

**Основы устойчивого земледелия**

УДК 631.62:58.05:551.58.056:631.421

doi: 10.15389/agrobiology.2023.1.60rus

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ВЕДЕНИЕ ПОЛЕВОДСТВА  
В ЗОНЕ ОСУШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ ЕВРОПЕЙСКОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ  
РОССИИ: УЯЗВИМОСТЬ И АДАПТАЦИЯ****М.В. НИКОЛАЕВ**✉

Проблема нарастающих изменений климата и их влияния на сельскохозяйственный сектор экономики приобрела особую остроту и глобальный масштаб. Вклад деятельности человека в такие изменения становится все более весомым. В этой связи активизировались исследования по оценке региональных агроклиматических последствий глобальных климатических изменений для поиска приемов адаптации к ним. Цель представленной работы состоит в оценке уязвимости и адаптации полеводства к изменяющемуся климату в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья — региона с гумидным климатом и ограниченными тепловыми ресурсами. Хотя термические условия для возделывания культур здесь становятся благоприятнее вследствие роста теплообеспеченности, учащающиеся сверхобильные осадки приводят к резкому переувлажнению посевов, вызывая значительные недоборы урожая и потерю его качества. Новизна исследования заключается в установлении сдвига границ уязвимых территорий с учетом дифференциации зоны осушаемых земель Нечерноземья Европейской России на подзоны по природно-ландшафтному признаку со сменой существующих агроландшафтов и систем ведения земледелия в широтной поясности, включая термодифицитные области. Показано, что высотная ярусность ландшафтов зоны осушаемых земель в теплом климате также оказывает влияние на величину и повторяемость обильных осадков и должна учитываться при регионализации адаптационных мер и стратегий, что для этой зоны сделано впервые. Изменения термического фона и характера атмосферного увлажнения проанализированы на стадии формирования конечного урожая озимых зерновых и зернофуражных злаков и интенсивного накопления биомассы силосных и сенных культур для двух периодов, различающихся по степени антропогенного влияния на климат (1945–1980 и 1981–2017 годы). С использованием аналитических (выбор агроклиматических индикаторов, частотный анализ) и математических методов анализа и обработки данных (тренд-анализ и сглаживание временных рядов, функциональный анализ) выявлен расширяющийся в северном направлении охват территорий, подверженных возрастающему риску переувлажнения посевов (учащение высоких температур приводит к интенсификации испарения и, как результат, к усилению конвекции). На основе имитационного моделирования агроклиматических условий до 2030 года также показано, что в перспективе наиболее уязвимыми к резкому переувлажнению оказываются северные и заболоченные области. То есть, наряду с особенностями атмосферной циркуляции (с усилением циклонической активности), термический фактор в сочетании со свойством подстилающей поверхности (степенью ее увлажненности) вносит все более значимый вклад в усугубление переувлажнения. Важная роль в проявлении эффектов атмосферного переувлажнения в отношении состояния посевов также отводится текстуре почв. Адаптация полеводства к изменению климата рассматривается как комплекс мер, направленных на эффективное управление взаимосвязанными изменениями теплового режима в деятельном слое атмосферы и составляющих водного баланса подстилающей поверхности, включая поверхностные слои почвы. Оценка адаптации осуществляется с учетом агроклиматических, почвенных и ландшафтных особенностей природно-земледельческих подзон, входящих в зону осушаемых земель Нечерноземья Европейской России, и состоит как в оптимизации мелиоративных приемов, так и в совершенствовании технологий возделывания культур и планирования землепользования. Также важно отметить, что рост поступления в атмосферу загрязняющих веществ техногенного происхождения негативно сказывается на количестве и качестве выпадающей влаги, и это требует целенаправленного контроля за соблюдением экологических нормативов.

**Ключевые слова:** Нечерноземье Европейской России, изменение климата, осушаемые земли, уязвимость, адаптация.

Проблема устойчивого ведения сельского хозяйства приобрела глобальный масштаб в связи с нарастающими климатическими изменениями и увеличением частоты экстремальных погодных явлений, возникающих в том числе на фоне антропогенной деятельности (1, 2). В гумидных регионах к таким явлениям относятся сверхинтенсивные осадки и волны тепла (3–5). С последними ассоциируется повышение температуры до экстремально высоких значений. В низких широтах возникают тропические циклоны исключительной мощи (6, 7) при вкладе антропогенного фактора в их обра-

зование (8). В средних широтах обоих полушарий усиливается циклоническая активность, которая распространяется и на высокие широты (9, 10).

К одному из таких регионов в средних и высоких широтах относится зона осушаемых земель европейского Нечерноземья. В сельскохозяйственном отношении эта территория отличается от других регионов России умеренно-теплым и влажным климатом. Факторами, влияющим на устойчивое ведение полеводства, здесь, с одной стороны, становятся ограниченные ресурсы тепла, с другой — избыток атмосферной влаги. По природно-ландшафтному признаку в регионе выделяют три земледельческие подзоны: средне-таежная (60-63° с.ш., 29-51° в.д.), южно-таежная (54-60° с.ш., 28-47° в.д.) и хвойно-широколиственная (52-54° с.ш., 31-33° в.д.). Ландшафтные особенности состоят в преобладании низменностей и низин и увеличении доли заболоченных территорий по направлению от юго-западных районов к северо-восточным (11).

Для региона характерны подзолистые почвы при широком распространении суглинистых и тяжелосуглинистых почв с затрудненной проницаемостью влаги из поверхностных слоев в нижележащие. Кроме того, во всех подзонах часто встречаются сильно переувлажненные торфянистые почвы, а в поймах рек почвенный покров представлен аллювиальными почвами (12).

Почвенно-климатические условия определяют набор полевых культур, их размещение и направления растениеводства. Наряду с выращиванием продовольственных культур прохладного климата, в регионе развито травосеяние и производство культур фуражного назначения, которые служат кормовой базой для молочного животноводства. Селекционная направленность в региональном полеводстве — высокоурожайные и пластичные сорта, достаточно неприхотливые к почвенным условиям, но в то же время толерантные к воздействию биотических и абиотических стрессов. Однако при оптимизации ареалов с точки зрения экономически оправданного размещения посевов культур и сортов следует учитывать проявление глобальных и региональных изменений климата (13, 14).

В настоящей работе проводится анализ взаимосвязанных изменений термических условий и характера атмосферного увлажнения в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья России в условиях усиливающегося антропогенного влияния на климат. В отличие от колебаний температуры воздуха, которые в определенной мере детерминированы, количеству выпадающих осадков присуща высокая стохастичность в пространственно-временном разрешении. В изменяющемся климате отмечается тенденция к увеличению теплообеспеченности культур, но появление сверхобильных осадков приводит к резкому переувлажнению посевов, вызывая значительные недоборы урожая и потерю его качества. Исследование фокусировалось на изменяющихся условиях июля — периода формирования конечного урожая озимых зерновых и зернофуражных злаков, а также интенсивного накопления биомассы силосных и сенных культур, когда температуры воздуха высоки, а выпадающие дожди могут быть очень интенсивными.

Новизна представленных результатов заключается в установлении сдвига границ таких территорий посредством дифференциации зоны осушаемых земель европейского Нечерноземья на подзоны по природно-ландшафтному признаку со сменой существующих в них агроландшафтов и систем ведения земледелия в широтной поясности, включая термдефицитные области. Впервые показано, что высотная ярусность ландшафтов зоны осушаемых земель в теплеющем климате оказывает влияние на величину и повторяемость обильных осадков и должна учитываться при разработке

адаптационных мер и стратегий. Адаптация регионального полеводства к изменению климата оценивалась с позиций эффективного управления климатически обусловленными земельными рисками, эффективного управления продуктивностью сельскохозяйственных земель и посевов, а также возможного контроля количества и качества поступающей из атмосферы влаги посредством соблюдения экологических нормативов. Таким образом, добавляется аспект усиливающегося антропогенного воздействия на влажностные характеристики регионального климата, на чем ранее внимание не заострялось.

Цель работы — основываясь на анализе повторяемости неблагоприятных погодных явлений, связанных со сверхизбытком атмосферной влаги в сочетании с термическим фоном, который становится более благоприятным для возделывания культур, выявить в зоне осушаемых сельскохозяйственных земель европейского Нечерноземья России сельскохозяйственные территории, уязвимые для климатических изменений.

*Методика.* Данные, представленные временными рядами среднемесячных температур воздуха и количества осадков по месяцам, были получены с 1945 по 2017 год на основе наблюдений на агрометеорологических станциях в средне-таежной подзоне (Выборг, Сортавала, Петрозаводск, Вытегра, Шенкурск, Котлас, Сыктывкар), в южно-таежной подзоне (Псков, Великие Луки, Тихвин, Старая Русса, Смоленск, Бологое, Кострома, Вологда, Тотма, Никольск) и в подзоне хвойно-широколиственных лесов (Брянск). Расположение станций в пространстве достаточно полно отражало внутризональные особенности почвенного покрова и ландшафтов. Однородность данных в рядах наблюдений была достигнута посредством системы ввода поправок на усовершенствование приборов и уточнений методики измерения, разработанной во Всероссийском НИИ гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД, г. Обнинск, Калужская обл.). Однако в целях сопоставимости с менее длительными рядами других показателей — индексов атмосферной циркуляции и моделируемых характеристик текущего климата в исследовании также использовались укороченные исходные данные.

Мы сочетали аналитические (выбор агроклиматических индикаторов, сравнительный частотный анализ) и математические методы анализа и обработки данных. К последним относились тренд-анализ и сглаживание временных рядов, функциональный анализ (с выходом на построение регрессионных зависимостей), метод билинейной интерполяции модельных оценок из узлов регулярных сеток климатических моделей в координаты станций, применение квадратичного сплайна для сглаживания изолиний при оконтуривании границ уязвимых территорий.

В качестве агроклиматических индикаторов использовали пороговые значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова — комплексного показателя влагообеспеченности, в котором также учитывается влияние термических условий (15). Показатель имеет общий вид:

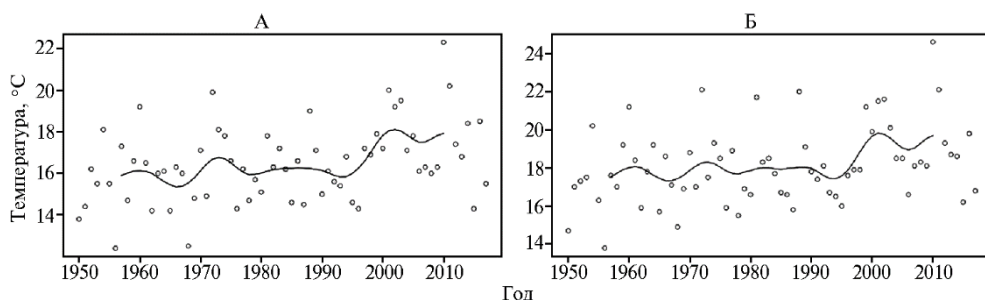
$$ГТК_{i,j} = \frac{\sum P_{i,j}}{0,1 \cdot \sum t_{i,j}},$$

где  $\sum P$  — сумма выпавших осадков, мм,  $\sum t$  — сумма температур воздуха, °С за период вегетации (отрезок времени) со среднесуточной температурой воздуха выше 10 °С,  $i$  — выбранный год,  $j$  — продолжительность выбранного периода вегетации (отрезка времени).

Пороговые значения ГТК, равные 1,8, 2,5 и 3,5, отвечали критериям возникновения разной степени переувлажнения посевов (16). Для сравни-

тельного анализа частоты появления эффектов переувлажнения были выбраны значения ГТК, заключенные в диапазонах между пороговыми значениями:  $1,8 \leq \text{ГТК} < 2,5$ ,  $2,5 \leq \text{ГТК} \leq 3,5$  и  $3,5 < \text{ГТК} \leq 4,5$  и выше. Это позволило дифференцировать значения ГТК, относя их к категориям выраженного, резкого и очень резкого переувлажнения посевов.

**Результаты.** На основании анализа многолетних данных установлено, что при наблюдаемом изменении климата увеличение положительных температур воздуха оказалось наиболее выраженным в июле по сравнению с другими теплыми месяцами. Хотя июльские температуры и были изменчивы по годам, прослеживалась общая тенденция их повышения за период с 1950 по 2017 год с максимумом в 2010 году. К одной из причин, обуславливающих такую тенденцию, следует отнести более частое проникновение волн тепла при одновременном их усилении. Согласно результатам исследований, проведенных в Польше в 1951–2015 годах, волны тепла с середины 1990-х годов усилились, распространяясь на северо-восток Европы, и в период май—сентябрь 49 % случаев их появления приходится на июль (17).



**Рис. 1.** Временной ход средней месячной температуры воздуха в июле (точки) и 7-летние скользящие средние (линии) в Петрозаводске (61,8° с.ш., 34,3° в.д., высота над уровнем моря 110 м, средне-таежная подзона) (А) и Костроме (57,7° с.ш.; 40,8° в.д., высота над уровнем моря 125 м, южно-таежная подзона) (Б).

Сравнение хода скользящих средних (рис. 1) показало, что средняя температура воздуха в июле в Петрозаводске с конца 1990-х годов приближалась к средней температуре воздуха в Костроме в ранние десятилетия, достигая фонового уровня 17,7 °С, что в пересчете на сумму температур ( $\sum t_{\text{VII}}$ ) составляло 549 °С. Прирост теплообеспеченности, отмечаемый на других северных станциях, также приближал условия теплообеспеченности в июле к таковым в ранние десятилетия на территории более южных станций. Так, сумма июльских температур в Вытегре (средне-таежная подзона, высота над уровнем моря 55 м) с конца 1990-х годов достигала фонового значения  $\sum t_{\text{VII}} = 557$  °С. Это значение было даже несколько выше фонового значения в Старой Руссе (южно-таежная подзона, высота над уровнем моря 24 м) в ранние десятилетия —  $\sum t_{\text{VII}} = 541$  °С. На восточных средне-таежных станциях (Шенкурск и Котлас), расположенных в понижениях рельефа, и в Вологде (южно-таежная подзона, высота над уровнем моря 125 м) суммы июльских температур с конца 1990-х годов достигали фоновых значений соответственно  $\sum t_{\text{VII}} = 570$  °С,  $\sum t_{\text{VII}} = 564$  °С и  $\sum t_{\text{VII}} = 567$  °С. Они сопоставимы с величиной теплообеспеченности в ранние десятилетия в Брянске (хвойно-широколиственная подзона, высота над уровнем моря 214 м), для которых  $\sum t_{\text{VII}}$  составила около 560 °С.

Такую пространственно-временную аналогию можно рассматривать как фактор, способствующий расширению посевов более продуктивных сортов и ценных культур к северу от традиционных районов их возделыва-

ния, учитывая, что суммарный вклад других теплых месяцев в увеличение теплообеспеченности примерно равен вкладу июльских условий.

Количество осадков, выпадающих в июле, в значительной мере определяют воздушные массы океанического происхождения (18). По данным за период с 1950 по 2017 год (19) был построен график временного хода июльского индекса Восточно-Атлантического колебания (ЕА) и получены 7-летние скользящие средние (рис. 2). Индекс этой моды климатической изменчивости, подобно индексу Североатлантической Осцилляции (NAO), рассчитывается из разложения поля атмосферного давления на ортогональные составляющие (20). Однако в отличие от индекса NAO, который характеризует западный перенос в целом, индекс ЕА отражает изменение интенсивности и числа циклонов (21, 22).

С конца 1990-х годов наблюдалось резкое преобладание положительных значений индекса ЕА (рис. 2), что соответствует усилению циклонической активности в теплеющем климате (21), которое связано с повышением температуры поверхностных вод Северной Атлантики. Это усиление проявляется в нарастающей адвекции насыщенных влагой воздушных масс, которые вызывают обложные дожди при одновременном понижении температуры воздуха вследствие пасмурной погоды.

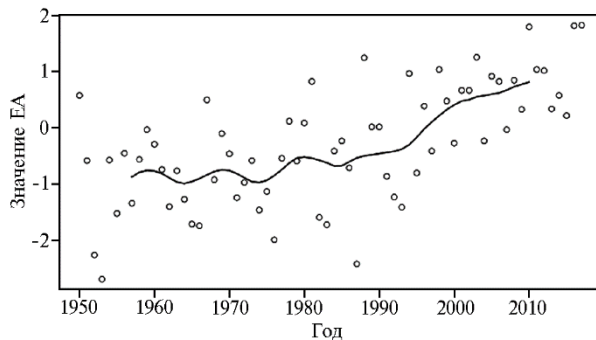


Рис. 2. Временной ход июльских значений индекса Восточно-Атлантического колебания (ЕА) и 7-летние скользящие средние (по данным реанализа NCAR — National Center for Atmospheric Research, США).

В то же время развитие конвекционных процессов, обусловленное интенсивным испарением при повышающихся июльских температурах, приводило к активизации грозовой деятельности с выпадением ливневых осадков, особенно в районах, удаленных вглубь континента, где дневные максимумы июльских температур воздуха были несколько выше.

При изменяющемся климате выпадение рекордного количества осадков наблюдалось как при суммах температур воздуха ниже, так и выше среднего многолетнего показателя (табл. 1).

**1. Абсолютные максимумы выпавших в июле осадков при суммах температур воздуха ниже и выше средних многолетних значений, наблюдаемые в ранние и поздние десятилетия в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья России**

Станция	Координаты, высота над уровнем моря	$\sum P_{\text{ср.}}$ , мм	$\sum t_{\text{ср.}}$ , °С	Год	$\sum P_i$ , мм	$\sum t_i$ , °С	Год	$\sum P_i$ , мм	$\sum t_i$ , °С
Станции со средней многолетней суммой годовых осадков более 600 мм									
Старая Русса	58,0° с.ш., 31,2° в.д., 24 м	80 <sup>a</sup>	553	1953	176	546	1990	234 <sup>a</sup>	518 <sup>a</sup>
Смоленск	54,5° с.ш., 32,9° в.д., 236 м	92	539	1962	197 <sup>a</sup>	515	1998	234 <sup>a</sup>	518 <sup>a</sup>
Брянск	53,2° с.ш., 34,2° в.д., 214 м	90	572	1980	197 <sup>a</sup>	477	1999	215	670
Вытегра	61,0° с.ш., 36,4° в.д., 55 м	80 <sup>a</sup>	524	1961	171	521	2017	226	488
Станции со средней многолетней суммой годовых осадков менее 600 мм									
Выборг	60,7° с.ш., 28,8° в.д., 10 м	74	551	1966	150	558	2012	169	564
Котлас	61,2° с.ш., 46,7° в.д., 55 м	76	532	1951	187	465	2000	254	623
Кострома	57,7° с.ш., 40,8° в.д., 125 м	77	560	1968	184	462	2008	204	567
Шенкурск	62,1° с.ш., 42,9° в.д., 40 м	70	539	1978	154	459	1998	164	583

Примечание.  $\sum P_{\text{ср.}}$  и  $\sum t_{\text{ср.}}$  — средние многолетние суммы осадков и температур воздуха в июле за 1945–2017 годы,  $\sum P_i$  и  $\sum t_i$  — суммы осадков и температур воздуха в июле в указанные годы; <sup>a</sup> — близкие, различающиеся в десятых долях значения. Абсолютные максимумы июльских осадков также достигнуты в Бологое, Тихвине, Сортавале, Петрозаводске, Пскове и Тотьме.

Абсолютные максимумы выпавших в июле осадков в последние десятилетия (1981–2017 годы) превышали значения предыдущих десятилетий (1945–1980 годы) (см. табл. 1). Однако в более увлажненной части зоны осушаемых земель абсолютные максимумы июльских осадков обычно соответствовали пониженному термическому фону, тогда как в менее увлажненной части, наоборот, повышенному термическому фону. Для станций, расположенных в низинах и на низменностях, отмечался больший прирост количества выпавших экстремальных осадков по сравнению со станциями, приуроченными к возвышенностям.

На основе данных, полученных на агрометеорологических станциях в разных земледельческих подзонах, мы провели сравнение повторяемости лет, когда количество выпавших в июле осадков превысило их среднюю многолетнюю сумму (принятую за 100 %) в 1,5 раза и более для двух периодов — 1945–1980 и 1981–2017 годы. Эти периоды были выбраны, исходя из особенностей хода аномалий глобально осредненной температуры воздуха с 1880 по 2020 год (22). До конца 1970-х годов аномалии были отрицательными, за исключением положительных пиков в 1939–1944 годах (до +0,2 °С). С 1981 года эти пики были превышены и аномалии имели резко выраженный рост с максимумом в 2017 году, равным +1,0 °С. Такой рост был тесно сопряжен с влиянием индустриализации (23).

Для этих периодов, различающихся по степени антропогенного влияния на климат, подсчитали долю лет с обильными осадками, используя градацию их аномалий и дифференциацию зоны осушаемых земель (табл. 2).

## 2. Доля лет с аномальным количеством июльских осадков в периоды, различающиеся по степени антропогенного влияния на климат, в разных земледельческих подзонах

Природно-ландшафтная земледельческая подзона	Аномалия по количеству осадков от среднемноголетнего значения			
	150-200 %	201-250 %	251-300 %	301-350 %
	1945-1980 г о д ы			
Средне-таежная	39 %	17 %	3 %	
Южно-таежная	53 %	25 %	3 %	6 %
Хвойно-широколиственная	22 %	3 %		
	1981-2017 г о д ы			
Средне-таежная	35 %	19 %	6 %	3 %
Южно-таежная	54 %	22 %	11 %	3 %
Хвойно-широколиственная	14 %	8 %		

Во всех природно-ландшафтных земледельческих подзонах прослеживался сдвиг в сторону роста повторяемости лет с возрастающей обильностью осадков. При этом для средне-таежной подзоны наблюдалось появление дополнительного диапазона с повторяемостью лет со сверхобильными осадками. В целом в ярусной дифференциации ландшафтов зоны осушаемых земель наибольшее увеличение процента лет отмечалось для станций, находящихся в низинах (высота над уровнем моря менее 70 м), и некоторых равнинных станций (высота над уровнем моря менее 143 м).

European Environment Agency (24) также фиксирует изменения в динамике появления интенсивных осадков. Сообщалось (25), что за 1981–2013 годы по сравнению с предшествующим периодом (1951–1980 годы) число суток с очень интенсивными осадками в Европе возросло на 45 % за счет резкого увеличения числа таких осадков в северной и северо-восточной частях Европы. Также показано (26, 27), что в ожидаемых климатических условиях наиболее выраженный рост числа дней с очень интенсивными осадками, вклад в который одновременно вносит повышающийся температурный фон, будет характерен для северо-востока Европы в летний сезон.

Для оценки изменяющегося вклада влажностного и термического

факторов в значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова был применен функциональный анализ. Его суть состоит в том, что ГТК представляется как дробная функция от двух переменных — суммы осадков и суммы температур воздуха. В трехмерном изображении это поверхность, наклон которой определяется величиной частных производных по аргументам. На поверхности проведены горизонтальные линии. Используя их, можно подсчитать число случаев попадания июльских значений ГТК в диапазоны, соответствующие категориям переувлажнения. Оценка вклада каждого из указанных факторов в величину ГТК, а также изменение такого соотношения по периодам, различающимся по степени антропогенного влияния на климат, осуществляется за счет проецирования поверхности на соответствующую плоскость (16).

С использованием описанного метода мы выявили усиливающийся во времени вклад сумм обильных июльских осадков в высокие значения ГТК в июле (ГТК<sub>VII</sub>), что выражалось в снижении остаточной дисперсии, то есть уменьшении разброса нанесенных точек, которые тесно ложатся вдоль прямой линии. Одновременно изменяющийся вклад сумм температур воздуха в высокие значения ГТК проявлялся в общем смещении облака точек в сторону повышающихся сумм температур.

Таким образом, установлены более тесные регрессионные связи между возрастающими суммами июльских осадков с проявлением их экстремальности и высокими значениями ГТК<sub>VII</sub>. Например, коэффициент детерминации возрос с 0,78 до 0,95 для Вытегры, с 0,90 до 0,97 — для Смоленска и с 0,89 до 0,92 — для Костромы при снижении величины стандартного отклонения соответственно с 0,24 до 0,16, с 0,21 до 0,16 и с 0,28 до 0,15. Аналогичная закономерность выявлялась и для других станций, что повышает надежность экстраполяции условий влагообеспеченности.

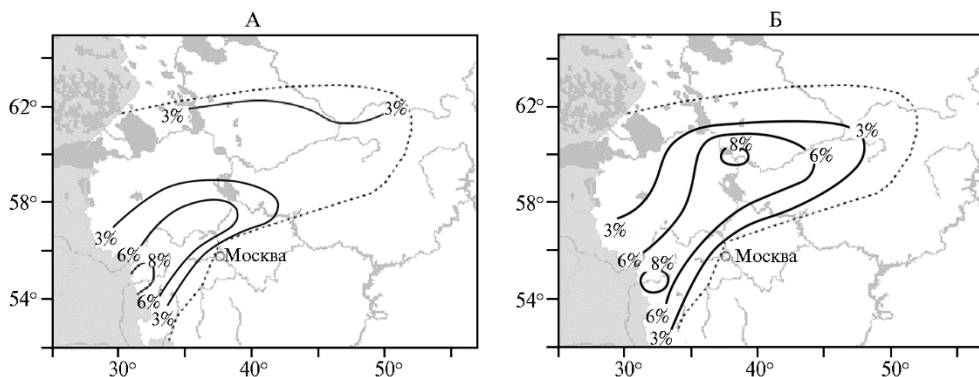
Эффекты переувлажнения отражались и на потерях урожая. Последние удобно представить в виде относительных отклонений от технологического тренда, описываемого параболической функцией, исходя из особенностей динамики хозяйственной урожайности.

Так, в избыточно влажном 1998 году в Смоленской области потеря урожая озимой ржи относительно уровня тренда достигла 54 %. Для станции Смоленск (среднесуглинистая оглееная почва) влажностные условия характеризовались следующими показателями: сумма осадков за летние месяцы ( $\sum P_{VI-VIII}$ ) — 459 мм (при  $\sum P_{VII}$  — 234 мм), ГТК<sub>V-VI</sub> = 2,19, ГТК<sub>VII</sub> = 4,64, ГТК<sub>VII-VIII</sub> = 4,29. Значение июльского индекса ЕА составляло 0,77. В этом же году в Псковской области потеря урожая озимой ржи составила 37 %. Для станции Псков (супесчаная почва)  $\sum P_{VI-VIII}$  равнялась 457 мм (при  $\sum P_{VII}$  — 174 мм), ГТК<sub>V-VI</sub> = 3,32, ГТК<sub>VII</sub> = 3,42, ГТК<sub>VII-VIII</sub> = 2,79. В избыточно влажном 2017 году в Вологодской области потеря урожая озимой ржи относительно уровня тренда достигла 40 %. Для станции Вытегра (среднесуглинистая глеевая почва) влажностные условия были следующими:  $\sum P_{VI-VIII}$  — 406 мм (при  $\sum P_{VII}$  — 226 мм); ГТК<sub>V-VI</sub> = 2,40; ГТК<sub>VII</sub> = 4,61; ГТК<sub>VII-VIII</sub> = 3,15. Значение июльского индекса ЕА в этом году — 1,96.

При сравнении показателей на протяжении вегетации было установлено, что избыточно влажные условия июля вносили наиболее весомый вклад в потерю конечного урожая в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья. Приведенные оценки потерь урожая сопоставимы с оценками, полученными ранее во Всероссийском НИИ сельскохозяйственной метеорологии в целом для Нечерноземной зоны. Согласно этим оценкам, затяжные дожди и ливни могут приводить к снижению урожая относи-

тельно его средней величины для сеяных трав на 25-35 %, озимых колосовых — на 40-60 %, гибридов кукурузы в некоторые годы — на 80 % (28). Надо отметить, что на почвах с затрудненной водопроницаемостью сверхобильная выпадающая влага скапливается в верхних слоях, резко усугубляя корнево-стеблевое полегание, которое одновременно приводит и к потере качества конечного урожая.

Что касается периодов без дождей, то они были непродолжительны и влияли на верхние слои почвы. В исключительно теплом и сухом 2010 году потери урожая озимой ржи в Смоленской и Псковской областях составили около 30 % его трендовой величины, что меньше, чем в избыточно влажном 1998 году.



**Рис. 3.** Повторяемость лет (%) с очень резким переувлажнением посевов в июле в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья России: А — 1945-1980 годы, Б — 1981-2017 годы. Пунктирная линия — граница зоны осушаемых земель.

Карты на рисунке 3 в виде поля изолиний отображают пространственное изменение повторяемости лет с очень резким переувлажнением посевов в июле ( $3,5 < ГТК_{VII} \leq 4,5$  и выше) в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья. На картах эта зона (окоптана пунктирной линией) соответствует по классификации Г.Т. Селянинова зоне избыточного увлажнения, для которой значения ГТК превышают 1,3 (29). С севера она ограничена зоной с появлениями июльских заморозков, а с юго-востока ее опоясывают территории с условиями достаточного увлажнения, где эффекты переувлажнения проявлялись слабее и значительно реже.

Ввиду локальных геоморфологических особенностей поверхности (волнистости рельефа) и возрастающей частоты обильных осадков, для большей полноты картографических оценок были использованы данные дополнительных станций, имеющих однородные и непрерывные ряды наблюдений с 1981 по 2017 год: Пушкинские Горы, Торопец, Старица, Бабаево и Кологрив (южно-таежная подзона), а также Трубчевск (хвойно-широколиственная подзона).

Сравнивая ход изолиний для двух периодов, можно проследить, как расширялся охват сельскохозяйственных территорий, подверженных возрастающему риску очень резкого переувлажнения посевов. В 1945-1980 годах повторяемость лет с условиями очень резкого переувлажнения, превышающая 6 %, отмечалась только для южной части зоны осушаемых земель. В 1981-2017 годах к территориям с такой повторяемостью лет добавились регионы, относящиеся к северной части южно-таежной подзоны и к средне-таежной подзоне.

В целом, в пространственной конфигурации уязвимых к переувлаж-



нению территорий прослеживалось смещение границ в северо-восточном направлении. То есть в последние десятилетия подверженными возрастающему риску очень резкого переувлажнения оказывались территории, где площади с переувлажненными почвами и заболоченными землями составляли значительную долю от общей земельной площади.

Таким образом, наряду с особенностями атмосферной циркуляции (усиление циклонической активности), термический фактор в сочетании со свойством подстилающей поверхности (степенью ее увлажненности) вносит все более значимый вклад в усугубление переувлажнения. Важная роль в проявлении эффектов атмосферного переувлажнения в отношении состояния посевов также отводится текстуре почв, от которой зависит степень проницаемости атмосферной влаги в почвенные слои.

Оценка уязвимости полеводства к эффектам переувлажнения для 2021–2030 годов (30) основывалась на результатах имитационного моделирования временных рядов температуры воздуха, количества осадков и величин ГТК за июль по транзитивным моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Использовались модели, созданные в Центральной Европе (31, 32) и Канаде (33). В качестве эмиссионного рассматривался сценарий контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу.

Поскольку модели различались между собой размером ячейки регулярной сетки и детальностью описания физических механизмов обратных связей внутри модельных блоков, это приводило к расхождению в значениях моделируемых переменных. Тем не менее посредством всех выбранных моделей средне-таежная подзона определялась как более уязвимая для избытка атмосферной влаги. Одновременно для этой подзоны достигалась лучшая сопоставимость между реальным и оцененным по моделям процентом лет с эффектами резкого переувлажнения при предсказываемом росте частоты таких эффектов на 2021–2030 годы. Так, в имитируемых по модели MPI-ESM1-2-HR (Max Planck Institute Earth System Model) агроклиматических условиях повторяемость лет с условиями резкого переувлажнения ( $2,5 \leq \text{ГТК}_{\text{VII}} \leq 3,5$ ) в Вытегре составила 35 %. Повторяемость таких лет в Петрозаводске по модели EC Earth 3 (European community Earth-System Model) была оценена величиной 20 %. Модель Can ESM5 (The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) дала оценку для Котласа 18 % лет. По этой модели также была выявлена повторяемость лет с условиями очень резкого переувлажнения ( $\text{ГТК}_{\text{VII}} > 3,5$ ), которая в Котласе на 2021–2030 годы составила 2 %.

Поскольку модели постоянно совершенствуются, упомянем также региональную модель HARMONIE-Climate (the Rossby Centre) для Фенноскандинавии, учитывающую конвекцию на уровне мезо-орографии (34). Согласно оценкам для ближайшего и отдаленного будущего, наибольший рост интенсивности осадков ожидается в летний сезон в северной части этого субрегиона.

В этой связи адаптация полеводства к изменению климата выступает как комплекс мер, направленных на эффективное управление изменениями термического режима деятельного слоя атмосферы и составляющих водного баланса подстилающей поверхности, включая поверхностные слои почвы.

Как известно, управление рисками атмосферного переувлажнения посевов достигается посредством регулирования поверхностного и внутрипочвенного стока через отвод избыточной воды при одновременном обеспечении обрабатываемых слоев почвы достаточной влагой для восполнения ее потерь в результате испарения. Поэтому в изменяющемся климате при возрастающем количестве обильных осадков управление такими рисками

состоит в оптимизации мелиоративных технологических и агротехнических приемов с учетом особенностей почв и рельефа.

В средне-таежной подзоне европейского Нечерноземья с часто встречающимися почвами тяжелого механического состава следует использовать траншейный дренаж, который обеспечивает объем стока, в среднем в два раза превышающий объем стока бестраншейного дренажа (35, 36). На низменностях южно-таежной подзоны, для которых характерен незначительный уклон по направлению к руслам рек, рекомендуется отвод избыточных дождевых и ливневых вод по поверхности посредством оптимального подбора ширины и частоты борозд (37). В хвойно-широколиственной подзоне вследствие наличия сильно расчлененного рельефа нужны мероприятия, направленные на предотвращение усиливающейся водной эрозии (38). В поймах незарегулированных водотоков требуется оптимизация площади обвалованных земель для устранения риска подтопления сельскохозяйственных угодий и вымывания аллювиального слоя в результате резкого подъема уровня воды, вызванного обильными дождями во время летней межени (39). Также следует усовершенствовать конструкции закрытого дренажа, применяемого во всех подзонах и для всех почв на основе подбора оптимального расстояния между дренами и увеличения их пропускной способности (40).

Отметим, что в условиях усиливающегося поверхностного и внутрипочвенного стока возрастает вынос питательных веществ с сельскохозяйственных полей. Для снижения риска их попадания в водоемы требуется повышать эффективность работы очистных модулей дренажных систем и при необходимости проводить частичную реконструкцию последних (35).

Управление продуктивностью сельскохозяйственных земель и посев культур в изменяющихся климатических условиях сводится к мерам опережающей адаптации, направленных как на смягчение негативных эффектов атмосферного переувлажнения (41), так и на использование преимуществ от повышения температурного фона (42-44).

Выравнивание поверхности полей и применение на низинных лугах движителей облегченной конструкции обеспечивает равномерное впитывание влаги в почву, одновременно улучшая аэрацию и обмен теплом между почвенными слоями (45). Из-за увеличивающегося поступления атмосферной влаги, которая представляет собой очень слабый кислотный раствор, оптимизируются дозы удобрений и нормы внесения под культуры известки на кислых почвах (46). В сельскохозяйственное производство внедряются достижения генной инженерии, селекции и семеноводства, включая высев высококачественных элитных семян для увеличения в посевах доли сортов, обладающих высокой устойчивостью к полеганию и высокой резистентностью к возбудителям болезней, активизирующихся в избыточно влажных условиях (47, 48).

В изменяющихся климатических условиях создаются возможности продвижения посевов более требовательных к теплу влаголюбивых культур и сортов к северу от традиционных районов их возделывания (например, посевов гречихи в среднюю часть южно-таежной подзоны) и включение более продуктивных растений в состав кормовых и травопольных севооборотов в связи с ростом теплообеспеченности посевов.

Осушение низинных болот, почвы которых богаты органическими веществами, под создание культурных сенокосов и пастбищ с расширением видового состава высокоурожайных сеяных трав может привести к повышению продуктивности и потенциала использования сельскохозяйственных земель и одновременно снизить отрицательные эффекты атмосферного пе-

реувлажнения вследствие ослабления конвекции.

Интенсификация хозяйственной деятельности оказывает усиливающееся влияние не только на составляющие радиационного баланса системы атмосфера—поверхность Земли, но и приводит к возрастающему поступлению в атмосферу загрязняющих веществ в виде химических соединений и взвешенных частиц техногенного происхождения (49, 50). Они представляют собой аэрозоли — либо концентрированные растворы, либо твердые частицы, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии. Аэрозоли обладают поверхностью, которая служит необходимым условием для того, чтобы водяной пар мог конденсироваться. Часть из них служит так называемыми ядрами конденсации водяного пара с последующим образованием облаков и выпадением осадков. Соблюдение экологических нормативов создает возможность целенаправленного контроля количества и качества поступающей из атмосферы влаги на региональном и внутрирегиональном уровнях.

Процесс осадкообразования может быть ослаблен за счет ведения рационального землепользования и усовершенствования двигателей внутреннего сгорания. В этом случае снижается поступление в атмосферу взвешенных частиц техногенного происхождения (частицы пыли, глины и сажи), на которых конденсируется водяной пар с образованием облачных капелек, посредством коагуляции преобразующихся в капли воды и выпадающих в виде дождя из водяных облаков.

Благодаря совершенствованию технологий переработки может быть достигнуто сокращение в атмосфере количества аэрозолей, состоящих из оксидов серы и азота, которые вызывают выпадение кислотных дождей, приводящих к снижению плодородия почв, повреждению листовой поверхности посев, нарушению транспирации и фотосинтеза и ослаблению иммунитета культур воздействию вредоносных организмов.

Нужно отметить, что обозначенные нами меры региональной адаптации во многом соответствуют применяемым в зарубежных сельскохозяйственных регионах. Например, такое соответствие в изменяющемся климате имеет место для сходных европейскому Нечерноземью агроландшафтов в средних и северных частях канадских провинций Квебек и Онтарио (51) и североευропейских странах (52, 53), а также для избыточно влажных местностей в Центральной Европе (54-56). Это может послужить основой для расширения возможностей для адаптации через принятие оптимальных управленческих решений.

Итак, изменения термического фона и характера атмосферного увлажнения оказывают все более осязаемое влияние на ведение полеводства в зоне осушаемых земель европейского Нечерноземья. Увеличение суммы активных температур, отвечающих потребностям растений в тепле, способствует расширению площадей под более продуктивные сорта укосных и силосных культур, а также расширению ареала возделывания некоторых влаголюбивых культур продовольственного назначения в северном направлении. Однако учащающееся выпадение обильного и сверхобильного количества атмосферной влаги вследствие нарастания суммарного вклада осадков адвективного и конвективного происхождения приводит к резкому переувлажнению посевов. Это отражается на величине потерь урожая, которые в избыточно влажные годы превышают потери в сухие годы при одновременном снижении качества произведенной растениеводческой продукции. В условиях усиливающегося антропогенного влияния на климат наблюдается расширение сельскохозяйственных территорий, подверженных риску резкого переувлажнения посевов. Ход изолиний на картах повторяемости лет со зна-

чениями ГТК, индицирующими эффекты очень резкого переувлажнения, показывает, что при происходящих климатических изменениях уязвимые территории расширяются за счет включения регионов, расположенных в северной части южно-таежной подзоны и в средне-таежной подзоне. Вместе с тем в перспективе наиболее чувствительной к эффектам резкого переувлажнения окажется самая северная часть зоны осушаемых земель — территории, лежащие к северу от 60° с.ш. и относящиеся к средне-таежной подзоне. Такой факт объясним наличием пространств с переувлажненными почвами и заболоченными землями. Учащение высоких температур приводит к увеличению испарения с больших площадей с последующим образованием конвективной грозовой облачности и выпадению ливневых осадков.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,  
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,  
e-mail: clenrusa@mail.ru ✉

Поступила в редакцию  
29 ноября 2022 года

*Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2023, V. 58, № 1, pp. 60-74

## THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CROP FARMING IN THE DRAINED LANDS OF THE EUROPEAN NON-CHERNOZEM REGION OF RUSSIA: VULNERABILITY AND ADAPTATION ASSESSMENT

M.V. Nikolaev✉

*Agrophysical Research Institute*, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail clenrusa@mail.ru (✉)  
corresponding author)

ORCID:

Nikolaev M.V. orcid.org/0000-0003-2183-8569

The author declares no conflict of interests

Final revision received November 29, 2022

Accepted January 13, 2023

doi: 10.15389/agrobiology.2023.1.60eng

### Abstract

The impact of climate change on agricultural sustainability has become a particularly acute and global problem. The human activity increasingly significant contributes to such changes. Therefore, investigations have been intensified worldwide to assess the regional agro-climatic consequences of global climate change in order to find ways to adapt to them. This work aimed to assess the vulnerability and adaptation of field crops to a changing weather in the zone of drained lands of the European Non-Chernozem Region, which is characterized by a humid climate and limited thermal resources. Although the thermal conditions for growing crops here are becoming more favorable due to the increase in heat supply, more frequent incessant and heavy rains lead to a sharp overwetting of crops, causing significant crop shortages and quality losses. The novelty of our study lies in the evaluation of a shift in the boundaries of vulnerable territories. The conclusions we came to resulted from the subdivision of the zone into subzones by natural environment attributes, given changes in existing agrolandscapes and farming systems in latitudinal zonality, including thermally deficient areas. In the European Non-Chernozem Region of Russia, with a warming climate, the altitudes of drained lands were shown to affect the magnitude and frequency of heavy precipitation and should be taken into account when regionalizing adaptation measures and strategies, which is done for the this zone for the first time. The paper submits the analysis of thermal changes and atmospheric moisture changes during grain formation in winter cereals and fodder cereals and during intensive accumulation of biomass of silage and hay crops for two periods that differ in the degree of anthropogenic influence on the climate, 1945-1980 and 1981-2017. Using a set of analytical methods (selection of agro-climatic indicators, frequency analysis) and mathematical methods (trend analysis and smoothing of time series, functional analysis, etc.), we revealed that the coverage of areas subject to an increasing risk of overwetting of crops is expanding to the north. An increase in high temperatures leads to an intensification of evaporation and, as a result, to an increased convection. Based on simulation modeling of agro-climatic conditions until 2030, it is also shown that in the future, the northern and marshy areas are the most vulnerable to sudden overwetting. That is, along with the atmospheric circulation (i.e., a higher cyclonic activity), the thermal factor combined with the moisture content of the underlying surface in the soil contribute more and more significantly to the aggravation of overwetting. Soil texture also plays an important role

in the manifestation of the effects of atmospheric overwetting on crops. Adaptation of field crop growing to climate change includes a set of measures aimed at effective management of interrelated changes in the thermal regime in the active layer of the atmosphere and the water balance components of the underlying surface and upper layers of the soil. The adaptation measures should regard the agro-climatic, soil and landscape features of the natural and agricultural subzones of the European Non-Chernozem Region drained lands and consists both in optimizing reclamation techniques and in improving crop cultivation technologies and land use planning. It is also extremely important that elevated concentrations of technogenic pollutants in the atmosphere have a negative impact on the quantity and quality of precipitation. Therefore, targeted monitoring of compliance with environmental standards is mandatory.

Keywords: European Non-Chernozem Region, climate change, drained lands, vulnerability, adaptation.

## REFERENCES

1. Core Writing Team. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
2. *Climate extremes and their implications for impact and risk assessment*. J. Sillman, S. Sippel, S. Russo (eds.). Elsevier, Amsterdam, 2020.
3. Vogel E., Meyer R. Chapter 3. Climate change, climate extremes, and global food production — adaptation in the agricultural sector. In: *Resilience. The science of adaptation to climate change*. Z. Zommers, K. Alverson (eds.). Elsevier, 2018: 31-49 (doi: 10.1016/b978-0-12-811891-7.00003-7).
4. Regoto P., Dereszynski C., Chou S.C., Bazzanella A.C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(11): 5125-5142 (doi: 10.1002/joc.7119).
5. Dong Z., Wang L., Sun Y., Hu T., Limsakul A., Singhruck P., Pimonsree S. Heatwaves in Southeast Asia and their changes in a warmer world. *Earth's Future*, 2021, 9(7): e2021EF001992 (doi: 10.1029/2021EF001992).
6. Walsh K.J.E., Camargo S.J., Knutson T.R., Kossin J., Lee T.-C., Murakami H., Patricola C. Tropical cyclones and climate change. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2019, 8(4): 240-250 (doi: 10.1016/j.tcr.2020.01.004).
7. Rosa M.B., Satyamurty P.I., Ferreira N.J., Silva L.T. A comparative study of intense surface cyclones off the coasts of southeastern Brazil and Mozambique. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(8): 3523-3542 (doi: 10.1002/joc.6036).
8. Burke C., Stott R. Impact of anthropogenic climate change on the East Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5205-5220 (doi: 10.1175/JCLI-D-16-0892.1).
9. Kjellström E., Hansen F., Belušić D. Contributions from changing large-scale atmospheric conditions to changes in scandinavian temperature and precipitation between two climate normals. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2022, 74(1): 204-221 (doi: 10.16993/tellusa.49205).
10. Pepler A.S., Dowdy A.J., Hope P. The differing role of weather systems in southern Australian rainfall between 1979-1996 and 1997-2015. *Climate Dynamics*, 2021, 56: 289-2302 (doi: 10.1007/s00382-020-05588-6).
11. *Landshaftnaya karta SSSR /Pod redaktsiey A.G. Isachenko [Landscape map of the USSR. A.G. Isachenko(ed.)]. Moscow, 1988 (in Russ.)*.
12. *Pochvennaya karta RSFSR /Pod redaktsiey V.M. Fridland [Soil map of the RSFSR. V.M. Fridland (ed.)]. Moscow, 1988 (in Russ.)*.
13. Kiryushin V.I. *Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proektirovanie agrolandshaftov [Theoretical basis of adaptive landscape agriculture and design of agricultural landscapes]. Moscow, 2011 (in Russ.)*.
14. Kiryushin V.I. *Kontseptsiya razvitiya zemledeliya v Nechernozem'e [The concept of the development of agriculture in the Non-Chernozem region]. St. Petersburg, 2020 (in Russ.)*.
15. Selyaninov G.T. V sbornike: *Voprosy agroklimaticheskogo rayonirovaniya SSSR [In: Agro-climatic zoning of the USSR]. Moscow, 1958: 7-13 (in Russ.)*.
16. Nikolaev M.V. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2018, 150(6): 1-14 (doi: 10.1134/S0869607118060010) (in Russ.)
17. Wibig J. Heat waves in Poland in the period 1951-2015: trends, patterns and driving factors. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, 2018, 6(1): 37-45 (doi: 10.26491/mhwm/78420).
18. Murav'ev A.V., Kulikova I.A. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, 5: 5-16 (in Russ.)
19. *European Climate Assessment & Dataset KNMI Climate Explorer (climatic indices)*. Available: <https://www.ecad.eu/>. No date.
20. Franzke C., Feldstein S.B. The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns. *Journal of Atmospheric Science*, 2005, 62(9): 3250-3267 (doi: 10.1175/JAS3536.1).

21. Nesterov E.S. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, 12: 32-40 (in Russ.).
22. Nesterov E.S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean* [North Atlantic oscillation: atmosphere and ocean]. Moscow, 2013 (in Russ.).
23. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies. *GISS surface temperature analysis* (GISTEMP v4). Available: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp>. No date.
24. European Environment Agency. *Wet and dry — heavy precipitation and river floods*. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-changing-climate-hazards-1/wet-and-dry-1/wet-and-dry-heavy>. No date.
25. Fischer E.M., Knutti R. Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Climate Change*, 2016: 986-991 (doi: 10.1038/nclimate3110).
26. Hawcroft M., Walsh E., Hodges K., Zappa G. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(12): 124006 (doi: 10.1088/1748-9326/aaed59).
27. Rajczak J., Schär C. Projections of future precipitation extremes over Europe: a multimodel assessment of climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(20): 773-800 (doi: 10.1002/2017JD027176).
28. Gringof I.G., Kleshchenko A.D. *Osnovy sel'skokhozyaystvennoy meteorologii. Tom 1* [Fundamentals of agricultural meteorology. Volume 1]. Obninsk, 2011: 601-609 (in Russ.).
29. Selyaninov G.T. V sbornike: *Rastenievodstvo SSSR. Tom 1* [In: Crop production of the USSR. Volume 1]. Moscow, 1933: 1-15 (in Russ.).
30. Nikolaev M.V. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2021, 153(4): 47-67 (doi: 10.31857/S0869607121040030) (in Russ.).
31. Massonnet F., Ménégou M., Acosta M., Yepes-Arbós X., Exarchou E., Doblas-Reyes F.J. Replicability of the EC-Earth3 Earth system model under a change in computing environment. *Geosci. Model Dev.*, 2020, 13: 1165-1178 (doi: 10.5194/gmd-13-1165-2020).
32. Müller W.A., Jungclaus J.H., Mauritsen T., Baehr J., Bittner M., Budich R., Bunzel F., Esch M., Ghosh R., Haak H., Ilyina T., Kleine T., Kornblüeh L., Li H., Modali K., Notz D., Pohlmann H., Roeckner E., Stemmler I., Tian F., Marotzke J. A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(7): 1383-1413 (doi: 10.1029/2017MS001217).
33. Swart N.C., Cole J.N.S., Kharin V.V., Lazare M., Scinocca J.F., Gillett N.P., Anstey J., Arora V., Christian J.R., Hanna S., Jiao Y., Lee W.G., Majaess F., Saenko O.A., Seiler C., Seinen C., Shao A., Sigmond M., Solheim L., von Salzen K., Yang D., Winter B. The Canadian Earth System Model version 5 (Can ESM5.03) *Geosci. Model Dev.*, 2019, 12(11): 4823-4873 (doi: 10.5194/gmd-12-4823-2019).
34. Lind P., Belušić D., Médus E., Dobler A., Pedersen R.A., Wang F., Matte D., Kjellström E., Landgren O., Lindstedt D., Christensen O.B., Christensen J.H. Climate change information over Fenno-Scandinavia produced with a convection-permitting climate model. *Climate Dynamics*, 2023 (doi: 10.1007/s00382-022-06589-3).
35. Shtykov V.I., Yanko Yu.G., Uskov I.B., Nikolaev M.V. *Sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnogo ekologicheskogo foruma «Den' Baltijskogo morya»* [Proceedings of the XVIII International Environmental Forum "Baltic Sea Day"]. St. Petersburg, 2017: 63-64 (in Russ.).
36. Harris L.I., Roulet N.T., Moore T.R. Drainage reduces the resilience of a boreal peatland. *Environ. Res. Commun.*, 2020, 2: 065001 (doi: 10.1088/2515-7620/ab9895).
37. Uskov I.B., Nikolaev M.V., Yanko Yu.G. *Sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnogo ekologicheskogo foruma «Den' Baltijskogo morya»* [Proceedings of the XVIII International Environmental Forum "Baltic Sea Day"]. St. Petersburg, 2016: 49-51 (in Russ.).
38. Clubb F.J., Mudd S.M., Attal M., Milodowski D.T., Grieve S.W.D. The relationship between drainage density, erosion rate, and hilltop curvature: implications for sediment transport processes. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2016, 121(10): 1724-1745 (doi: 10.1002/2015JF003747).
39. Markov B.S. *Melioratsiya poym Nechernozemnoy zony* [Reclamation of the floodplains of the Non-Chernozem zone]. Moscow, 1973 (in Russ.).
40. Abendroth L.J., Chighladze G., Frankenberger J.R., Bowling L.C., Helmers M.J., Herzmann D.E., Jia X., Kjaersgaard J., Pease L.A., Reinhart B.D., Strock J., Youssef M. Paired field and water measurements from drainage management practices in row-crop agriculture. *Sci. Data.*, 2022, 9: 257 (doi: 10.1038/s41597-022-01358-7).
41. Castellano M.J., Archontoulis S.V., Helmers M.J., Poffenbarger H.J., Six J. Sustainable intensification of agricultural drainage. *Nat. Sustain.*, 2019, 2: 914-921 (doi: 10.1038/s41893-019-0393-0).
42. Ceglar A., Zampieri M., Toreti A., Dentener F. Observed northward migration of agro-climate zones in Europe will further accelerate under climate change. *Earth's Future*, 2019, 7(9): 1088-1101 (doi: 10.1029/2019EF001178).
43. Peltonen-Sainio P., Jauhainen L. Large zonal and temporal shifts in crops and cultivars coincide with warmer growing seasons in Finland. *Regional Environmental Change*, 2020, 20: 89 (doi: 10.1007/s10113-020-01682-x).
44. Trnka M., Bialek J., Brzdil R., Dubrovský M., Eitzinger J., Hlavinka P., Chuchma F., Možný M.,

- Prášil I., Růžek P., Semerádová D., Štěpánek P., Zahradníček P., Žalud Z. Observed changes in the agroclimatic zones in the Czech Republic between 1961 and 2019. *Plant Soil Environ.*, 2021, 67(3): 154-163 (doi: 10.17221/327/2020-PSE).
45. Aryal J.P., Sapkota T.B., Khurana R., Khatri-Chhetri A., Rahut D.B., Jat M.L. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environ. Dev. Sustain.*, 2020, 22: 5045-5075 (doi: 10.1007/s10668-019-00414-4).
  46. Yakushev V.P., Osipov A.I. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, 30: 68-72 (in Russ.).
  47. Chesnokov Yu.V., Kocherina N.V., Kosolapov V.M. *Molekulyarnye markery v populyatsionnoy genetike i selektsii* [Molecular markers in population genetics and breeding]. Moscow, 2019 (in Russ.).
  48. Arkhipov M.V., Gusakova L.P., Velikanov L.P., Vilichko A.K., Zheludkov A.G., Alferov V.B. *Metodika kompleksnoy otsenki biologicheskoy i khozyaystvennoy prigodnosti semennogo materiala (metodicheskie ukazaniya)* [A comprehensive assessment of the biological and economic suitability of seed material (guidelines)]. St. Petersburg, 2013 (in Russ.).
  49. Sonwani S., Maurya V. Chapter 7. Impact of air pollution on the environment and economy. In: *Air pollution: sources, impacts and controls*. P. Saxena, V. Naik (eds.). CABI Publisher, Oxford, U.K., 2019: 113-135 (doi: 10.1079/9781786393890.0113).
  50. Walker T.R. Effectiveness of the national pollutant release inventory as a policy tool to curb atmospheric industrial emissions in Canada. *Pollutants*, 2022, 2(3): 289-305 (doi: 10.3390/pollutants2030019).
  51. *Canada in a changing climate: national issues report*. F.J. Warren, N. Lulham (eds.). New York, 2021 (doi: 10.4095/328384).
  52. Woods B.A., Nielsen J., Pedersen A.B., Kristofersen N. Farmers' perceptions of climate change and their likely responses in Danish agriculture. *Land Use Policy*, 2017, 65: 109-120 (doi: 10.1016/j.landusepol.2017.04.007).
  53. Ibrahim M.A., Johansson M. Attitudes to climate change adaptation in agriculture – A case study of Öland, Sweden. *Journal of Rural Studies*, 2021, 86: 1-15 (doi: 10.1016/j.jrurstud.2021.05.024).
  54. Dalla Marta A., Eitzinger J., Kersebaum K.C., Todorovic M., Altobelli F. Assessment and monitoring of crop water use and productivity in response to climate change. *The Journal of Agricultural Science*, 2018, 156(5): 575-576 (doi: 10.1017/S002185961800076X).
  55. Pohanková E., Hlavinka P., Kersebaum K.-C., Rodríguez A., Balek J., Bednařík M., Dubrovský M., Gobin A., Hoogenboom G., Moriondo M., Nendel C., Olesen J.E., Rötter R.P., Ruiz-Ramos M., Shelia V., Stella T., Hoffmann M.P., Takáč J., Eitzinger J., Dibari C., Ferrise R., Bláhová M., Trnka M. Expected effects of climate change on the production and water use of crop rotation management reproduced by crop model ensemble for Czech Republic sites. *European Journal of Agronomy*, 2022, 134: 126446 (doi: 10.1016/j.eja.2021.126446).
  56. Lalić B., Firanj Sremac A., Dekić L., Eitzinger J., Perišić D. Seasonal forecasting of green water components and crop yields of winter wheat in Serbia and Austria. *The Journal of Agricultural Science*, 2018, 156(5): 645-657 (doi: 10.1017/S0021859617000788).