

УДК: 632.11:633.1:631.421.1

## АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИМИ РИСКАМИ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР<sup>1</sup>

© 2022 г. В. А. Романенков<sup>1,3,\*</sup>, В. Н. Павлова<sup>2</sup>, М. В. Беличенко<sup>3,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119992 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии  
249038 Обнинск, Калужская обл., просп. Ленина, 82, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

\*E-mail: romanenkov@soil.msu.ru

\*\*E-mail: geosetvniia@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.

После доработки 28.06.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Сравнение устойчивости сельскохозяйственных культур к засухам в некоторых регионах Приволжского и Северо-Кавказского ФО, полученной на основе обработки статистических данных и данных Географической сети опытов с удобрениями за периоды 1994–2014 гг. и 1995–2020 гг. позволило выявить тенденции и пространственные закономерности климатических рисков потерь урожаев озимых и яровых пшеницы и ячменя. Показано, что климатически обусловленные риски устойчивы во времени и снижаются в ряду яровая пшеница > ячмень > озимая пшеница. Оптимизация минерального питания растений снижает риск недобора урожая зерновых культур в случае засухи в большинстве случаев на одну градацию. Наибольшее относительное снижение рисков (11–19%) для длительных полевых опытов с удобрениями указывает на более благоприятные условия реализации биоклиматического потенциала зерновыми культурами в опытах по сравнению с производственными условиями за счет лучшей агротехники и более высокого уровня почвенного плодородия на опытных делянках. Экспериментально подтверждена возможность управления устойчивостью систем земледелия с помощью оптимизации доз минеральных удобрений и увеличения посевных площадей зерновых культур, риски возделывания которых снижаются в условиях современного климата.

*Ключевые слова:* агротехнологии, климатические риски, возделывание зерновых культур.

**DOI:** 10.31857/S0002188122120110

### ВВЕДЕНИЕ

Производство сельскохозяйственных культур является одним из основных секторов экономики, подверженных значительному воздействию изменений климата. Статистика последних лет свидетельствует о растущем во всем мире ущербе в сельскохозяйственном производстве от опасных погодных и климатических явлений [1, 2]. В про-

блеме продовольственной безопасности оценка влияния климатических изменений на возможность использования сельскохозяйственных ресурсов является междисциплинарной, а учет климатических рисков — многоцелевой задачей, включающей мониторинг посевов и прогнозирование урожайности, использование климатической информации для управления рисками, оптимизацию агротехнологий для устойчивого производства, разработку систем поддержки принятия решений, сельскохозяйственное страхование, применение адаптационных подходов в соответствии с наблюдаемыми и ожидаемыми рисками.

По данным Национального союза агроэкологов, в Российской Федерации основными рисками, которые привели к страховым выплатам

<sup>1</sup> Работа поддержана Евразийским центром по продовольственной безопасности (Аграрным центром) МГУ им. М.В. Ломоносова, а также в рамках темы 3.1. “Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций” Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утвержденного приказом № 745 от 31.12.2019 г.

в 2012–2018 гг., стали почвенная засуха (22.2% от объема выплат), атмосферная засуха (21.7%), сухой (19.5%), переувлажнение почвы (16.6%) [3]. В системе агрострахования обычно рассматривают “риск недобора продукции/урожая”. Реализация данного риска проявляется в снижении урожая по причине действия неблагоприятных природных факторов – погодных явлений, не соответствующих условиям развития сельскохозяйственных культур, или распространении болезней растений [1].

Вследствие увеличения частоты засух происходит рост климатически обусловленных рисков при производстве сельскохозяйственных культур [4]. Для преодоления возможных отрицательных последствий и максимального использования положительных воздействий разработана и принята Национальная программа адаптации сельского хозяйства России, которая предусматривает различные уровни адаптации – от России в целом и до субъектов, районов и даже хозяйств. Эти меры адаптации должны в максимальной степени учитывать как наблюдаемые тенденции, так и прогнозы изменений климата, а также ожидаемые последствия этих изменений для зернопроизводящих регионов России.

Ранее нами была проведена работа по изучению устойчивости сельскохозяйственных культур к засухам в некоторых регионах Приволжского и Северо-Кавказского ФО [5]. На основе данных опытов с удобрениями Географической сети с 1993 по 2014 гг. были рассчитаны риски недобора климатически обусловленной урожайности яровых и озимых пшеницы и ячменя. Установлено, что средние дозы азотных удобрений обеспечивают наибольшее положительное влияние на устойчивость данных культур к неблагоприятным погодным условиям. Самой отзывчивой на оптимизацию минерального питания культурой оказалась яровая пшеница, для которой снижение рисков было наибольшим. Для остальных культур средние и высокие дозы удобрений снижали риск недобора урожая в среднем на одну градацию.

Цель работы – продолжить исследование тенденций и пространственных закономерностей климатических рисков и потерь урожайности, отражающих агроклиматические особенности производства сельскохозяйственной продукции на территории регионов, оценить устойчивость их проявления и изучить возможности управления ими за счет оптимизации условий питания растений и элементов агротехнологий.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выбраны периодически страдающие от засухи и засушливых явлений субъекты (области, края и республики) в Приволжском и Северо-Кавказском федеральных округах за период 1995–2020 гг. Агроклиматические расчеты проведены с помощью имитационной системы Климат–Почва–Урожай [6–8] с использованием данных наблюдений Росгидромета на метеорологических станциях (МС) и постах (МП).

*Гидрометеорологические данные.* В работе использованы архивы показателей среднемесячной температуры воздуха и сумм осадков с января по декабрь за период с 1995 по 2020 г. из базы данных “Климат”, сформированной в институте Глобального климата и экологии [9]. Также привлечены среднесуточные данные температуры и дефицита влажности воздуха, солнечной радиации и суточных сумм осадков в отдельных реперных точках на исследованной территории за этот же период.

*Данные урожайности.* Источником данных урожайности зерновых колосовых культур – яровой, озимой пшеницы и ярового и озимого ячменя с 1995 по 2020 г. на исследованной территории явились ежегодные результаты опытов 14 учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями. Выборки урожайности культур разделены на варианты: контроль (без внесения удобрений), средние и высокие дозы внесения действующего вещества азотных удобрений. В Поволжском регионе в качестве средних были приняты суммарно внесенные дозы до 60 кг д.в./га включительно, в Северо-Кавказском регионе – 80 кг д.в./га и больше. В основном в опытах применяли минеральные удобрения, в некоторых вариантах применяли органические удобрения: навоз, осадок сточных вод, гороховую солому, которые были пересчитаны для оценки поступления с ними азота. Для оценки возможности управления использованием биоклиматического потенциала за счет оптимизации минерального питания растений расчеты по обусловленным засухой климатическим рискам были проведены отдельно для каждого длительного опыта с яровой пшеницей, яровым ячменем и озимой пшеницей в Поволжском регионе (5, 11 и 9 временных рядов) и с озимой пшеницей и ячменем в Северо-Кавказском регионе (4 и 2 временных ряда).

Анализ динамики урожайности и частоты засушливых лет проводили с использованием данных Росстата средней областной урожайности изученных культур с 1995 по 2020 гг.

*Имитационная система Климат–Почва–Урожай*. В настоящее время общепризнанным методологическим подходом при решении задач, связанных с оценкой последствий изменений климата, в частности в агросфере, является математическое моделирование процессов влияния гидрометеорологических условий на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных культур [10, 11]. Имитационная система Климат–Почва–Урожай (КПУ) представляет собой набор программных модулей для моделирования динамики и роста сельскохозяйственных культур [11].

С помощью системы КПУ с суточным шагом по времени в течение вегетационного периода выполняют расчет динамики накопления фитомассы посева, включая ее продуктивную часть (урожай), а также основных составляющих водного баланса почвы и запасов почвенной влаги. Один из основных показателей продуктивности в системе КПУ – биоклиматический потенциал (БКП), который определяют как суммарную сухую массу в ц/га, синтезируемую за теплый период года, начиная с даты перехода температуры воздуха через 5°C весной и заканчивая датой перехода через 5°C осенью.

*Оценка климатических рисков при возделывании сельскохозяйственных культур*. Концепция риска становится все более важной в оценках изменений климата, а также в разработке адаптационных решений и мер по смягчению последствий таких изменений. Причина совместного рассмотрения адаптации и риска состоит в том, чтобы обеспечить понимание того, как формировать решения, которые объединяют известное настоящее и неизвестное будущее, связанное с множеством неопределенностей. В связи с этим наиболее распространена оценка риска как произведение вероятности некоторого события и его последствия. В применении к климатическим изменениям обычно оперируют представлениями об опасности, воздействии и уязвимости. Все 3 компонента увязаны с изменениями климата, социальными и экономическими процессами. Например, уязвимость определяется Межгосударственной комиссией по изменению климата как предрасположенность к неблагоприятному воздействию, включая такие понятия, как чувствительность, восприимчивость и отсутствие способности к адаптации.

Для оценки климатического риска крупных неурожаев при неблагоприятных погодных условиях был использован методический подход, подробно описанный ранее [12–14]. Количественная оценка климатического риска определяется как произведение вероятностей неблагоприятных

гидрометеорологических условий и уязвимости субъекта (зоны выращивания сельскохозяйственной культуры). Таким образом, риск ожидаемых потерь урожайности вытекает из взаимодействия между неблагоприятными метеорологическими факторами и уязвимостью территории. Оценка уязвимости территории зависит от соотношения БКП и средней урожайности сельскохозяйственной культуры. Средняя величина урожайности определяется по данным Росстата либо рассчитывается с помощью имитационной системы Климат–Почва–Урожай за период 1995–2020 гг. Количественная оценка степени уязвимости территории по отношению к неблагоприятным климатическим условиям можно рассматривать как оценку степени “недоиспользования” биоклиматического потенциала при возделывании сельскохозяйственных культур. Критерием наступления сильной атмосферной засухи является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) за период с мая по август, не превышающая величины 0.6 ( $ГТК \leq 0.6$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При современном агроклиматическом районировании территория среднего и нижнего Поволжья, а также территория отдельных субъектов Северо-Кавказского ФО, которые рассмотрены в настоящей работе, отнесена к зоне недостаточного увлажнения [15]. Интенсивные и продолжительные засухи приводят здесь к значительным потерям урожая. При прогнозируемой аридизации климата, увеличение частоты засух можно будет наблюдать на изученных территориях с большой вероятностью [16].

Оценки климатических рисков крупных неурожаев, выраженные в процентах от максимальной величины риска (равной 100), а также агроклиматические показатели для их расчета: биоклиматический потенциал территории и повторяемость засушливых лет ( $ГТК \leq 0.6$ ), представлены в табл. 1.

Зона самых высоких рисков неурожаев яровой пшеницы и ярового ячменя (от 22 до 36%) охватывает территорию степной и сухостепной зон крайнего юго-востока – Саратовскую и Самарскую обл. В то же время север Приволжского ФО – Пермский край, Кировская и Нижегородская обл. и Республика Удмуртия относятся к зоне низких рисков (от 0 до 5.3%). Средние риски недобора урожайности составляют  $\approx 10\%$  в Башкортостане, где расположены самые большие посевные площади яровой пшеницы на рассматриваемой территории (36.7%).

**Таблица 1.** Оценки рисков крупных недоборов урожайности ячменя, яровой и озимой пшеницы за 1995–2020 гг. и относительная посевная площадь (%) на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского ФО

Область, край, республика	Число лет с засухой (ГТК ≤ 0.6), ед.	Риск недобора урожая (R)			Биоклиматический потенциал ВСП, средний в субъекте, ц/га
		яровая пшеница*	озимая пшеница	ячмень*	
Приволжский ФО					
Саратовская	13	35.8	24.7	35.9	35.2
Самарская	12	22.1	17.3	22.1	42.4
Башкирия	4	9.6	7.6	8.8	43.6
Мордовия	4	8.6	7.2	8.3	43.0
Нижегородская	2	4.7	4.0	4.5	44.4
Ульяновская	2	5.3	4.3	5.0	45.3
Пермский край	0	0	0	0	42.0
Кировская	0	0	0	0	37.2
Удмуртия	0	0	0	0	38.8
Северо-Кавказский ФО					
Ставропольский край	6	13.4	6.2	4.1	43.0
Северная Осетия	1	2.5	2.1	2.1	52.9
Кабардино-Балкария	1	2.1	1.6	1.7	50.1

\*Поволжье – ячмень яровой, Северный Кавказ – ячмень озимый.

В Ставропольском крае климатические риски при возделывании яровой пшеницы достигают величины 13.4%. В то же время на территории округа в Северной Осетии и Кабардино-Балкарии рассчитанные климатические риски невелики и составляют 2.5 и 2.1% соответственно. Оценки рисков недобора урожая, наложенные на картографическую основу, показаны на рис. 1. Показано, что риски потерь урожаев зерновых, рассчитанных в 2-х выборках за 1994–2013 гг. и 1995–2020 гг., в значительной степени совпадали (рис. 2). При этом прослежено их абсолютное снижение, в целом в выборке, составившее 2%. Наибольшие абсолютные изменения претерпели оценки рисков для Ставропольского края, которые понизились на 5.0–6.4%. Для ячменя снижение риска неурожая от первого периода ко второму зафиксировано в градации от средней к низкой. В Кабардино-Балкарии за тот же период абсолютное снижение составило 3.9–4.6%, что соответствует устойчивым низким рискам возделывания зерновых культур. В большей степени риски понижались при возделывании яровой пшеницы. В то же время в Северной Осетии, где среди рассмотренных регионов Северного Кавказа наблюдается наиболее благоприятная ситуа-

ция с возделыванием зерновых культур, абсолютное снижение рисков не превышало 1.3%. Наблюдаемая тенденция может быть связана со сравнительно более благоприятными климатическими условиями последних лет для реализации урожайности.

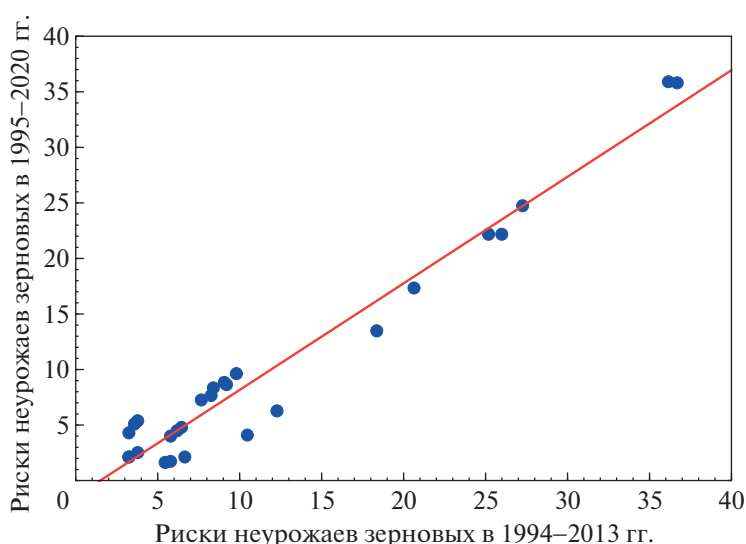
При сравнении 2-х периодов для Поволжья величина рисков оказалась более устойчивой, максимальное абсолютное снижение наблюдали для Самарской обл. – 3.1–3.9%, в остальных случаях оставаясь в диапазоне 0.2–2.6%. В Ульяновской обл. риски возросли на 1.0–1.5% в 1995–2020 гг.

*Возможность управления рисками по данным опытов Геосети.* Полученные в длительных опытах Геосети средние урожаи культур в контрольных вариантах оказались близкими к средней областной урожайности за тот же период или превысили ее в Поволжском ФО в 2.3 раза и на Северном Кавказе – в 1.5 раза.

Варианты опытов со средними дозами удобрений отличались по урожайности от среднеобластных показателей в 1.2–2.8 раза в Поволжье и в 1.5–1.7 раза в Северо-Кавказском ФО. Повышение доз удобрений увеличивало диапазон варьирования урожаев зерновых культур, при неизменных минимальных урожаях величины максимальных возрас-



**Рис. 1.** Пространственное распределение рисков недобора урожая озимой и яровой пшеницы и ячменя в 1995–2020 гг. на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского ФО. Расчеты сделаны на основе данных среднеобластной урожайности.



**Рис. 2.** Соответствие рисков неурожая зерновых культур в 1994–2013 и 1995–2020 гг., %. Расчеты сделаны на основе данных среднеобластной урожайности.

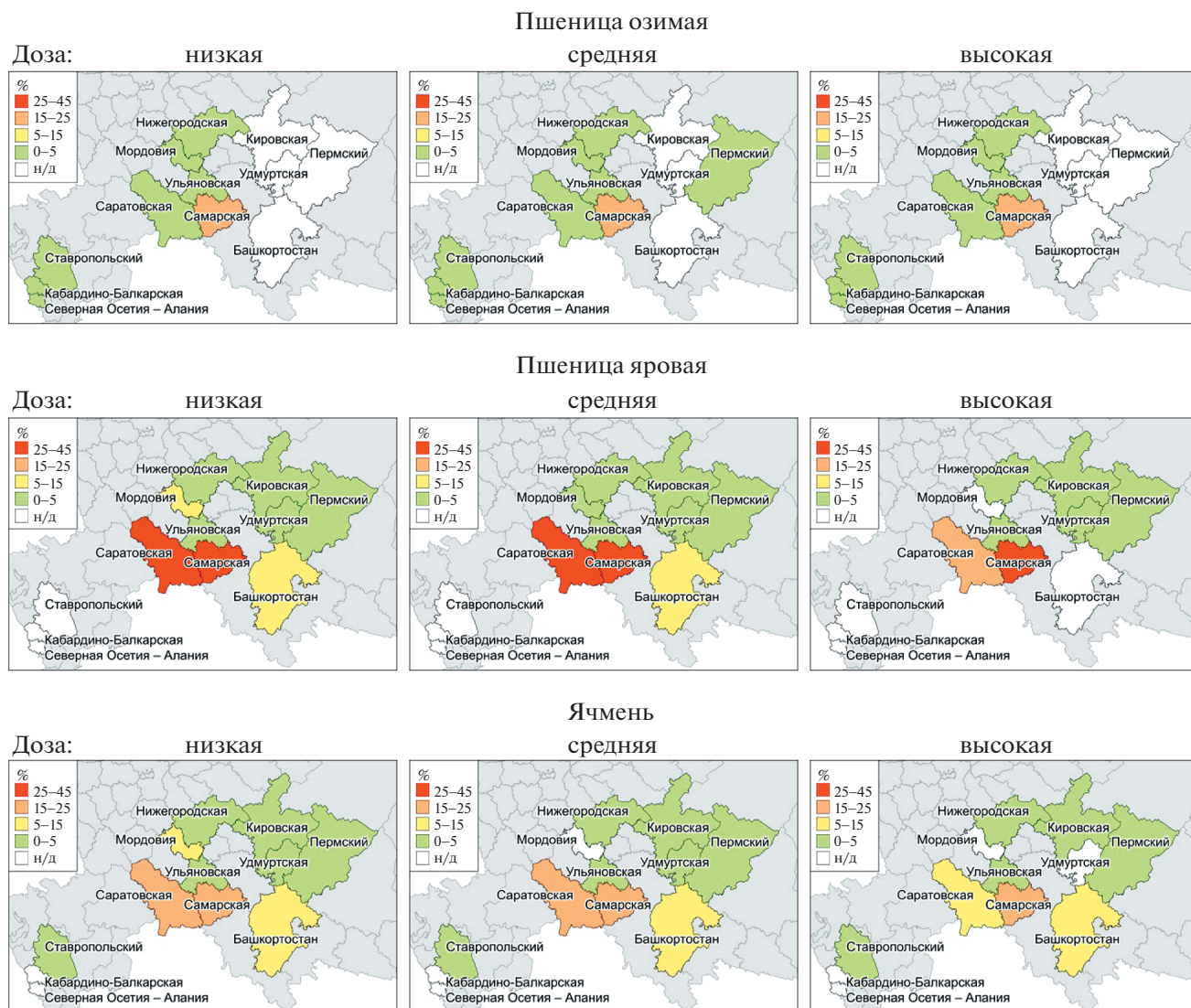
тали, наибольший рост варьирования (на 2–8 ц/га) характерен для озимых культур. При этом величины средней областной урожайности по статистическим данным и в длительных опытах в вариантах с высокой дозой азотных удобрений различались на 7–38 ц/га.

Оценка возможности управления урожаем зерновых культур в случае засухи путем оптимизации минерального питания растений проведена на основе расчетов климатических рисков для каждого длительного опыта для яровой и озимой пшеницы, ярового и озимого ячменя (рис. 3).

*Озимая пшеница.* Расчеты показали, что в Ульяновской, Саратовской и Нижегородской обл. и в Республике Мордовия относительная величина риска при выращивании озимой пшеницы для контрольных вариантов длительных опытов была меньше на 1–23%, чем для варианта расчета по

среднеобластным данным. Для Самарской обл. риски повысились на 4.5%. В опытах Ставропольского ГАУ и Ставропольского НИИСХ риск снизился на одну градацию. В опыте НИИСХ Юго-Востока средняя урожайность озимой пшеницы в контрольных вариантах составила 34.4 ц/га, средняя в области – 17.8 ц/га, риск недобора урожая снизился от высокого до очень низкого. Для опытов Мордовского НИИСХ, Ульяновской ГСХА, Горского ГАУ, Кабардино-Балкарского НИИСХ не произошло понижения градации изначально низкого и очень низкого риска недобора урожайности.

Внесение средних доз удобрений сопровождается относительным изменением величины риска в среднем на 28%, а высоких доз – на 68% по сравнению со среднеобластными данными. Максимальные абсолютные величины изменения риска



**Рис. 3.** Пространственное распределение рисков недобора урожая озимой и яровой пшеницы и ячменя (Поволжье – яровой, Северный Кавказ – озимый) в 1995–2020 гг. на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского ФО. Расчеты сделаны на основе данных опытов Геосети для низких, средних и высоких доз азотных удобрений.

составили при его изначально высоком и среднем уровне 5–27%, низком и очень низком – 1–2%.

Из сравнения рис. 1 и 3 можно видеть, что опыты в Саратовской обл., Мордовии, Удмуртии, Ставропольском и Пермском краях демонстрируют снижение риска на одну градацию по сравнению со среднеобластными данными, при этом снижение достигается и в контрольных вариантах опыта. Увеличение доз азотных удобрений не приводит к изменению градаций риска. На фоне наблюдаемого снижения рисков заметно его увеличение для Самарской обл.

**Яровая пшеница.** При возделывании яровой пшеницы в контрольных вариантах повысились риски в опыте Поволжского НИИСС на 10%,

произошло небольшое снижение рисков (на 2–5%) в опытах Мордовского НИИСС и НИИСС Юго-Востока. Необходимо отметить, что в опытах, проводимых в северных районах Приволжского ФО (Кировской обл., Пермском крае и Удмуртии) климатические риски, как и в случае анализа среднеобластных данных урожайности, отсутствовали.

Применение средних доз удобрений обеспечило сравнительно большее влияние на снижение абсолютной величины климатических рисков при возделывании яровой пшеницы по сравнению с соблюдением других элементов агротехнологии в опытах Поволжского НИИСС, Нижегородского НИИСС, Ульяновской ГСХА, Мордов-

ского и Башкирского НИИСХ. Влияние же высоких доз на дальнейшее снижение абсолютной величины рисков практически не прослеживалось. Разброс абсолютных величин изменения риска составил при его изначально высоком и среднем уровне 2–14%, а при низком и очень низком –1–5%. Из сравнения рис. 1 и 3 видно, что опыты в Удмуртии показали снижение риска на одну градацию по сравнению со среднеобластными данными в контрольных вариантах опыта. Увеличение доз азотных удобрений до средних снижало риск возделывания яровой пшеницы в Мордовии до низкого, а высокие дозы определяли снижение риска возделывания в Саратовской обл. от высокого до среднего. В то же время в Самарской обл. произошел рост рисков до высокого уровня.

Управление рисками с помощью увеличения доз азотных удобрений до высоких оказалось более эффективным приемом при возделывании яровой пшеницы по сравнению с озимой. Роль азотных удобрений может возрасти при уменьшении продолжительности вегетационного периода зерновых культур, когда достаточное азотное питание оказывается важным фактором в скорости прохождения фаз во время вегетации. В случае развития озимой культуры относительно меньшее влияние изменения доз азота в управлении рисками может быть связано со сглаживанием влияния климатических стрессов на развитие более длительно вегетирующей культуры, а также менее подверженному рискам периоду усвоения примерно половины требуемого для развития культуры азота осенью и ранней весной.

*Яровой ячмень.* Анализ возможности управления рисками при возделывании ячменя показал сравнительно малое их относительное снижение (0.2–13.3%) в контрольных вариантах по сравнению со среднеобластными показателями. Это не позволило достичь более низкой градации риска во всех длительных опытах, за исключением опыта НИИСХ Юго-Востока, где абсолютный риск снизился с 36 до 22% (от очень высокого к высокому). Можно отметить небольшое, на 1%, повышение риска в опыте Нижегородского НИИСХ. Вероятнее всего, поскольку ячмень не является ценной культурой в севообороте, на него могло оказывать влияние отсутствие лучшего предшественника.

Применение средних доз удобрений позволило понизить относительные риски на 1.3–19%, при этом только в одном случае – в опыте НИИСХ Юго-Востока – наблюдали переход от очень высокого до высокого риска. Влияние высоких

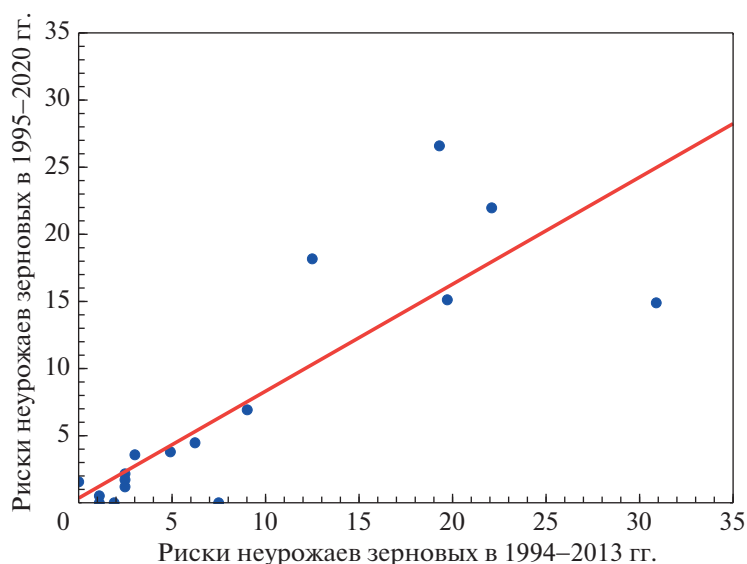
доз удобрений, как и в случае с яровой пшеницей, было менее выражено. Во всех 4-х опытах в северных районах Приволжского ФО климатические риски возделывания ячменя, как и в случае с яровой пшеницей, отсутствовали. Если при высоком и очень высоком уровне риска максимальные абсолютные величины его снижения составили 7–21%, при среднем, низком и очень низком они не превышали 1.9–3.3%.

Проведение сравнительных исследований на основе нескольких длительных опытов, осуществляемых в одном регионе, дает возможность выявить наиболее удачные технологические приемы и условия, обеспечивающие адаптацию систем земледелия к условиям засухи. Например, для ячменя более благоприятные условия складывались в опыте Нижегородской ГСХА, где на фоне применения средних доз удобрений было достигнуто снижение риска от низкого до очень низкого. В то же время в опыте Нижегородского НИИСХ даже высокие дозы азотных удобрений не позволили достичь снижения климатического риска <4%.

Сходные результаты получены и для озимого ячменя в 2-х опытах, проведенных в Ставропольском крае. Если в опыте Ставропольского НИИСХ достигнуто 3% снижение абсолютного риска по сравнению с наблюдениями в регионе (последовательно от среднего до низкого уровня) и отсутствие риска в вариантах с максимальной дозой удобрений, то в опыте Ставропольского ГАУ в контроле риск повышался на 1%, а при применении удобрений снижение составило только 0.2% по сравнению с региональными показателями.

При сравнении рис. 1 и 3 показано, что опыты в Саратовской, Ульяновской обл. и Ставропольском крае показали снижение риска возделывания ячменя на одну градацию по сравнению со среднеобластными показателями в контрольных вариантах. Увеличение доз азотных удобрений до высоких снижало риск возделывания ячменя в Саратовской обл. на 2 градации – от очень высокого до среднего. Для Самарской обл., Башкирии и Мордовии влияние доз азотных удобрений на управление рисками по сравнению со среднеобластными показателями не проявилось.

Результаты сопоставления рисков неурожая зерновых, рассчитанных по результатам опытов Геосети со средними дозами удобрений за 1995–2020 гг. и за 1994–2013 гг. представлены на рис. 4. Основное отличие от результатов, полученных по данным среднеобластной урожайности (рис. 2), заключается в том, что данные полевых опытов демонстрируют более значительное снижение



**Рис. 4.** Соотношение рисков неурожаев зерновых культур в 1994–2013 и 1995–2020 гг., %. Расчеты сделаны по данным опытов Геосети при средних дозах азотных удобрений.

(5–6% по сравнению с 2%) за период 1995–2020 гг. по сравнению с 1994–2013 гг. для областей средних и высоких рисков, в то время как при низких рисках тенденция к снижению не прослеживается. Также можно отметить, что рассчитанные риски не превышали 27% в 1995–2020 гг., в то время как по данным среднеобластной урожайности, максимум составил >35%.

Относительное снижение рисков составило 17% для низких доз, 19% — для средних доз и 11% — для высоких доз азота. Оно проявлялось при средних и высоких рисках неурожая зерновых культур. При низких рисках неурожая (до 5%) чаще наблюдался их рост, при этом риск оставался в пределах одной градации. При этом изменение рисков во времени оказалось различным для разных культур. Для озимой пшеницы наибольшее абсолютное снижение — 3–7% отмечено в Ставропольском крае, в остальных регионах Северного Кавказа снижение составило 0.8–1.8%, что в целом повторяет отмеченные тенденции при анализе среднеобластной урожайности. В Нижегородской и Ульяновской обл. снижение составило 0.1–1.9%. В большей степени влияние прослеживалось для средних доз азотных удобрений. Увеличение рисков возделывания озимой пшеницы в 1995–2020 гг. по сравнению с 1994–2013 гг. зафиксировало для Самарской обл. (5–6%) и Саратовской обл. (0.5–1.6%).

Сравнение 2-х периодов возделывания яровой пшеницы показывают в целом рост рисков, наиболее значительный для Самарской обл. (7–8%), Саратовской обл. (3.6%), Ульяновской обл. и

Мордовии (0.3–0.6%). В то же время условия возделывания ярового ячменя обнаружили тенденцию к снижению рисков. Риски понизились в Удмуртии на 7–16, в Самарской обл. — на 5, в Саратовской и Ульяновской обл. — на 2 и в Кировской и Нижегородской обл. — ≈к 1%.

*Уровень окультуренности и риски.* Наблюдаемые тенденции к изменению рисков в различных учреждениях Геосети по сравнению со среднеобластными данными сравнивали с уровнем окультуренности в вариантах длительных опытов. Табл. 2 содержит информацию о содержании подвижных форм фосфора и калия в пахотном слое вариантов опытов в качестве критериев окультуренности почвы. В большинстве случаев наблюдается рост содержания подвижных форм обоих элементов при сравнении контрольных вариантов и вариантов со средними дозами. Содержание подвижных форм фосфора и калия сравнивали со средним содержанием элементов в пахотных почвах субъектов РФ, где расположены опыты. Для сравнения использовали данные текущих агрохимических обследований. Для 11-ти учреждений, приведенных в табл. 2, в 6-ти из них зафиксирован рост содержания фосфора, соответствующий в 2-х случаях повышению обеспеченности на 2 градации, а в 4-х — на одну градацию. Внесение высоких доз удобрений обусловило дополнительное увеличение обеспеченности еще на одну градацию в 6-ти случаях. Вместе с тем тенденция к росту обеспеченности фосфором не выявлена для НИИСХ Юго-Востока, Ульяновской ГСХА,



**Таблица 2.** Изменение показателей почвенного плодородия в опытах Геосети на территории Приволжского и Северо-Кавказского ФО за период 1994–2013 гг.

Субъект РФ: область, республика, край	Учреждение Геосети	Подвижный фосфор			Подвижный калий		
		мг/кг почвы					
		контроль без удобрений	средняя доза	высокая доза	контроль без удобрений	средняя доза	высокая доза
Саратовская	НИИСХ Юго-Востока	12.2 ▼	20.0	17.7	345 ▼	330 ▼	276 ▼▼
Самарская	Поволжский НИИСС	186 ▲	270 ▲▲	325 ▲▲	217 ▲	270 ▲	280 ▲
Нижегородская	Нижегородская ГСХА	96	137 ▲	160 ▲▲	65	142	136
Нижегородская	Нижегородский НИИСХ	198 ▲	215 ▲	387 ▲▲	80	103	254 ▲▲
Ульяновская	Ульяновская ГСХА	119	118	Нет данных	123	121	Нет данных
Пермский	Пермский НИИСХ	185 ▲	235 ▲▲	294 ▲▲	105	198 ▲	292 ▲▲
Удмуртская	Удмуртский НИИСХ	76 ▼	190	175	122	161 ▲	149 ▲
Ставропольский	Ставропольский ГАУ	21.4	24.2	24.0	265	275	275
Ставропольский	Ставропольский НИИСХ	18	48 ▲	64 ▲▲	218	195 ▼	199 ▼
Кабардино-Балкария	Кабардино-Бал- карский НИИСХ	22.5	44.5 ▲	58.5 ▲▲	370	450 ▲	505 ▲
Северная Осетия	Горский ГАУ	81	88	103 ▲	146	151	158

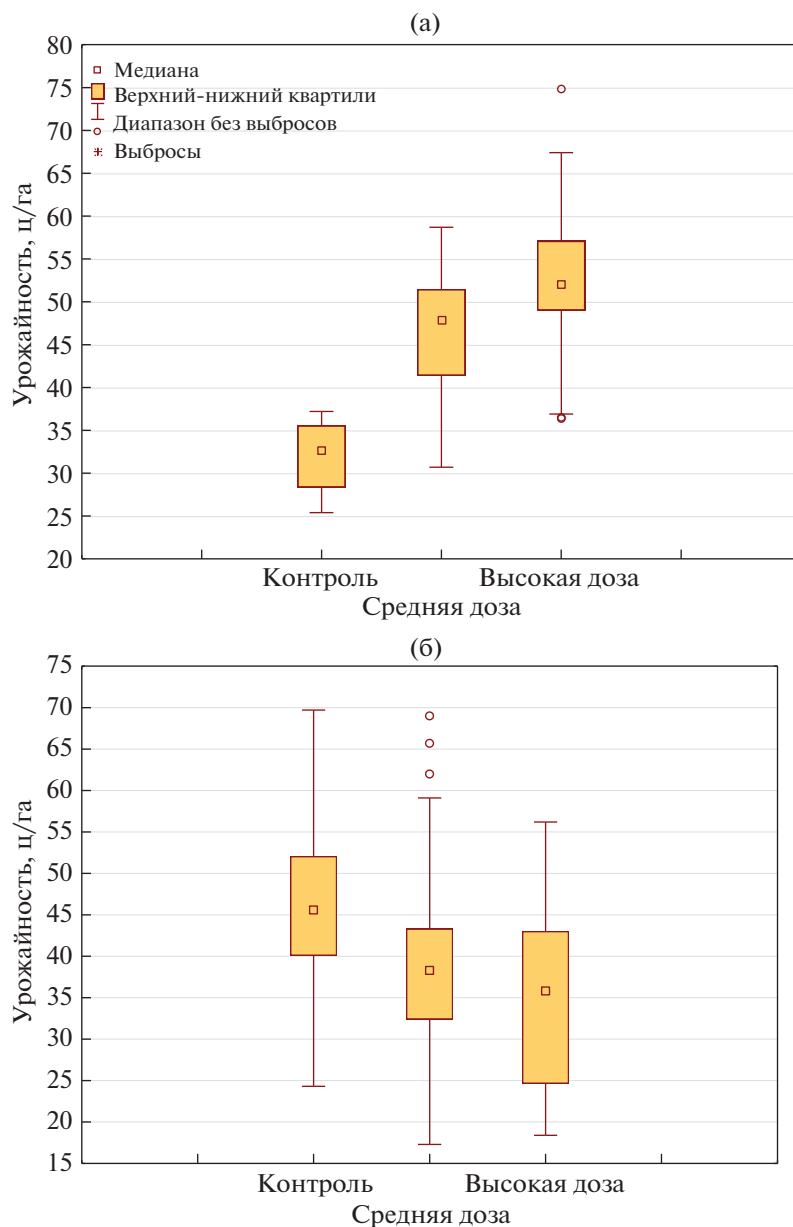
Примечание. ▲/▲▲ – рост на одну или 2 градации, ▼/▼▼ – снижение на одну или 2 градации по сравнению со средним содержанием элемента питания в пахотных почвах субъекта РФ.

Ставропольского НИИСХ, Удмуртского НИИСХ и слабо была выражена для Горского ГАУ.

Содержание подвижного калия также имело тенденцию к росту с увеличением доз примененных удобрений, но выраженную в меньшей степени. Например, при средних дозах увеличение обеспеченности на 1 градацию зафиксировано в 4-х случаях без дальнейшего роста при высоких дозах. Высокие дозы применения удобрений приводили к росту обеспеченности на 2 градации по сравнению со средними показателями в субъекте РФ только в 2-х случаях. Для НИИСХ Юго-Востока и Ставропольского НИИСХ наблюдали снижение обеспеченности калием на 2 и 1 градацию соответственно, в варианте применения высоких доз по сравнению со среднеобластными показателями. В 4-х случаях – для Ставропольского ГАУ, Ульяновской и Нижегородской ГСХА

и Горского ГАУ – значительного роста обеспеченности калием не отмечено.

Полученные результаты по снижению или отсутствию роста обеспеченности фосфором и калием можно сопоставить с зафиксированным возрастанием риска при возделывании ячменя при внесении средних доз удобрений в НИИСХ Юго-Востока; увеличением риска при возделывании ячменя при максимальной дозе удобрений в опытах Ставропольского ГАУ в 1995–2020 гг. Сопоставление 2-х временных периодов показывает рост риска при возделывании озимой пшеницы на 5 и 2% в опытах Ставропольского ГАУ по сравнению со Ставропольским НИИСХ на фоне высоких доз удобрений в период 1994–2013 и 1995–2020 гг. соответственно. Для озимого ячменя за период 1995–2020 гг. различия в рисках составляют 4%. Таким образом, влияние окульту-



**Рис. 5.** Диаграмма размаха урожайности озимой пшеницы в длительном опыте Геосети Кабардино-Балкарского НИИ-ИСХ (а) и Ставропольского ГАУ (б) за период 1994–2013 гг.

ренности сопоставимо с наблюдаемым изменением урожайности при сравнении 2-х временных периодов.

Вместе с тем для Поволжского НИИСС, где наблюдали рост окультуренности почвы при увеличении доз удобрений, в 1995–2020 гг. риск производства зерновых понизился для вариантов со средними и высокими дозами удобрений на 6–7% только для ячменя, не изменился для озимой пшеницы и вырос на 6% для яровой пшеницы при сравнении со среднеобластной урожайностью. Эти данные отличаются от периода 1994–

2013 гг., когда риски удавалось снизить на 15–16% для всех зерновых культур.

Важно, чтобы в случае, когда показатели плодородия в опыте Геосети оказывались выше по сравнению с показателями, характерными для пахотных почв региона, при последовательном увеличении доз удобрений рост медианы оказывался достоверным с учетом диапазона варьирования урожайности в выборке. Такая зависимость прослежена, например, в опыте Кабардино-Балкарского НИИССХ, в котором окультуренность почвы росла с повышением доз (рис. 5а, табл. 2). Обратная за-

висимость отмечена в опыте Ставропольского ГАУ в отсутствии тренда роста обеспеченности фосфором и калием, где варьирование не снижалось с ростом доз удобрений при снижении медианы (рис. 5б, табл. 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение климатически обусловленных рисков для озимой и яровой пшеницы и озимого и ярового ячменя на территории субъектов Приволжского и Северо-Кавказского федеральных округов за 1994–2013 и 1995–2020 гг. показало устойчивость полученных оценок во времени. Зона высоких рисков неурожая яровой пшеницы и ярового ячменя охватывает территорию Саратовской и Самарской обл., средние риски недобора урожайности отмечены в Башкортостане и Мордовии.

Во второй период наблюдений прослежено абсолютное снижение рисков, в целом в выборке составившее 2%. Наблюдаемая тенденция может быть связана со сравнительно более благоприятными климатическими условиями последних лет для реализации урожайности. Наибольшее снижение претерпели оценки рисков для Ставропольского края, среди культур — для яровой пшеницы.

Оценка возможности управления рисками, по данным опытов Геосети, показала, что за тот же период наблюдали снижение рисков до 5–6%. Относительное снижение рисков проявлялось при средних и высоких рисках неурожая зерновых культур и составило 19% для средних доз, 17% для низких доз и 11% для высоких доз азотных удобрений. Снижение обеспечивалось главным образом улучшением условий возделывания ярового ячменя для изученной территории и озимой пшеницы на Северном Кавказе.

Показано, что снижение или отсутствие роста обеспеченности фосфором и калием можно сопоставить с зафиксированным возрастанием риска для зерновых культур, что указывает на необходимость сбалансированного внесения удобрений для управления почвенным плодородием.

В результате исследования установлено, что по мере роста урожайности зерновых культур экспериментально подтверждается также возможность управления устойчивостью систем земледелия. Оно может быть достигнуто как за счет оптимизации доз минеральных удобрений, так и расширения посевных площадей зерновых культур, риски возделывания которых снижаются в условиях современного климата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. СПб., 2017. 106 с.
2. Lobell D.B., Schlenker W., Costa R.J. 2011: Climate trends and global crop production since // *Science*. 1980. V. 333 (6042). 616620.
3. Агрострахование: новые горизонты. Годовой отчет 2018. 52 с.
4. Diffenbaugh N.S., Field C.B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions // *Science*. 2013. V. 341. P. 486–492.
5. Романенков В.А., Павлова В.Н., Беличенко М.В. Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов Геосети // *Агротехника*. 2018. № 1. С. 77–86.
6. Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России // *Тр. ГГО*. 2012. Вып. 565. С. 132–151.
7. Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв // *Метеоролог и гидролог*. 1995. № 4. С. 107–114.
8. Sirotenko O.D. Crop modelling: Advances and problems // *Agron. J.* 2001. V. 93. P. 650–653.
9. Груза Г.В., Ратькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
10. Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. 034010. <https://doi.org/2019https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8be1>
11. Павлова В., Караченкова А. Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России // *Фундамент. и прикл. климатол.* 2021. № 4. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-4-68-87>
12. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Анализ и оценка уязвимости и риска производства зерновых культур при современных изменениях климата в Калужском регионе // *Тр. регион. конкурса проектов фундамент. научн. исслед-й. Калуж. гос. ин-т развития образования*. 2016. Вып. 21. С. 246–251.
13. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценка климатических рисков при производстве зерновых культур в Приволжском федеральном округе // *Агрофизика*. 2017. № 2. С. 1–8.
14. Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожая зерновых культур в зерносеющих регионах России // *Метеоролог и гидролог*. 2017. № 8 (в печати).
15. Страшная А.И., Коренкова Н.В. О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы // *Тр. ГМЦ России*. 2005. Вып. 340. С. 25–34.
16. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.

## Agrotechnological Possibilities of Climate Risk Management in the Cultivation of Grain Crops

V. A. Romanenkov<sup>a,c,#</sup>, V. N. Pavlova<sup>b</sup>, and M. V. Belichenko<sup>c,##</sup>

<sup>a</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University  
Leninskie gory, 1, p. 12, Moscow 119992, Russia*

<sup>b</sup>*All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Meteorology  
prosp. Lenina 82, Kaluga region, Obninsk 249038, Russia*

<sup>c</sup>*D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: romanenkov@soil.msu.ru*

<sup>##</sup>*E-mail: geosetvniia@gmail.com*

A comparison of the resistance of agricultural crops to droughts in some regions of the Volga and North Caucasus Federal Districts, obtained on the basis of statistical data and data from a Geographical network of experiments with fertilizers for the periods 1994–2014 and 1995–2020, allowed us to identify trends and spatial patterns of climatic risks of loss of winter and spring wheat and barley. It is shown that climate-related risks are stable over time and decrease in the row spring wheat > barley > winter wheat. Optimization of mineral nutrition of plants reduces the risk of shortage of grain crops in case of drought in most cases by one gradation. The greatest relative risk reduction (11–19%) for long-term field experiments with fertilizers indicates more favorable conditions for the realization of bioclimatic potential by grain crops in experiments compared to production conditions due to better agricultural technology and a higher level of soil fertility in experimental plots. The possibility of managing the sustainability of farming systems by optimizing the doses of mineral fertilizers and increasing the acreage of grain crops, the risks of cultivation of which are reduced in the conditions of modern climate, has been experimentally confirmed.

*Key words:* agrotechnologies, climatic risks, cultivation of grain crops.