК – показателя влаго- (тепло) обеспеченности культур, вклад количества осадков в величину которого является определяющим. Видно, что наименьшие расхождения в значениях ГТК выявляются по моделям ЕС–Earth3 и MPI – ESM1-2-HR.

За 2015, 2016 и 2017 гг. незначительные отличия (менее 0.1) или совпадения смоделированных и рассчитанным по данным наблюдений значений ГТК за июль обеспечиваются моделью ЕС–Earth3 в 13 случаях, моделью Can ESM5 в 9 случаях, моделью MPI – ESM1-2-HR в 6 случаях и моделью Had GEM3-GC3.1 – LL в трех случаях.

В целом из приведенных в табл. 1–3 отклонений можно заключить, что моделями преимущественно воспроизводятся более влажные климатические условия, чем в реальности. В этом отношении представляет интерес проверить, в какой мере описываемое моделями экстремально высокое количество осадков в июле соответствует наблюдаемому максимуму июльских осадков за весь рассматриваемый период с 1945 по 2017 гг. Проверка такого соответствия показала, что для Котласа, Вытегры и Смоленска максимумы смоделированных осадков всегда оказываются меньше наблюдаемых максимумов. Для Петрозаводска в четырех случаях, а для Костромы и Трубчевска в одном случае смоделированные максимумы превышают действительные максимумы только по модели Had GEM3-GC3.1 – LL. Завышения фактических максимумов сумм осадков для остальных станций распределяются следующим образом: моделью ЕС–Earth3 – 2 раза (по одному для Шенкурска и Вологды); моделью MPI – ESM1-2-HR – 5 раз (для Шенкурска и Сыктывкара – дважды, для Пскова – один раз); моделью Can ESM5 – 5 раз (для Пскова – дважды, для Шенкурска, Сыктывкара и Вологды – по одному разу) и моделью Had GEM3-GC3.1 – LL – 4 раза (для Шенкурска – дважды, для Вологды и Пскова – по одному разу).

Таблица 1. Точность воспроизведения нормы июльских осадков моделями (разность смоделированными и фактическими величинами; минимальные отклонения по станциям выделены жирным шрифтом)
Table 1. The reproduction accuracy of the July precipitation norm by models (the difference between simulated and real values; the minimum deviations by station are shown in bold)

Станция	Широта	Долгота	Реальная норма (P), мм	Разность P(PMP1-ESM1-2 – HR) – P, мм	Разность P(EC – Earth3) – P, мм	Разность P(Had GEM3- GC3.1- LL) – P, мм	Разность P(Can ESM5) – P, мм
Петрозаводск	61.8° с.ш.	34.3° в.д.	73.65	13.73	-2.16	33.77	21.95
Вытегра	61.0° с.ш.	36.4° в.д.	76.63	23.33	1.06	36.40	22.09
Шенкурск	62.1° с.ш.	42.9° в.д.	68.21	26.49	19.00	30.33	28.15
Котлас	61.2° с.ш.	46.7° в.д.	72.15	23.71	13.32	25.89	31.78
Сыктывкар	61.7° с.ш.	50.8° в.д.	71.33	26.59	11.79	24.90	24.41
Вологда	59.3° с.ш.	39.9° в.д.	72.67	27.77	16.17	27.07	37.41
Кострома	57.7° с.ш.	40.8° в.д.	73.32	38.15	3.96	20.74	41.44
Псков	57.8° с.ш.	28.4° в.д.	75.71	26.04	0.60	14.34	18.74
Смоленск	54.5° с.ш.	32.9° в.д.	90.99	10.01	-14.73	-12.82	22.80
Трубчевск	52.6° с.ш.	33.8° в.д.	82.01	2.59	-20.70	-16.78	13.85

Таблица 2. Точность воспроизведения средней многолетней температуры воздуха в июле моделями (разность между смоделированными и фактическими величинами; минимальные отклонения по станциям выделены жирным шрифтом)
Table 2. The reproduction accuracy of the mean annual air temperature in July by models (the difference between simulated and real values; the minimum deviations by station are shown in bold)

Станция	Широта	Долгота	Реальная средняя (Т), °С	Разность Т(MPI MI-2 – HR) – Т, °С	Разность Т(ES- Earth3) – Т, °С	Разность Т(Had GEM3- GC3.1- LL) – Т, °С	Разность Т(Can ESM5) – Т, °С
Петрозаводск	61.8° с.ш.	34.3° в.д.	16.38	0.44	-1.65	-1.54	0.68
Вытегра	61.0° с.ш.	36.4° в.д.	16.93	-0.33	-1.85	-1.83	0.12
Шенкурск	62.1° с.ш.	42.9° в.д.	17.37	-0.90	-2.60	-3.07	-0.39
Коглас	61.2° с.ш.	46.7° в.д.	17.15	-0.52	-1.94	-1.88	0.39
Сыктывкар	61.7° с.ш.	50.8° в.д.	17.08	-0.32	-2.15	-1.48	0.56
Вологда	59.3° с.ш.	39.9° в.д.	17.14	-0.39	-0.89	-1.42	0.67
Кострома	57.7° с.ш.	40.8° в.д.	18.07	-0.79	-0.96	-1.64	0.32
Псков	57.8° с.ш.	28.4° в.д.	17.78	-1.29	-1.36	-2.04	-0.32
Смоленск	54.5° с.ш.	32.9° в.д.	17.38	0.48	0.93	-0.43	1.37
Трубчевск	52.6° с.ш.	33.8° в.д.	18.62	0.10	0.96	-0.72	1.03

Таблица 3. Точность воспроизведения среднего многолетнего значения ГТК в июле моделями (разность между смоделированными и фактическими значениями; минимальные отклонения по станциям выделены жирным шрифтом)
Table 3. The reproduction accuracy of the mean annual HTC value in July by models (the difference between modeled and real values; the minimum deviations by station are shown in bold)

Станция	Широта	Долгота	Реальное среднее ГТК(Н)	Разность Н(MRI1-2 – HR) – Н	Разность Н(EC- Earth3) – Н	Разность Н(Had GEM3-GC3.1-LL) – Н	Разность Н(Can ESM5) – Н
Петрозаводск	61.8° с.ш.	34.3° в.д.	1.48	0.22	0.13	0.92	0.34
Вытегра	61.0° с.ш.	36.4° в.д.	1.48	0.50	0.23	0.99	0.40
Шенкурск	62.1° с.ш.	42.9° в.д.	1.30	0.61	0.66	1.04	0.55
Котлас	61.2° с.ш.	46.7° в.д.	1.38	0.54	0.48	0.74	0.54
Сыктывкар	61.7° с.ш.	50.8° в.д.	1.39	0.54	0.46	0.59	0.37
Вологда	59.3° с.ш.	39.9° в.д.	1.40	0.58	0.42	0.68	0.61
Кострома	57.7° с.ш.	40.8° в.д.	1.36	0.76	0.16	0.53	0.66
Псков	57.8° с.ш.	28.4° в.д.	1.40	0.62	0.15	0.47	0.36
Смоленск	54.5° с.ш.	32.9° в.д.	1.72	0.13	-0.32	-0.21	0.25
Трубчевск	52.6° с.ш.	33.8° в.д.	1.46	0.02	-0.40	-0.31	0.14

Для оценок уязвимости полевых культур к переувлажнению в ближайшем будущем выбраны пороговые значения ГТК за июль, которые отвечают условиям возникновения разной степени полегания – соответственно: ГТК VII > 1.8, ГТК VII > 2.5 и ГТК VII > 3.5. Затем рассчитана доля лет с такими условиями, характеризующая повторяемость эффектов переувлажнения посевов. В табл. 4 представлено сравнение повторяемости лет с эффектами переувлажнения по данным, основанным на наблюдениях, с повторяемостью, оцененной по МОЦАО и спроецированной для десятилетия 2021–2030 гг.

Результаты сравнения показывают, что по разным моделям достигается разное расхождение между полученными оценками повторяемости лет с эффектами переувлажнения и реальной их повторяемостью. Например, модель Центра им. Хэдли НадGEM3-GC3.1 – LL дает значительное завышение доли таких лет для северных станций и значительное занижение для южных станций. В то же время, модель Европейского Сообщества ЕС – Earth3 обеспечивает достаточно высокую согласованность оцененного и реального процента лет для ряда станций в разных частях Нечерноземья ЕТР.

В табл. 4 выделены случаи, когда для десятилетия 2021–2030 гг. повторяемость лет с эффектами переувлажнения превышает их повторяемость для периодов 1945–1979 гг. и 1980–2014 гг. при одновременной близости оцененного по моделям и реального процентов лет для этих периодов. Для порогового значения ГТК > 1.8 такие случаи выявляются по модели Европейского Сообщества ЕС – Earth3 для двух северных станций (Петрозаводск – 50% лет; Вытегра – 45% лет) и Костромы (40% лет). Кроме того, по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 предсказывается увеличение процента таких лет в Котласе (до 55% лет) и Сыктывкаре (до 48% лет).

Возрастающую повторяемость лет с эффектами резкого переувлажнения (ГТК > 2.5) на десятилетия 2021–2030 гг. демонстрируют три модели. Для Петрозаводска модель Европейского Сообщества ЕС – Earth3 и модель Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR дают одинаковую оценку: 20% лет. Для других станций оценки соответственно составляют: для Вытегры по модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR – 35% лет; для Сыктывкара по модели Европейского Сообщества ЕС – Earth3 – 25% лет; для Котласа по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 – 18% лет.

По модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR для десятилетия 2021–2030 гг. также индицируется пятипроцентная повторяемость лет с очень резким переувлажнением (ГТК > 3.5) в Петрозаводске, Вологде и Пскове, а по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 двухпроцентная повторяемость таких же лет в Шенкурске. Модель Центра им. Хэдли Над GEM3-GC3.1 – LL демонстрирует возрастание повторяемости сверхвлажных лет в Петрозаводске и Котласе, но нужно напомнить, что оценки по этой модели основываются на результате лишь одного модельного эксперимента.

Для двух южных станций увеличение повторяемости лет с эффектами переувлажнения для десятилетия 2021–2030 гг. (по сравнению с двумя прошлыми периодами) не прослеживается, хотя модель Европейского Сообщества ЕС – Earth3 и показывает равенство процента лет в Трубчевске для периода 1980–2014 гг. и десятилетия 2021–2030 гг.

Таким образом, в табл. 4 отражаются два аспекта. Первый аспект состоит в апробации моделей на точность воспроизведения получаемых оценок. Второй аспект относится к применимости моделей для оценок повторяемости экстремальных условий в изменяющемся климате: в данном случае, в появлении резкого избытка атмосферной влаги, приводящего к стрессовому состоянию растений. В этом отношении, несмотря на имеющиеся неопределенности в оценках, содержащиеся в табл. 4 данные дают воз-

Таблица 4. Повторяемость эффектов переувлажнения посевов в периоды 1945–1979, 1980–2014 гг. и для десятилетия 2021–2030 гг. в разных частях Черноземья ЕТР (% лет)
Table 4. Recurrence of crop over-wetting effects within intervals of 1945–1981, 1982–2017 and for slice 2021–2030 in different parts of the Non-chernozem region of the European Russia (% of years)

Станция; координаты; субъект РФ	Значения ГТКВП	Реальные значения		Значения, рассчитанные по моделям											
		1945– 1979	1980– 2014	MPI-ESM1-2-HR		EC-Earth3		HadGEM3-GC3.1-LL		CanESM5					
				1945– 1979	1980– 2014	2021– 2030	1945– 1979	1980– 2014	2021– 2030	1945– 1979	1980– 2014	2021– 2030			
Петрозаводск 61.8° с.ш.; 34.3° в.д.	>1.8	29	26	37	54	50	39	35	50	59	77	50	47	51	40
Республика Карелия	>2.5	11	9	9	17	20	10	10	20	35	49	20	17	11	8
Вытегра	>3.5	3	0	0	0	5	2	1	0	9	9	10	1	0	0
61.0° с.ш.; 36.4° в.д.	>1.8	26	40	63	51	55*	41	42	45	89	71	44	49	56	35
Вологодская обл., север	>3.5	11	14	20	17	35	10	22	10	63	29	22	13	16	5
Шенкурск	>1.8	0	0	6	3	0	1	2	0	11	13	0	0	0	0
62.1° с.ш.; 42.9° в.д.	>1.8	20	26	51	46	35	55	54	40	69	59	67*	43	47	40
Архангельская обл.	>2.5	3	6	26	31	10	19	23	20	46	38	22	20	13	8
Котлас	>3.5	0	0	0	6	0	2	3	0	9	6	0	1	0	2
61.2° с.ш.; 46.7° в.д.	>1.8	20	23	54	43	35	54	48	40	61	50	40	54	51	55
Архангельская обл., юг	>2.5	14	9	31	23	10	16	19	10	45	25	20	13	16	18
Сыктывкар	>3.5	3	3	6	9	0	2	5	0	6	7	0	0	0	2
61.7° с.ш.; 50.8° в.д.	>1.8	23	37	54	60	40	56	46	50*	72	40	33	47	41	48
Республика Коми	>2.5	6	9	31	23	10	18	19	25	28	16	0	14	4	8
Вологда	>3.5	3	0	6	3	0	2	3	0	7	4	0	1	0	0
59.3° с.ш.; 39.9° в.д.	>1.8	23	31	60	57	40	49	48	30	65	52	29	69	60	40
Вологодская обл., юг	>2.5	9	20	26	26	20	17	19	10	32	21	0	14	20	8
Кострома	>3.5	0	0	0	0	5	1	6	0	6	0	0	3	1	0
57.7° с.ш.; 40.8° в.д.	>1.8	29	31	66	60	55	34	32	40	54	47	33	73	61	50
Костромская обл.	>2.5	14	6	40	26	20	11	12	5	20	26	0	23	13	5
Пеков	>3.5	6	3	3	3	0	0	1	0	0	9	0	0	0	0
57.8° с.ш.; 28.4° в.д.	>1.8	37	20	54	63	45	36	31	35*	49	46	20	51	39	32
Псковская обл.	>2.5	9	9	29	20	20	10	12	5	23	17	10	17	11	10
Смоленск	>3.5	0	0	0	0	5	0	4	0	0	3	0	4	1	0
54.5° с.ш.; 32.9° в.д.	>1.8	43	43	54	46	40	24	34	30	33	29	0	70	51	55*
Смоленская обл.	>2.5	23	17	31	11	10	9	10	5	8	7	0	20	14	12
Трубчевск	>3.5	6	9	3	0	1	1	1	0	8	0	0	0	0	2
52.6° с.ш.; 33.8° в.д.	>1.8	34	31	37	23	30*	10	15	15	17	13	0	47	24	22
Брянская обл.	>2.5	20	11	6	6	5	1	5	5	6	0	0	7	4	2
	>3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание: жирным шрифтом выделены проценты лет с эффектами переувлажнения, превышающие для десятилетия 2021–2030 гг. таковые для двух прошлых периодов; знаком * выделены проценты лет с эффектами переувлажнения, превышающие для десятилетия 2021–2030 гг. таковые для периода 1980–2014 гг.

возможность обозначить региональные различия в потенциальной подверженности полевых культур эффектам переувлажнения. Пространственная картина такова, что северная, более заболоченная часть Нечерноземья ЕТР может быть чаще подвержена переувлажнению, чем средняя и южная части. Например, это можно объяснить тем, что в условиях дальнейшего повышения температурного фона в северных районах испарение с избыточно увлажненной поверхности будет возрастать, чаще приводя к образованию конвективной облачности и выпадению конвективных осадков. Как следствие, суммарное количество получаемых осадков будет увеличиваться, о чем упоминалось ранее.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненного исследования свидетельствуют о возможностях использования МОЦАО в качестве инструмента для оценок устойчивости полеводства в условиях будущего климата в целях упреждающей адаптации. Различия в полученных по моделям оценках объясняются тем, что выбранные модели отличаются между собой как пространственной разрешающей способностью, так и детальностью описания механизмов обратных связей, которые уточняются в процессе проведения модельных экспериментов. Моделируемые ими условия влагообеспеченности культур также имеют отличие от действительных – вероятно, по причине неточностей в описании процессов осадкообразования и переноса влаги. Это в итоге приводит к тому, что оцененная по моделям повторяемость лет с возникновением переувлажнения имеет расхождения с их повторяемостью по данным наблюдений. Но для высоких пороговых значений ГТК, которые индицируют резкое переувлажнение, достигается значительно лучшая сопоставимость.

Тем не менее, полученные оценки позволяют дифференцировать территорию Нечерноземья ЕТР по степени подверженности полевых культур эффектам переувлажнения в ближайшем будущем. Наиболее уязвимыми оказываются сельскохозяйственные угодья в среднетаежной зоне, где низинные луга широко используются под культурные луго-пастбища, а земледелие сосредоточено в долинах рек. Индицируется и вероятность того, что в регионах с традиционно развитым луговодством в пределах южно-таежно-лесной зоны посевы однолетних сенажных трав, также как и посевы продовольственных, зернофуражных и силосных культур, могут испытать эффекты резкого переувлажнения. Для южной части Нечерноземья ЕТР, включающей зоны хвойно-широколиственных и широколиственных лесов, усугубляющееся переувлажнение посевов не прослеживается.

С агрономической точки зрения, выявление повторяемости лет со значениями ГТК за июль выше 2.5 и 3.5, которые отвечают условиям возникновения сильного и очень сильного полегания, оказывается особенно важным. При таких эффектах переувлажнения стеблевые культуры в очень большой мере или полностью утрачивают свои адаптивные возможности для последующего вероятного выпрямления. Вследствие этого резко затрудняется уборка полеглых посевов и в них обычно присутствуют разнообразные тли, что крайне отрицательно сказывается на величине и качестве урожая.

В этой связи, ориентируясь на отечественный и зарубежный опыт ведения рациональной практики возделывания полевых культур в гумидных регионах [5, 12, 22, 26–28, 33] и принимая во внимание полученные на перспективу оценки, к мерам по смягчению негативных проявлений изменения климата следует отнести:

- повышение отдачи приемов обработки почвы, направленных на ускорение стекания избыточной воды (оптимизация глубины рыхления и частоты борозд; проведение осеннего лущения с прикатыванием для интенсификации поверхностного стока в весенний сезон);

- эффективное применение дренажных систем — увеличение пропускной способности дренажа закрытого типа и широкое применение систем открытого дренажа вследствие более частых и сильных дождей;
 - оптимальный подбор сортов культур и видов сеяных трав, стебли которых обладают повышенной упругостью к механическим нагрузкам;
 - выравнивание поверхности полей с учетом их уклона, а на низинных лугах — снижение технической дигрессии, применяя движители облегченной конструкции.
- Одновременно в качестве адаптационных стратегий могут выступать:
- совершенствование методов и средств дистанционного зондирования в целях оперативного мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий и посевов, включая оперативный контроль состояния мелиоративных систем и транспортных коммуникаций;
 - усиленный агрохимический и фитосанитарный контроль для поддержания устойчивой продуктивности посевов в возникающих избыточно влажных условиях и с учетом подвижек в росте ресурсов теплообеспеченности;
 - сдвиг в размещении полевых культур (расширение площадей под влаголюбивые и теплолюбивые культуры, например, такие как гречиха и подсолнечник — в хвойно-широколиственной и частично южно-таежной зонах; осушение низинных болот, почвы которых богаты органическими веществами, под создание культурных сенокосов с расширением видового состава высокопродуктивных сеяных трав — в среднетаежной зоне);
 - внедрение системы гибкого страхования посевов, стимулирующей сельхозпроизводителей к расширению ассортимента выращиваемых высокоурожайных полевых культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Архангельской, Брянской, Вологодской, Костромской, Псковской, Смоленской областей; Карельской АССР и Коми АССР (справочники) Л.: Гидрометеиздат, 1971—1974.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
3. *Грингоф И.Г., Клещенко А.Д.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2011. Т. 1. С. 601—609.
4. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. М.: Росгидромет, 2019. С. 10—14, 18—20.
5. *Зотов А.А., Косолапов В.М., Кобзин А.Г., Трофимов И.А., Уланов А.Н., Шевцов А.В. Шельменкина Х.Х., Шукин Н.Н.* Сенокосы и пастбища на осушенных землях Нечерноземья. Москва—Астана, 2012. 1198 с.
6. *Катицов В.М., Школьник И.М., Ефимов С.В.* Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физических и вероятностных пространствах // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 68—81.
7. *Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А.* Влияние крупномасштабных мод атмосферной циркуляции на режим температуры и осадков в Арктике // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 5—21.
8. *Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б.* Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Ч. II. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 5—16.
9. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Взаимосвязь суммарных осадков над Евразией с центрами действия атмосферы Северного полушария и главными модами изменчивости температуры поверхности Северной Атлантики // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 5—16.
10. *Нестеров Е.С.* О формировании взрывных циклонов в северо-восточной части Атлантического океана // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 44—53.
11. *Николаев М.В.* Оценка смещения границ зон рискованного земледелия в условиях изменения климата // Изв. РГО. 2015. Т. 147. Вып. 1. С. 54—65.
12. *Николаев М.В.* Использование метода пространственно-временных аналогов для оценок уязвимости земледелия к воздействию климатических изменений // Изв. РГО. 2015. Т. 147. Вып. 2. С. 1—12.

13. *Николаев М.В.* Климатический мониторинг для оценок уязвимости сельскохозяйственных территорий к эффектам переувлажнения в Нечерноземной зоне Европейской России // Изв. РГО. 2017. Т. 149. Вып. 5. С. 4–16.
14. *Николаев М.В.* Уязвимость и адаптация полеводства в регионах России к факторам атмосферной засухи и избыточного увлажнения в условиях изменяющегося климата // Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”, Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2017 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2017. С. 513–520.
15. *Николаев М.В.* Оценка изменяющегося вклада обильных осадков в рискованность земледелия в Нечерноземье Европейской России // Изв. РГО. 2018. Т. 150. Вып. 6. С. 1–14. <https://doi.org/10.1134/S0869607118060010>
16. *Николаев М.В.* Геостатистическая оценка рискованности земледелия России в условиях изменения климата // Материалы 2-й Международной научной конференции “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”, посвященной памяти акад. Е.И. Ермакова, Санкт-Петербург, 2–4 октября 2019 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2019. С. 631–639.
17. *Николаев М.В.* Влияние климатических изменений на продуктивность мелиорируемых земель // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием “Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки”, Санкт-Петербург, 1–2 октября 2020 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2020. С. 478–483.
18. *Пасечнюк А.Д.* Погода и полегание зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 212 с.
19. Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР. М.: Агропромиздат, 1986. 71 с.
20. *Роде А.А.* Водный режим почв и его регулирование. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 117 с.
21. *Селянинов Г.Т.* Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: Изд-во МСХ СССР, 1958. С. 7–13.
22. Система ведения сельского хозяйства северо-западной зоны РСФСР. Л.: Колос, 1968. 592 с.
23. Справочник агронома по сельскохозяйственной метеорологии. Нечерноземная зона Европейской части РСФСР / Под ред. И.Г. Грингофа. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 527 с.
24. Climate change 2014 Synthesis Report / Ed. by The Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. Meyer. WMO: Geneva, 2014. 132 p.
25. Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment / Ed. by J. Sillman, S. Sippel, S. Russo. Elsevier Inc., 2020. 355 p.
26. *Eitzinger J., Utset A., Trnka M., Zalud Z., Nikolaev M., Uskov I.* Weather and climate and optimization of farm technologies at different input levels // Managing Weather and Climate Risks in Agriculture / M.V.K. Sivakumar, R. Motha (eds.). Springer, 2007. P. 141–170.
27. *Eitzinger J., Thaler S., Kubu G., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M., Simota C., Cojocar G.* Vulnerability and Adaptation Options of European Agriculture // Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in Southeastern Europe / V. Alexandrov, M.F. Gajdusek, C.G. Knight, A. Yotova (eds.). Springer, 2010. P. 139–161.
28. *Eitzinger J., Kubu G., Thaler S., Glauning J., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M.V., Simota C., Cojocar G.* Adaptation Options to Climate Change Impacts in European Agriculture // Climate Change Adaptation: Ecology, Mitigation and Management / Adam L. Jenkins (ed.). Nova Science Publishers, 2011. P. 151–162.
29. *Franzke C., Feldstein S.B.* The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns // J. Atmospheric Science. 2005. V. 62. Iss. 9. P. 3250–3267.
30. *Kuhbrodt T. et al.* The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC 3.1 model: Development and Evaluation for Global Climate // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2018. V. 10. Iss. 11. P. 2865–2888. doi.org/10.1029/2018MS001370
31. *Massonnet F. et al.* Replicability of the EC-Earth3 Earth System Model under a Change in Computing Environment // J. Geoscientific Model Development. 2020. V. 13. P. 1165–1178. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1165-2020>
32. *Muller W.A. et al.* A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM 1.2-HR) // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2018. V. 10. Iss. 7. P. 1383–1413. doi.org/10.1029/2017MS001217
33. *Nikolaev M.V.* Impact of Climate Change on Agriculture in North-West Russia and Adaptation Options // Advances in Environmental Modeling and Measurements / D.T. Mihailovic, B. Lalic (eds.). Nova Science Publishers, 2010. Ch. 20. P. 223–231.

34. *Nikolaev M.V.* Integrated Assessment of Change in Contribution of Excessive Moisture to Farming Risks in the Humid Zone of Western Russia // *J. Meteorology, Hydrology and Water Management*. 2020. V. 8. Iss. 1. P. 46–53.
<https://doi.org/10.26491/mhwm/111543>
35. *Swart N.C. et al.* The Canadian Earth System Model version 5 (Can ESM5.03) // *J. Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12. Iss. 11. P. 4823–4873.
<https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>

Vulnerability of Field Crops to Over-Wetting under Climate Change in the Non-chernozem Region of the European Russia and Adaptation Options

M. V. Nikolaev*

Agrophysical Research Institute, St Petersburg, Russia

**E-mail: clenrusa@mail.ru*

The impact of excessive atmospheric moisture on crop production sustainability under forthcoming climate change in the Non-chernozem region of the European Russia is evaluated. Focus is placed on field crops, as they have important food value and are the forage base for dairy farming. Their vulnerability to over-wetting is characterized by recurrence of years with the G.T. Selyaninov Hydrothermal Coefficient (HTC) values greater than 1.8, which correspond to external conditions for the lodging occurrence. Based on the results obtained from the model runs of the transient GCMs with complete description of the physical mechanisms and relationships inside the model blocks, the change in air temperatures, precipitation totals and the HTC values for slice 2021–2030 is assessed. It is shown that when the scenario of controlled greenhouse gas emission into the atmosphere is implemented (that corresponds with UN initiatives to ensure sustainable development until 2030), the northern part of the Non-chernozem region of the European Russia is revealed as most vulnerable to crop over-wetting effects. In the middle part of this zone, the effects of severe crop over-wetting may occur as well. In this regard, the set of adaptation measures and strategies is discussed aimed at mitigating the adverse impact of climate change.

Keywords: the Non-chernozem region of the European Russia, field crops, over-wetting, transient GCMs, vulnerability assessment, adaptation options

REFERENCES

1. *Agroklimaticheskie resursy Arhangel'skoj, Bryanskoy, Vologodskoj, Kostromskoj, Pskovskoj, Smolenskoj oblastej; Karel'skoj ASSR i Komi ASSR (spravochniki)*. L.: Gidrometeoizdat, 1971–1974.
2. *Vtoroj ocenочnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii*. Obshee rezjume. M.: Rosgidromet, 2014. 58 s.
3. *Gringof I.G., Kleshhenko A.D.* Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MCzD", 2011. T. I. S. 601–609.
4. *Doklad Rosgidrometa ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2018 g.* M.: Rosgidromet, 2019. S. 10–14, 18–20.
5. *Zotov A.A., Kosolapov V.M., Kobzin A.G., Trofimov I.A., Ulanov A.N., Shevczov A.V., Shel'menkina X.X., Shhukin N.N.* Senokosy i pastbishha na osushennyh zemlyah Nechernozem'ya. Moskva–Astana, 2012. 1198 s.
6. *Katczov V.M., Shkol'nik I.M., Efimov S.V.* Perspektivnye ocenki izmenenij klimata v rossijskih regionax: detalizaciya v fizicheskikh i veroyatnostnyh prostranstvah // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2017. № 6. S. 68–81.
7. *Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A.* Vliyanie krupnomasshtabnyh mod atmosfernoj cirkulyacii na rezhim temperatury i osadkov v Arktike // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2018. № 1. S. 5–21.
8. *Kulikova I.A., Kruglova E.N., Kiktev D.B.* Krupnomasshtabnye mody atmosfernoj izmenchivosti. Ch. II. Ih vliyanie na prostranstvennoe raspredelenie temperatury i osadkov na territorii Severnoj Evrazii // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2015. № 4. S. 5–16.
9. *Murav'ev A.V., Kulikova I.A.* Vzaimosvyaz' summarnyh osadkov nad Evraziej s centrami dejstviya atmosfery Severnogo polushariya i glavny mi modami izmenchivosti temperatury poverhnosti Severnoj Atlantiki // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2011. № 5. S. 5–16.

10. *Nesterov E.S.* O formirovanii vzryvnyh ciklonov v severo-vostochnoj chasti Atlanticheskogo okeana // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2010. № 10. S. 44–53.
11. *Nikolaev M.V.* Ocenka smeshheniya granicz zon riskovannogo zemledeliya v usloviyah izmeneniya klimata // *Izv. RGO*. 2015. T. 147. Vy`p. 1. S. 54–65.
12. *Nikolaev M.V.* Ispol`zovanie metoda prostranstvenno-vremennyh analogov dlya ocenok uyazvimos-ti zemledeliya k vozdeystviyu klimaticeskikh izmenenij // *Izv. RGO*. 2015. V. 147. Vyp. 2. S. 1–12.
13. *Nikolaev M.V.* Klimaticeskij monitoring dlya ocenok uyazvimosti sel'skohozyajstvennyh territorij k efektam pereuvlazhneniya v Nechernozemnoj zone Evropejskoj Rossii // *Izv. RGO*. 2017. V. 149. Vy`p. 5. S. 4–16.
14. *Nikolaev M.V.* Uyazvimost' i adaptaciya polevodstva v regionah Rossii k faktoram atmosfernoj za-suhi i izbytochnogo uvlazhneniya v usloviyah izmenyayushhegosya klimata // *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashhennoj 85-letiyu Agrofizicheskogo NII "Tendencii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nyh problem zemledeliya i rastenievodstva k tehnologiyam budushhego"*, Sankt-Peterburg, 27–29 sentyabrya 2017 g. SPb: FGBNU AFI, 2017. S. 513–520.
15. *Nikolaev M.V.* Ocenka izmenyayushhegosya vklada obil'nyh osadkov v riskovannost' zemledeliya v Nechernozeme Evropejskoj Rossii // *Izv. RGO*. 2018. V. 150. Vyp. 6. S. 1–14. DOI 10.1134/S0869607118060010
16. *Nikolaev M.V.* Geostatisticheskaya ocenka riskovannosti zemledeliya Rossii v usloviyax izmeneniya klimata // *Materialy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Tendencii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nyh problem zemledeliya i rastenievodstva k tehnologiyam budushhego"*, posvyashhennoj pamyati akademika E.I. Ermakova, Sankt-Peterburg, 2–4 oktyabrya 2019 g. SPb: FGBNU AFI, 2019. S. 631–639.
17. *Nikolaev M.V.* Vliyanie klimaticeskikh izmenenij na produktivnost' melioriruemyh zemel' // *Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Vklad agrofiziki v reshenie fundamental'nyh zadach sel'skohozyajstvennoj nauki"*, Sankt-Peterburg, 1–2 oktyabrya 2020 g. SPb: FGBNU AFI, 2020. S. 478–483.
18. *Pasechnyuk A.D.* Pogoda i poleganie zernovyh kul'tur. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 212 s.
19. *Prirodno-sel'skohozyajstvennoe rajonirovanie zemel' nogo fonda SSSR*. M.: Agropromizdat, 1986. 71 s.
20. *Rode A.A.* Vodnyj rezhim pochv i ego regulirovanie. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 117 s.
21. *Selyaninov G.T.* Principy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR // *Voprosy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR*. M.: Izd-vo MSX SSSR, 1958. S. 7–13.
22. *Sistema vedeniya sel'skogo hozyajstva severo-zapadnoj zony RSFSR*. L.: Kolos, 1968. 592 s.
23. *Spravochnik agronoma po sel'skohozyajstvennoj meteorologii. Nechernozemnaya zona Evropejskoj chasti RSFSR / Pod red. I.G. Gringofa*. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 527 s.
24. *Climate change 2014 Synthesis Report / Ed. by The Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. Meyer*. WMO: Geneva, 2014. 132 p.
25. *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment / Ed. by J. Sillman, S. Sippel, S. Russo*. Elsevier Inc., 2020. 355 p.
26. *Eitzinger J., Utset A., Trnka M., Zalud Z., Nikolaev M., Uskov I.* Weather and climate and optimization of farm technologies at different input levels // *Managing Weather and Climate Risks in Agriculture / M.V.K. Sivakumar, R. Motha (eds.)*. Springer, 2007. P. 141–170.
27. *Eitzinger J., Thaler S., Kubu G., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M., Simota C., Cojocar G.* Vulnerability and Adaptation Options of European Agriculture // *Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in South-eastern Europe / V. Alexandrov, M.F. Gajdusek, C.G. Knight, A. Yotova (eds.)*. Springer, 2010. P. 139–161.
28. *Eitzinger J., Kubu G., Thaler S., Glauning J., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M.V., Simota C., Cojocar G.* Adaptation Options to Climate Change Impacts in European Agriculture // *Climate Change Adaptation: Ecology, Mitigation and Management / A.L. Jenkins (ed.)*. Nova Science Publishers, 2011. P. 151–162.
29. *Franzke C., Feldstein S.B.* The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns // *J. Atmospheric Science*. 2005. V. 62. Iss. 9. P. 3250–3267.
30. *Kuhbrodt T. et al.* The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC 3.1 model: Development and Evaluation for Global Climate // *J. Advances in Modeling Earth Systems*. 2018. V. 10. Iss. 11. P. 2865–2888. DOI 10.1029/2018MS001370
31. *Massonnet F. et al.* Replicability of the EC-Earth3 Earth System Model under a Change in Computing Environment // *J. Geoscientific Model Development*. 2020. V. 13. P. 1165–1178. DOI 10.5194/gmd-13-1165-2020

-
32. *Muller W.A. et al.* A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM 1.2-HR) // *J. Advances in Modeling Earth Systems*. 2018. V. 10. Iss. 7. P. 1383–1413. doi.org/10.1029/2017MS001217
 33. *Nikolaev M.V.* Impact of Climate Change on Agriculture in North-West Russia and Adaptation Options // *Advances in Environmental Modeling and Measurements* / D.T. Mihailovic, B. Lalic (eds.). Nova Science Publishers, 2010. Ch. 20. P. 223–231.
 34. *Nikolaev M.V.* Integrated Assessment of Change in Contribution of Excessive Moisture to Farming Risks in the Humid Zone of Western Russia // *J. Meteorology, Hydrology and Water Management*. 2020. V. 8. Iss. 1. P. 46–53. DOI 10.26491/mhwm/111543
 35. *Swart N.C. et al.* The Canadian Earth System Model version 5 (Can ESM5.03) // *J. Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12. Iss. 11. P. 4823–4873. DOI 10.5194/gmd-12-4823-2019