ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 2, с. 220–231

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 551.586:631.85:633.11

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА (ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ ФАЛЕНСКОЙ СЕЛЕКЦИОННОЙ СТАНЦИИ, КИРОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2022 г. О. Э. Суховеева[a], *, И. В. Лыскова[b], Т. В. Лыскова[b]

[a]*Институт географии РАН, Москва, Россия*

[b]*Федеральный аграрный научный центр им. Н.В. Рудницкого, Киров, Россия*

**e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com*

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.
После доработки 04.09.2021 г.
Принята к публикации 15.12.2021 г.

По результатам длительного полевого опыта Фаленской селекционной станции (Кировская область) с внесением удобрений, заложенного в 1971 г., оценено влияние температуры воздуха и колебания количества осадков на урожайность и содержание белка в зерне яровой пшеницы. В Кировской области, лежащей на северной границе зоны земледелия в зоне избыточного увлажнения, за 1971–2020 гг. температура воздуха росла со скоростью 0.39°C/10 лет, менее интенсивно по сравнению с другими регионами страны. Несмотря на прерывистый ряд данных по урожайности, при оценке влияния на нее погодных условий вегетационного периода отмечены положительные корреляции урожайности с количеством осадков в июне и отрицательные – с температурой воздуха в этот месяц. По результатам регрессионного анализа климатические условия обуславливали 49–74% дисперсии урожайности. Известкование дерново-подзолистых почв и внесение удобрений позволяли не только повысить продуктивность культуры на 30–50%, но и снизить дисперсию параметров, обусловленную колебаниями погодных условий, на 7–10%. Содержание сырого протеина в зерне также в большей степени определялось внесением удобрений, при этом на него отрицательно влияли как повышение температуры, так и увеличение количества осадков в период созревания. Подтверждается ведущая роль антропогенных факторов (известкования, внесения удобрений) в поддержании урожайности и сохранении качества зерна на фоне современного потепления климата в северных регионах.

Ключевые слова: агроклиматические ресурсы, биоклиматический потенциал, дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы, корреляционно-регрессионный анализ, сырой протеин, фосфорные удобрения, яровая пшеница

DOI: 10.31857/S2587556622020108

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что изменения урожайности по всему миру вызваны вариабельностью агроклиматического потенциала, технологиями возделывания культур, а также метеорологическими условиями (Cabas et al., 2010). На сегодняшний день большинство ученых сходятся во мнении, что происходящие климатические изменения будут отрицательно влиять на продуктивность сельскохозяйственных культур. Ожидается сокращение урожайности основных зерновых культур на 25–44% по сценарию медленного потепления и на 60–79% по сценарию быстрого потепления (Schlenker and Roberts, 2006). Вместе со снижением средней урожайности многократно увеличивается риск возникновения неурожаев (Якушев, 2009).

Хотя некоторые авторы утверждают, что в северных регионах России низкие температуры являются фактором, лимитирующим развитие растений, поэтому изменение климата и повышение температуры, весьма вероятно, приведет к усилению фотосинтеза и увеличению растительной биомассы (Анисимов и др., 2011). В связи с этим ожидается, что зоны земледелия будут смещаться на север, где рост температур будет благоприятствовать развитию растениеводства на фоне достаточного увлажнения. А увеличение посевных площадей и, соответственно, валовых сборов зерна там, где ожидается рост урожайности зерновых, сможет перекрыть отрицательный эффект влияния

Таблица 1. Оценка урожайности сельскохозяйственных культур в полевом опыте Фаленской селекционной станции

Источник данных	Средняя урожайность в полевом опыте Фаленской селекционной станции		Данные Росстата по Кировской области (2000–2020 гг., период с данными в открытом доступе)		
культура	за весь период наблюдений (1971–2020 гг.), т/га	за сопоставимый период (2000–2020 гг.), т/га	средняя урожайность, т/га	площадь, тыс. га	доля в общей посевной площади, %
Овес	3.30 ± 0.65	3.20 ± 1.11	1.73 ± 0.39	72.58	6.97
Озимая рожь	4.21 ± 1.22	4.71 ± 1.02	1.59 ± 0.35	106.06	10.18
Яровая пшеница	2.14 ± 0.86	2.36 ± 1.01	1.52 ± 0.33	104.91	10.07
Ячмень	3.04 ± 0.61	Не возделывался	1.86 ± 0.34	105.21	10.10
Клевер	11.11 ± 8.75	15.97 ± 11.24	Не выделяется отдельно	518.19 (для многолетних трав)	49.74 (для многолетних трав)

климатических изменений на зерновое хозяйство в целом (Павлова, 2013). Скорее всего, это будет реализовано за счет переноса посевов фуражного зерна за пределы зоны рискованного земледелия (Катцов, 2011).

И все-таки, как климатические изменения будут влиять на сельское хозяйство в северных регионах? Ответить на вопросы, касающиеся оценки влияния агроклиматических параметров на урожайность культур, позволяют длительные полевые опыты. На сегодняшний день старейшим в мире из них является Ротамстед[1], заложенный еще в 1843 г. В России поддерживается 77 полевых опытов, из них 42 длительностью более 50 лет[2].

Базой для проведения настоящего исследования послужила Фаленская селекционная станция – филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого – одно из старейших научных учреждений России, которая в 2020 г. отметила свое 125-летие. Она находится в восточном районе центральной агроклиматической зоны Кировской области – в Волго-Вятском экономической районе, в северо-восточной части Европейской территории России. Профессор А.И. Калинин заложил на селекционной станции в 1971 г. многолетний полевой опыт, в котором оценивается влияние минеральных удобрений на урожайность и качество зерна (Калинин, 2004). Основное назначение станции – создание новых сортов озимой ржи, овса, гороха, льна-долгунца, клевера и картофеля с высоким потенциалом продуктивности, адаптированных к условиям северо-востока Нечерноземной зоны России. В длительном полевом опыте Фаленской селекционной станции представлены все основные культуры региона, а их урожайность выше, чем в среднем по области (табл. 1).

Пример интересен тем, что Кировская область расположена практически на северной границе зоны земледелия, которая на европейской территории России проходит примерно по 60° с.ш. Регион лежит в области холодного (континентального) типа климата *Dfb* по классификации Кеппена, с теплым летом без выраженного сухого сезона. Это зона рискованного земледелия, что многократно повышает важность климатических условий для сельского хозяйства.

Данное исследование является продолжением анализа влияния локального изменения климата на продуктивность яровых зерновых культур (Лыскова и др., 2021). Его цель – оценить воздействие климатических изменений и вносимых удобрений на урожайность и качество зерна яровой пшеницы в полевом опыте на северной границе зоны земледелия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевой опыт Фаленской селекционной станции. Исследования проведены в условиях длительного полевого стационарного опыта.

Станция и прилегающие к ней земли находятся на всхолмленной увалистой повышенной равнине, рассеченной долинами рек, входящих в систему бассейна р. Вятки. Преобладающими элементами рельефа являются склоны, обычно небольшой крутизны (3°–5°), хорошо выражен микрорельеф в виде замкнутых округлых или вытянутых небольших по размеру понижений-“протяжин”, резко выделяющихся на пахотных угодьях своей темной окраской. Грунтовые воды на основной территории равнины расположены

[1] Rothamsted research: guide to the classical and other long-term experiments, datasets and sample archive. Harpenden: Premier Printers Ltd., 2006. 53 p.

[2] Реестр аттестатов длительных опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами Российской Федерации. М.: ВНИИ агрохимии, 2012. http://www.geo-set.ru/ishop/sort/1 (дата обращения 21.08.2021).

Таблица 2. Климатические условия в восточном районе центральной агроклиматической зоны Кировской области (по данным метеостанции Фаленки за 1971–2020 гг.)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Температура воздуха, °C	–13.2	–11.9	–5.1	2.9	11.0	15.8	18.1	15.1	9.4	2.1	–5.2	–10.5	2.4
Осадки, мм	44.7	30.1	38.4	37.7	44.8	69.5	74.4	67.9	59.7	68.7	54.2	47.1	637.4

глубоко (10–20 м) и влияния на почвообразование не оказывают. Преобладающим элементом ландшафта являются полевые угодья.

Почва дерново-подзолистая среднесуглинистая, сформированная на покровных суглинках. Агрохимическая характеристика почвы перед закладкой опыта (1971 г.): pH_{KCl} 4.2–4.5; гидролитическая кислотность 5.4–6.7 мг-экв./100 г; содержание подвижных элементов 71–73 мг P/кг почвы и 90–116 мг K/кг почвы, гумуса 2.7%. Опыт проводится в зерно-паро-травяном севообороте, в который входят такие культуры как озимая рожь по чистому пару, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер луговой 1-го и 2-го года пользования, овес (до 1992 г. возделывали ячмень).

В опыте изучается эффективность азотных (90 кг N/га) и возрастающих доз фосфорных удобрений в количестве 50, 100, 150 и 200 кг P/га (варианты NP1K, NP2K, NP3K и NP4K соответственно) при внесении калийных удобрений (90 кг K /га) на известкованном (pH 5.4–6.4) и неизвесткованном (pH 3.8) фоне. Удобрения в виде аммиачной селитры (34%), суперфосфата (19.5–45.0%) и калия хлористого (60%) вносятся весной перед культивацией (вручную). Известь в дозе по гидролитической кислотности внесена в 1971, 1979, 1987, 2009 гг. в форме доломитовой муки.

В зерне определяли общий азот по методу Къельдаля в модификации Сереньева, пересчитывали на сырой протеин, используя коэффициент 5.7.

Для проведения статистического анализа была выбрана яровая пшеница, поскольку продолжительность ряда данных для этой культуры наибольшая и составляет 12 лет (тогда как остальные культуры выращивались в опыте лишь 4–7 лет): она возделывалась на участке в 1971–1975, 2003–2004, 2007, 2010, 2013, 2017, 2020 гг.

Использовались корреляционный, регрессионный и дисперсионный анализы.

Климатические условия. Для исследования использовали данные за 1971–2020 гг. метеостанции Фаленки (58.3° с.ш., 51.6° в.д., 178 м над ур. м.), расположенной на расстоянии 3 км от полевого опыта. Были рассчитаны основные агроклиматические параметры тепло- (сумма активных температур) и влагообеспеченности вегетационного периода (гидротермический коэффициент Селянинова, индекс сухости Будыко, коэффициент увлажнения Сапожниковой).

Был определен биоклиматический потенциал (БКП), сочетающий оценки ресурсов тепла, влаги и минерального питания, – балльная оценка степени доступности для растений питательных веществ, находящихся в почвенном растворе на конкретной территории:

$$\text{БКП} = K_P \frac{\sum T_{\text{среднесут}>10°\text{C}}}{\sum T_{\text{базис}}}.$$

K_p – коэффициент биологической продуктивности климата, зависящий от влагообеспеченности, чаще всего используется коэффициент увлажнения Сапожниковой, $T_{\text{базис}}$ – базисная сумма среднесуточных температур воздуха за период активной вегетации (величина, относительно которой осуществляется сравнительная оценка). В качестве базисных могут быть взяты: 1000°C – для сравнения с продуктивностью на границе возможного массового полевого земледелия, 1900°C – для сравнения со средней по стране продуктивностью, свойственной южнотаежно-лесной зоне, 3100°C – для сравнения с продуктивностью в оптимальных условиях роста, характерных для предгорных лесостепных районов Краснодарского края (Ермакова и др., 2010).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Агроклиматические условия. В восточном районе центральной агроклиматической зоны Кировской области среднегодовая температура за 1971–2020 гг. равна 2.4 ± 1.0°C, интенсивность ее роста составила 0.39°C/10 лет (рис. 1). Это, безусловно, ниже, чем на всей Европейской территории России (0.53°C/10 лет) и в среднем по стране (0.43°C/10 лет) по данным Росгидромета[3]. Среднегодовое количество осадков составляет 637 ± 87 мм (табл. 2). Другие исследователи подтверждают тренд увеличения температуры в центральной климатической зоне Кировской области и уменьшение количества осадков в вегетационный период (Щенникова, 2014).

Сумма активных температур за период 1971–2020 гг. равна 1800 ± 144°C. Интересно отметить, что по этому признаку область лежит в прохладном подпоясе среднеранних культур, ограничен-

[3] WMO, Roshydromet. 2014. https://public.wmo.int/en/media/news-from-members/second-roshydromet-assessment-report-climate-change-and-its-consequences

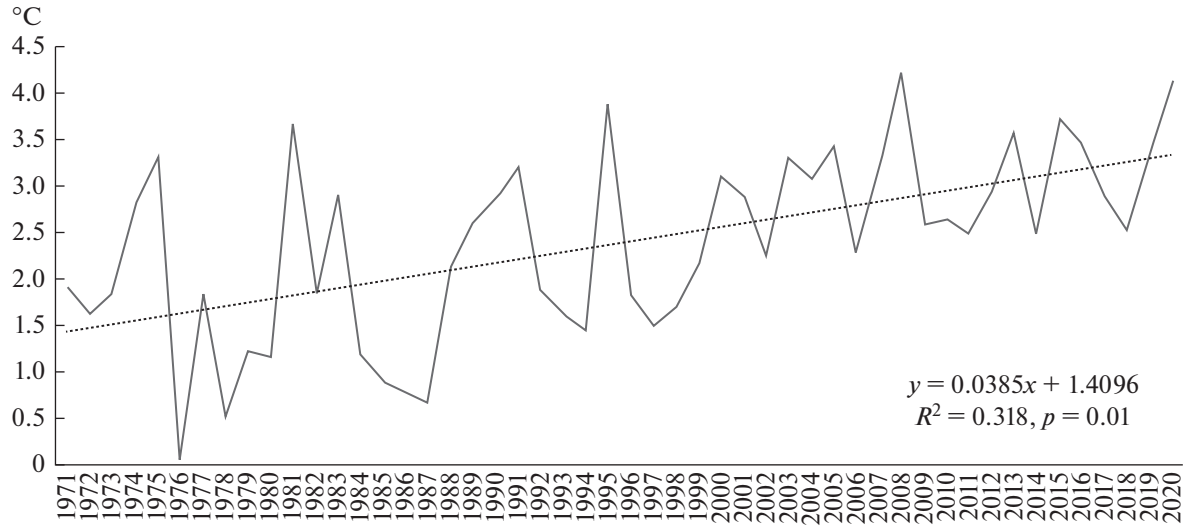

Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры воздуха в восточном районе центральной агроклиматической зоны Кировской области за 1971–2020 гг. (по данным метеостанции Фаленки), °С.

ном изотермами 1600–2200°С и входящем в умеренный земледельческий пояс по классификации Сапожниковой (1977).

Значения гидротермического коэффициента Селянинова 1.44 ± 0.45, коэффициента увлажнения Сапожниковой 1.28 ± 0.25, индекса сухости Будыко 0.63 ± 0.11 говорят о достаточном и в некоторые годы избыточном увлажнении региона. Показатели влагообеспеченности относительно стабильны: коэффициенты вариации составляют 13.6% для годовой суммы осадков и 18.2, 31.2, 19.6% для обозначенных коэффициентов увлажнения, что соответствует низкой и средней вариабельности.

БКП – функция различных климатических факторов, включающая температурные условия, увлажнение и тип почвы, которые определяют возможную биологическую продуктивность. В Фаленском районе БКП равен 1.21. Это ниже среднего (1.9) и соответствует низкой биологической продуктивности (Сиротенко, Павлова, 2010).

Почвенные условия. Величина и скорость изменения агрохимических свойств почвы под действием удобрений зависит от целого ряда факторов: климатических условий, химического состава материнской породы и ее толщи, буферности почвы.

По результатам агрохимических анализов, внесение извести по полной величине гидролитической кислотности обеспечило поддержание показателя pH_{KCl} на уровне 6.39–6.70 (в образцах почвы, взятых через год после известкования). Тогда как на фоне без извести к 2020 г. наблюдалась стабилизация кислотности без существенной разницы по вариантам опыта (табл. 3). Снижение показателя pH на фоне без извести к 2020 г. относительно 1972 г. составило в среднем 0.012 единицы в год, тогда как при известковании оно было более интенсивным – на 0.110 единицы ежегодно. Гидролитическая кислотность ниже (7.26 мг-экв./100 г) в варианте без удобрений, чем в вариантах с внесением удобрений (7.67–8.24 мг-экв./100 г) на фоне без извести. Обменная кислотность под действием известкования снизилась с 1.43–1.76 до 0.03–0.05 мг-экв./100 г почвы.

Внесение $N_{90}P_{50}K_{90}$ (вариант NP1K) обеспечивало поддержание подвижного фосфора на уровне не менее 100 мг/кг почвы (с учетом его выноса сельскохозяйственными культурами 2.11–3.71 т/га). В почве других вариантов опыта обеспеченность по элементу была высокая и очень высокая на обоих фонах, а также сохранилась разница по содержанию подвижного фосфора с учетом ранее внесенного. Надо отметить, что покровные суглинки региона содержат преимущественно фосфаты кальция, которые доминируют над фосфатами железа и алюминия. Содержание подвижных фосфатов в материнской породе составляет около 80 мг/кг почвы (Калинин, 2004).

Обеспеченность почвы подвижным калием после внесения в дозе 90 кг/га д.в. (ежегодно) повышенная и высокая на обоих фонах. Благодаря тому, что калий закрепляется в почве в доступной для растений форме, он хорошо ими используется. Существенно ниже содержание подвижного калия в тех вариантах, где его не вносили.

Содержания гумуса в почве осталось на уровне исходных данных (см. табл. 3), при этом в варианте без удобрений снижение составило 14.7%, на произвесткованном фоне отмечено его увеличение на 7.4%.

Таблица 3. Динамическая характеристика агрохимических свойств пахотного слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в длительном полевом опыте Фаленской селекционной станции

Фон*	Вариант	pH_{KCl}				Гидролитическая кислотность Нг, мг-экв./100 г почвы				Содержание подвижного фосфора P_2O_5, мг/кг почвы				Содержание подвижного калия K_2O, мг/кг почвы				Гумус, %
		Год																
		1972	1988	2010	2020	1972	1988	2010	2020	1975	2007	2015	2020	1975	2007	2015	2020	2008
0	0	4.5	3.88	3.99	3.93	4.51	4.55	6.99	7.01	73	74	88	84	–	188	92	113	2.31
	N90	4.4	3.72	3.93	3.82	5.03	5.03	7.12	7.60	72	79	84	77	117	150	90	112	2.66
	NP1K	4.4	–	3.96	3.72	4.90	4.99	7.53	8.78	156	59	113	120	166	154	139	188	2.99
	NP4K	4.3	–	3.83	3.78	4.50	4.94	7.87	8.11	395	101	285	195	166	196	109	181	2.52
1	0	6.8	6.70	6.39	5.32	1.3	0.96	1.34	2.62	73	71	54	66	117	167	75	111	3.05
	N90	6.6	6.60	6.40	5.26	1.4	1.05	1.09	2.28	71	76	60	89	–	180	101	117	3.05
	NP1K	6.7	–	6.39	5.40	1.3	1.05	1.26	2.87	154	74	122	142	–	182	124	173	3.13
	NP4K	6.6	–	6.48	5.39	1.4	1.34	1.09	2.87	401	122	376	214	166	160	121	162	2.70

Примечание. * 0 – фон без извести; 1 – фон с внесением извести.

К сожалению, небольшой ряд наблюдений, а также несовпадение лет, когда возделывали пшеницу и проводили почвенные анализы, не дает возможность установить статистические зависимости урожайности от агрохимических параметров.

Влияние изменчивости параметров климата на урожайность. По результатам корреляционного анализа влияния температуры воздуха и количества осадков по месяцам вегетационного периода (с мая по сентябрь) на урожайность яровой пшеницы были получены следующие результаты (табл. 4). Статистические связи наблюдались только с погодными условиями июня: прямые – с количеством осадков, и обратные – с температурой воздуха, которая выступает лимитирующим фактором. Зависимость урожайности от сумм активных температур, гидротермического коэффициента, а также температуры воздуха и количества осадков за год статистически не подтверждена. Кроме того, условия зимы также не оказывали влияния на продуктивность культуры в опыте.

По результатам регрессионного анализа (табл. 5), гидротермические условия (температура воздуха и количество осадков в июне) – объясняли 49–74% дисперсии урожайности яровой пшеницы. Это достаточно высокая величина, поскольку обычно для зерновых культур влияние климатических факторов оценивается в среднем в 37% (Павлова, Варчева, 2017).

Набор выявленных независимых переменных требует особого внимания, поскольку климат становится жарче и суше, а недостаток почвенной влаги, особенно в критические периоды развития влаголюбивых культур, может представлять серьезную угрозу (Cai et al., 2009). Это представляется более важным, поскольку условия увлажнения в июне чаще достаточные ($ГТК_{VI}$ = 1.47), а регион, как уже отмечено выше, лежит в области избыточного увлажнения.

Известно, что повышение температуры и колебания количества осадков приводят к снижению продуктивности культур и росту ее вариабельности (Cabas et al., 2010). Урожайность яровой пшеницы в опыте колебалась в широких пределах, что подтверждается высоким коэффициентом вариабельности – 40.1%.

Неудивительно, что увеличение количества осадков способствует росту урожайности. В годы, когда на опытном поле возделывалась яровая пшеница, количество осадков в июне были ниже климатической нормы (69.5 мм): от 4.9 мм в 1973 г. до 64.8 мм в 2004 г.; за 3 года из 12 их сумма превысила норму: от 71.5 мм в 2007 г. и 74.0 мм в 2010 г. до 129.8 мм в 2003 г.

Растения в фазы “кущения”, “выхода в трубку” и “колошения”, которые в Кировской области как раз приходятся на июнь, чрезвычайно требовательны к влаге, поскольку в этот период формируются генеративные органы (Щенникова, 2014). Фактически, период “трубкование–колошение” является критическим по влагопотреблению (Пряхина и др., 2008). Ведь снижение влажности почвы резко тормозит идущие интенсивно ростовые процессы и накопление органического вещества, что приводит к падению урожайности (Шайхутдинов и др., 2008). Одновременно засушливая погода в этот период негативно влияет на опыление (Hatfield, Prueger, 2015).

Температура воздуха в июне в годы возделывания пшеницы также чаще всего была ниже климатической нормы (15.8°C): от 13.1°C в 1971 и

Таблица 4. Коэффициенты корреляции продуктивности яровой пшеницы с гидротермическими условиями среды в полевом опыте ($p < 0.05$, $N = 12$)

Вариант опыта	Показатель	Фон*	Количество осадков		Температура воздуха			ГТК Селянинова
			Месяц					
			VI	VIII	IV	VI	VII	
Без удобрений	Урожайность, т/га	0	0.62	–	–	–0.73	–	–
		1	0.81	–	–	–0.69	–	–
	Содержание сырого протеина, %	0	–	–	0.62	–	–0.60	–
		1	–	–	–	–	–	–
N90	Урожайность, т/га	0	0.71	–	–	–0.73	–	–
		1	0.81	–	–	–0.71	–	–
	Содержание сырого протеина, %	0	–	–	–	–	–	–
		1	–	–	–	–	–	–
NP1K	Урожайность, т/га	0	0.60	–	–	–0.64	–	–
		1	0.75	–	–	–0.70	–	–
	Содержание сырого протеина, %	0	–	–0.72	–	–	–	–
		1	–	–	–	–	–	–0.58
NP4K	Урожайность, т/га	0	0.66	–	–	–0.72	–	–
		1	0.72	–	–	–0.72	–	–
	Содержание сырого протеина, %	0	–	–	–	–	–	–
		1	–	–0.70	–	–	–0.61	–

Примечание. Выборка данных за 1971–1975, 2003–2004, 2007, 2010, 2013, 2017, 2020 гг.; * 0 – фон без извести; 1 – фон с внесением извести.

Таблица 5. Результаты регрессионного анализа зависимости продуктивности яровой пшеницы от климатических условий полевого опыта

Вариант опыта	Фон	Урожайность		Содержание протеина	
		уравнение	R^2	уравнение	R^2
Без удобрений	0	$У = 3.864 + 0.006О_6 – 0.180T_6$	0.59	$П = 25.366 + 0.674T_4 – 0.799T_7$	0.57
	1	$У = 3.143 + 0.018О_6 – 0.153T_6$	0.73	–	
N90	0	$У = 4.470 + 0.012О_6 – 0.218T_6$	0.65	–	
	1	$У = 3.730 + 0.018О_6 – 0.169T_6$	0.74	–	
NP1K	0	$У = 4.976 + 0.011О_6 – 0.231T_6$	0.49	$П = 16.662 – 0.045О_8$	0.52
	1	$У = 4.403 + 0.015О_6 – 0.192T_6$	0.66	$П = 19.711 – 3.957ГТК$	0.33
NP4K	0	$У = 5.702 + 0.011О_6 – 0.266T_6$	0.60	–	
	1	$У = 5.170 + 0.014О_6 – 0.226T_6$	0.65	$П = 27.588 – 0.038О_8 – 0.577T_7$	0.55

Примечание. У – урожайность яровой пшеницы, т/га; П – содержание сырого протеина в зерне, %; $О_х$ – количество осадков в соответствующий месяц, мм; $T_х$ – температура воздуха в соответствующий месяц, °С; 0 – фон без извести; 1 – фон с внесением извести; "–" – нет значимых зависимостей ($N = 12$). Выборка за 1971–1975, 2003–2004, 2007, 2010, 2013, 2017, 2020 гг.

2007 г. до 15.7°С в 1974 г.; и только за три года из 12 она была выше нормы: от 16.6°С в 2010 г. и 17.9°С в 1973 г. до 18.4°С в 2013 г. Обратные связи урожайности с температурой в июне логичны, поскольку при высокой температуре фаза кущения заканчивается быстрее, а побегов образуется меньше (Lorenzo et al., 2015). Так, было рассчитано, что при повышении температуры воздуха на каждый 1°С продолжительность периода "кущение–колошение" сокращается на 0.41 дня (Поскребышева, Исмагилов, 2020). В таких случаях пшеница при недостаточной вегетативной массе быстрее выколашивается и теряет урожайность (Исмагилов, Хасанов, 2005).

Таблица 6. Урожайность и содержание сырого протеина в зерне яровой пшеницы

Фон	Варианты опыта			
	без удобрений	N90	NP1K	NP4K
	Урожайность, т/га			
Без извести	1.41 + 0.32	1.74 + 0.44	1.95 + 0.49	2.27 + 0.57
Известь	1.75 + 0.47	2.07 + 0.48	2.29 + 0.51	2.50 + 0.56
	Содержание сырого протеина, %			
Без извести	10.75–12.94	13.74–18.47	13.77–17.73	13.96–18.47
Известь	11.02–12.26	14.10–17.39	13.81–17.56	13.28–18.35

Примечание. Выборка за 1971–1975, 2003–2004, 2007, 2010, 2013, 2017, 2020 гг.

Выраженных трендов для отмеченных предикторов – температуры воздуха и количества осадков в июне, а также для урожайности яровой пшеницы не было выявлено. Таким образом, можно ожидать, что наблюдаемые климатические изменения не будут способствовать росту урожайности культуры, а будут лишь обуславливать ее вариабельность.

Влияние удобрений на урожайность. Удобрения признаны одним из основных средств повышения урожайности и качества продукции сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых почвах северо-восточной части Нечерноземья России, которые по своему генезису являются малоплодородными, содержат небольшое количество доступных для растений элементов питания. Доля дерново-подзолистых почв в Кировской области – 82.3% от площади всех пахотных почв, причем примерно ¾ из них – кислые (Молодкин, Бусыгин, 2016).

В связи с этим один из факторов, изучаемых в опыте, – влияние известкования на урожайность. Доказано, что известкование повышает коэффициенты использования N и P из удобрений, а урожай зерна после внесения азотных удобрений увеличивается в 1.5–2.0 раза по сравнению с вариантом без них (Roy et al., 2006). Действительно, на неизвесткованных делянках средняя продуктивность яровой пшеницы составила 1.84 т/га, тогда как при внесении извести она увеличилась до 2.15 т/га.

Применение азотных удобрений (вариант N90) позволяло повысить урожайность пшеницы на 23% на неизвесткованном фоне и на 18% при известковании (табл. 6). Отмечена тенденция к повышению продуктивности с увеличением доз фосфорных удобрений. Существенная разница наблюдалась между контролем (без удобрений) и вариантом NP4K ($F_{расч} = 7.16 > F_{табл} = 4.32, p = 0.01$). Однако средние урожайности на контроле и в вариантах NP1K, NP2K, NP3K существенно не отличались друг от друга, что говорит о том, что низкие дозы фосфорных удобрений не оказывают существенного влияния на урожайность яровой пшеницы.

Важно отметить, что коэффициенты детерминации регрессионных уравнений для вариантов с удобрениями (R^2 = 0.49–0.66) чаще всего ниже, чем для вариантов без них (R^2 = 0.59–0.73), т.е. внесение удобрений позволяет снизить дисперсию урожайности, обусловленную колебаниями погодных условий, на 7–10%.

Известно, что применение минеральных удобрений увеличивает содержание подвижных макроэлементов (Ларионова и др., 2009). При внесении комплекса питательных веществ (NPK) продуктивность яровой пшеницы на неизвесткованном фоне увеличилась на 38–61%, а на известкованном – на 31–43%. Данные других исследователей также свидетельствуют о том, что применение минеральных удобрений приводит к более стабильной урожайности: коэффициенты вариации составили 61% без удобрений и 27–29% с внесением NPK (Ковшова, 2012).

Как было отмечено ранее, урожайность не только яровой пшеницы, но и других сельскохозяйственных культур в анализируемом полевом опыте была в 1.6–3.0 раз выше, чем в среднем по Кировской области за сопоставимый отрезок времени (2000–2020 гг., см. табл. 1). Это связано с тем, что в производственных условиях по данным Росстата количество вносимых удобрений гораздо ниже – 38.4 кг/г д.в. по сравнению с $N_{90}P_{50-200}K_{90}$ в Опыте. Это доказывает, что при научно обоснованном применении удобрений и средств химизации (в данном случае, извести) на слабо окультуренных дерново-подзолистых почвах можно достичь относительно высокой продуктивности культур.

Влияние климата и удобрений на качество зерна. Для большинства возделываемых культур содержание белка в урожае – важнейший показатель его качества (Завалин, 2016). У сортов яровой пшеницы селекции ФАНЦ Северо-Востока, включенных в Госреестр Российской Федерации на 2020 г. и районированных в Волго-Вятском районе, содержание

белка составляет 10–14% (Крупнова, 2013). В некоторые годы белковость зерна в опыте Фаленской селекционной станции превышала эти значения (см. табл. 6).

Специалисты отмечают общую биологическую закономерность, согласно которой с увеличением урожайности содержание белка снижается (Ненайденко, 2018). Отрицательные корреляции между белковостью и продуктивностью связаны, прежде всего, с полигенной природой этого признака (Митрофанова, Хакимова, 2016). В наших исследованиях такая зависимость была отмечена только для вариантов NP1K с известкованием ($r = -0.82$, $p < 0.05$) и NP4K без извести ($r = -0.64$, $p < 0.05$).

В 4-х вариантах опыта (без удобрений с известкованием, N90 на обоих фонах, NP4K без извести) не было обнаружено значимых зависимостей накопления белка в зерне от погодно-климатических условий (см. табл. 4). В целом, содержание протеина у яровой пшеницы в Кировской области хуже предсказывается статистическими методами (см. табл. 5): построенных уравнений меньше (4 уравнения для протеина по сравнению с 8 уравнениями для урожайности), а объясняемая дисперсия гораздо ниже (33–57% для протеина и 49–74% для урожайности). Также отметим, что если урожайность во всех вариантах опыта зависела от температуры и осадков в июне, то среди предикторов накопления протеина не наблюдается такого единообразия.

Несмотря на то, что многие исследователи подтверждают преимущественное влияние условий увлажнения на качество зерна, наши данные не подтверждают теорию о большем накоплении азота и, соответственно, белка в зерне пшеницы в засушливые годы (Бакаева, Шулаева, 2005; Фатыхов и др., 2017). Также они опровергают вывод о повышении содержания белка в зерне пшеницы и то, что это в значительной мере определяется температурой воздуха в период формирования и созревания зерна (Brites, 2000). В Кировской области повышение количества осадков и температуры в этот период *сказывались отрицательно на накоплении протеина*.

Основными факторами, влияющими на биохимические и технологические свойства зерна, кроме погодных условий, являются особенности культуры и сорта и технологии возделывания, включая системы удобрения (Ненайденко, 2018). Фактически, действие всех факторов, влияющих на содержание белка в зерне, в конечном счете, сводится к изменению условий азотного питания (Целуйко и др., 2014). Так, на среднесуглинистых дерново-подзолистых почвах Вологодской области внесение азотных удобрений (N90) повышало содержание сырого белка с 7.6–10.0% (контроль) до 9.6–12.9% (Чухина, 2012). В исследованиях Пермского НИИСХ на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах максимальное содержание азота в зерне пшеницы (3.35%) отмечено в варианте $N_{60}P_{60}K_{60}$ (Завьялова, 2015; Косолапова, 2017). Но при этом важно понимать, что у пшеницы увеличение содержания белка в зерне в ответ на улучшение условий азотного питания проявляется не так ярко, как у других яровых культур – ячменя и овса (Пронько и др., 2017).

Анализ многолетних рядов полевого опыта Фаленской селекционной станции с влиянием климатических условий и внесения удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур показал, что на фоне современного потепления климата ведущая роль в поддержании и повышении урожайности и качества зерна остается за антропогенным фактором (внесением удобрений, известкованием) для создания оптимального режима питания растений. Выявленные закономерности помогут раскрыть потенциал растениеводства в северных регионах Европейской территории России на границе зоны возможного земледелия.

ВЫВОДЫ

В Кировской области на фоне достаточного, а в некоторые годы избыточного увлажнения за 1971–2020 гг. температура воздуха росла со скоростью 0.39°C/10 лет, менее интенсивно по сравнению с другими регионами страны. При анализе прерывистого ряда данных по урожайности яровой пшеницы и климатических условий вегетационного периода отмечены прямые связи продуктивности с количеством осадков в июне и обратные – с температурой воздуха в этот месяц. По данным регрессионного анализа климатические условия обуславливали 49–74% дисперсии урожайности. Известкование местных дерново-подзолистых почв и внесение удобрений позволяли повысить продуктивность культуры на 30–50% и снизить ее дисперсию, обусловленную колебаниями погодных условий, на 7–10%. Содержание протеина в зерне яровой пшеницы преимущественно зависело от антропогенного фактора в форме внесения удобрений, причем на него отрицательно влияло как повышение температуры, так и увеличение количества осадков в период созревания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-76-00023 (статистический анализ), а также в рамках государственных заданий Института географии РАН № АААА-А19-119021990093-8, FMGE-2019-0007 (оценка агроклиматических ресурсов) и Федерального аграрного научного центра Северо-Восто-

ка им. Н.В. Рудницкого № FNWE-2022-0005 (полевой опыт).

FUNDING

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-76-00023; statistical analysis), as well as within the framework of state-ordered research themes of the Institute of Geography RAS no. AAAA-A19-119021990093-8, FMGE-2019-0007 (evaluation of agroclimatic resources) and the Rudnitskii Federal Agrarian Scientific Center of Northeast no. FNWE-2022-0005 (field experiment).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О.А., Жильцова ЕЛ., Ренева С.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 31–41.

Бакаева Н.П., Шулаева Ю.Г. Содержание суммарного белка и крахмала в зерне различных сортов яровой пшеницы в условиях Среднего Поволжья // Сельскохозяйственная биология. 2005. № 40 (3). С. 39–44.

Ермакова Л.Н., Толмачева Н.И., Безматерных Е.А. Оценка агроклиматических ресурсов территории Пермского края // Географический вестн. 2010. № 2 (13). С. 44–52.

Завалин А.А., Соколов О.А. Потоки азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 595 с.

Завьялова Н.Е., Сторожева А.Н. Агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность полевых культур при внесении возрастающих доз полного минерального удобрения // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 4 (47). С. 35–41.

Исмагилов Р.Р., Хасанов Р.А. Качество и технология производства хлебопекарного зерна пшеницы. Уфа: Гилем, 2005. 200 с.

Калинин А.И. Агрохимические свойства дерново-подзолистых почв и продуктивность растений. Киров, 2004. 220 с.

Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (резюме доклада) // Тр. Гл. геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2011. Вып. 563. С. 7–59.

Ковшова В.Н. Приемы, повышающие устойчивость луговых агрофитоценозов в условиях изменения климата в Волго-Вятском экономическом районе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2012. № 5 (30). С. 31–34.

Косолапова А.И., Возжаев В.И., Лейних П.А. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от применения минеральных удобрений // Пермский аграрный вестн. 2017. № 3 (19). С. 76–80.

Крупнова О.В. О сопоставлении качества зерна яровой и озимой пшеницы в связи с делением на рыночные классы (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2013. № 1. С. 15–25.

Ларионова А.А., Ермолаев А.М., Никитишен В.И., Лопес де Гереню В.О., Евдокимов И.В. Баланс углерода в пахотных серых лесных почвах при разных способах сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1464–1474.

Лыскова И.В. Суховеева О.Э., Лыскова Т.В. Влияние локального изменения климата на продуктивность яровых зерновых культур в условиях Кировской области // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. № 22 (2). С. 244–253. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.244-253

Митрофанова О.П., Хакимова А.Г. Новые генетические ресурсы в селекции пшеницы на увеличение содержания белка в зерне // Вавиловский журн. генетики и селекции. 2016. № 20 (4). С. 545–554. https://doi.org/10.18699/VJ16.177

Молодкин В.Н., Бусыгин А.С. Плодородие пахотных почв Кировской области // Земледелие. 2016. № 8. С. 16–18.

Ненайденко Г.Н. Удобрение и повышение качества зерна пшеницы в Верхневолжье // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 1 (53). С. 122–138. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32847010

Павлова В.Н., Варчева С.Е. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожаев зерновых культур в зерносеющих регионах России // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 39–49.

Павлова В.Н. Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI веке // Тр. Гл. геофизической обсерватории. 2013. № 569. С. 20–37.

Поскребышева М.М., Исмагилов Р.Р. Темпы роста и развития яровой пшеницы в зависимости от гидротермических условий // Вестн. Казанского ГАУ. 2020. № 15 (57). С 38–42. https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-1-38-42

Пронько В.В., Чуб М.П., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю. Отзывчивость сельскохозяйственных культур на минеральные удобрения в различных гидротермических условиях Степного Поволжья // Аграрный научный журн. 2017. № 9. С. 27–32.

Пряхина С.И., Скляров Ю.А., Васильева М.Ю., Фридман А.Н., Белоцерковская А.В. Агрометеорологические условия формирования продуктивности яровой пшеницы по межфазным периодам онтогенеза // Изв. Саратовского ун-та. Сер. Науки о Земле. 2008. Т. 8. Вып. 1. С. 22–25.

Сапожникова С.А. Агроклиматические ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 9 с.

Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Новый подход к идентификации функционалов погода – урожай для оценки последствий изменения климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 2. С. 92–100.

Фатыхов И.Ш., Корепанова Е.В., Борисов Б.Б. Реакция яровой пшеницы Ирень на абиотические условия

химическим составом зерна // Вестн. Казанского ГАУ. 2017. № 2 (44). С. 42–47. https://doi.org/10.12737/article_59a7f75e3faa12.06301014

Целуйко О.А., Медведева В.И., Поволоцкая Ю.С. Зависимость химического состава зерна сельскохозяйственных культур от агротехники // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2014. № 4 (48). С. 37–40.

Чухина О.В., Жуков Ю.П., Быков Г.Н. Продуктивность яровой пшеницы при разных дозах и способах внесения азотных удобрений в Вологодской области // Плодородие. 2012. № 6. С. 5–8.

Шайхутдинов Ф.Ш., Сержанов И.М., Шайхразиев Ш.Ш. Теоретические основы формирования урожая зерна яровой мягкой пшеницы в республике Татарстан // Вестн. Казанского ГАУ. 2008. № 4 (10). С. 100–104.

Щенникова И.Н. Влияние погодных условий на рост и развитие растений ячменя в Кировской области // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014. № 4 (41). С. 9–12.

Якушев В.П., Жуковский Е.Е. Анализ рисков – как основа оценки последствий изменений климата в земледелии // Докл. Рос. академии сельскохоз. наук. 2009. № 5. С. 54–57.

Brites C.M., Macas B., Muacho C., Coco J. Quality of durum wheat breeding lines: Genetic and environmental effects / Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges. Zaragoza: CIHEAM, 2000. P. 479–484. https://docviewer.yandex.ru/view/1027345132/

Cabas J., Weersink A., Olale E. Crop yield response to economic, site and climatic variables // Climatic Change. 2010. № 101. P. 599–616. https://doi.org/10.1007/S10584-009-9754-4

Cai X., Wang D., Laurent R. Impact of climate change on crop yield: a case study of rainfed corn in Central Illinois // J. Applied Meteorol. and Climatol. 2009. № 48. P. 1868–1881. https://doi.org/10.1175/2009JAMC1880.1

Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // Weather and Climate Extremes. 2015. № 10. P. 4–10. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001

Lorenzo M., Assuero S.G., Tognetti J.A. Low temperature differentially affects tillering in spring and winter wheat in association with changes in plant carbon status // Annals of Applied Biology. 2015. № 166. P. 236–248. https://doi.org/10.1111/aab.12177

Roy R.N., Fink A., Blair G.J., Tandon H.L.S. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management // FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin. 2006. № 16. FAO, Rome, Italy.

Schlenker W., Roberts M.J. Estimating the impact of climate change on crop yields: the importance of non-linear temperature effects // PNAS. 2009. № 106 (37). P. 15594–15598. https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106

Effect of Climate Change and Fertilizers on Grain Yield and Quality in the Northern Part of European Russia

O. E. Sukhoveeva[1], *, I. V. Lyskova[2], and T. V. Lyskova[2]

[1]*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[2]*Rudnitskii Federal Agrarian Scientific Center of Northeast, Kirov, Russia*

**e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com*

The effect of air temperature increase and precipitation fluctuations on the yield and protein content of spring wheat grain was evaluated using the example of a long-term field experiment of Falenskaya breeding station (Kirov oblast) established in 1971. In Kirov oblast, lying on the northern border of the agricultural zone at the humidified area, air temperature increased at a rate of 0.39°C/10 years in 1971–2020, less intensively than in other regions of the country. Despite the intermittent series of yield data, we have assessed the influence of weather conditions of the growing season on it, positive correlations with precipitation in June and a negative one—with the air temperature in this month were noted. According to the regression analysis, climatic conditions were responsible for 49–74% of the yield variance. Liming of sod-podzolic soils and fertilization allowed not only increasing the crop productivity by 30–50% also decreasing of its dispersion caused by changing weather conditions by 7–10%. The protein content of the grain was also determined to a greater extent by fertilizer application and was negatively affected by both higher temperatures and increased rainfall during the ripening period. The case of the Falenskaya breeding station confirms the leading role of the anthropogenic factor in maintaining and increasing yields and preserving grain quality against the background of current climate warming at the northern border of the farming zone.

Keywords: agroclimatic resources, bioclimatic potential, crude protein, sod-podzolic medium loamy soil, correlation-regression analysis, phosphorus fertilizers, spring wheat

REFERENCES

Anisimov O.A., Zhil'tsova E.L., Reneva S.A. Estimation of critical levels of climate change influence on the natural terrestrial ecosystems on the territory of Russia. *Russ.*

Meteorol. Hydrol., 2011, vol. 36, no. 11, pp. 723–730. https://doi.org/10.3103/S1068373911110033

Bakaeva N.P., Shulaeva Yu.G. Amounts of total protein and starch in corn of different varieties of summer wheat in the conditions of middle Povolzh'e. *S–kh. Biol.*, 2005, vol. 40, no. 3, pp. 39–44. (In Russ.).

Brites C.M., Macas B., Muacho C., Coco J. Quality of durum wheat breeding lines: Genetic and environmental effects. In *Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region*: *New Challenges*. Zaragoza: CIHEAM, 2000, pp. 479–484.

Cabas J., Weersink A., Olale E. Crop yield response to economic, site and climatic variables. *Climatic Change*, 2010, vol. 101, pp. 599–616. https://doi.org/10.1007/S10584-009-9754-4

Cai X., Wang D., Laurent R. Impact of climate change on crop yield: a case study of rainfed corn in Central Illinois. *J. Appl. Meteorol. Climatol.,* 2009, vol. 48, pp. 1868–1881. https://doi.org/10.1175/2009JAMC1880.1

Chukhina O.V., Zhukov Yu.P., Bykov G.N. Productivity of spring wheat under different dozes and methods of nitrogen fertilizing in Vologda region. *Plodorodie*, 2012, no. 6, pp. 5–8. (In Russ.).

Ermakova L.N., Tolmacheva N.I., Bezmaternyh E.A. The evaluation of agroclimatic resources within the territory of Perm region. *Geogr. Vestn.*, no. 2 (13), pp. 44–52. (In Russ.).

Fatykhov I.S., Korepanova E.V., Borisov B.B. Reaction of spring wheat Iren on abiotic conditions with chemical composition of grain. *Vestn. Kazan. Gos. Agrarn. Univ.,* 2017, vol. 12, no. 2, pp. 42–47. (In Russ.).

Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather Clim. Extremes*, 2015, vol. 10, pp. 4–10. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001

Ismagilov R.R., Khasanov R.A. *Kachestvo i tekhnologiya proizvodstva khlebopekarnogo zerna pshenitsy* [Quality and Technology for the Production of Baking Grain of Wheat]. Ufa: Gilem Publ., 2005. 200 p.

Kalinin A.I. *Agrokhimicheskie svoistva dernovo-podzolistykh pochv i produktivnost' Rastenii* [Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soils and Plant Productivity]. Kirov: NIISKh Severo-Vostoka, 2004. 220 p.

Kattsov V.M., Porfir'ev B.N. Assessment of macroeconomic impacts of climate change over the territory of Russian Federation until 2030 and beyond (summary). *Tr. GGO,* 2011, vol. 563, pp. 7–59. (In Russ.).

Kosolapova A.I., Vozzhaev V.I., Leinikh P.A. Crop productivity and grain quality of spring wheat in dependence on application of mineral fertilizers. *Perm. Agrarn. Vestn.,* 2017, no. 3 (19), pp. 76–80. (In Russ.).

Kovshova V.N. Methods of increasing of stability of meadow agro-phytocenoses under condition of climate change in Volga-Vyatka economic region. *Agrarn. Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2012, no. 5 (30), pp. 31–34. (In Russ.).

Krupnova O.V. A comparison of grain quality in spring and winter wheats associated with market classes (review). *S-kh. Biol.*, 2013, no. 1, pp. 15–25. (In Russ.). https://doi.org/10.15389/agrobiology.2013.1.15rus

Larionova A.A., Ermolaev A.M., Nikitishen V.I., de Gerenyu V.O.L., Evdokimov I.V. Carbon budget in arable gray forest soils under different land use conditions. *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 12, pp. 1364–1373. https://doi.org/10.1134/S1064229309120060

Lorenzo M., Assuero S.G., Tognetti J.A. Low temperature differentially affects tillering in spring and winter wheat in association with changes in plant carbon status. *Ann. Appl. Biol.,* 2015, vol. 166, pp. 236–248. https://doi.org/10.1111/aab.12177

Lyskova I.V., Sukhoveeva O.E., Lyskova T.V. The influence of local climate change on the productivity of spring cereals in the Kirov region. *Agrarn. Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2021, no. 22 (2), pp. 244–253. (In Russ.). https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.244-253

Mitrofanova O.P., Khakimova A.G. New genetic resources in wheat breeding for an increased grain protein content. *Vavilovskii Zh. Genetiki i Selektsii*, 2016, no. 20 (4), pp. 545–554. (In Russ.).

Nenaidenko G. Fertilizer and improvement of quality of grain of wheat in Upper Volga region. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii. Regional'noe Prilozhenie*, 2018, no. 1 (53), pp. 122–138. (In Russ.).

Pavlova V.N. Agroclimatic resources and agricultural productivity of Russia with the application of new climate scenarios in the XXI century. *Tr. GGO,* 2013, vol. 569, pp. 20–37. (In Russ.).

Pavlova V.N., Varcheva S.E. Estimating the level of territory vulnerability and climate-related risk of significant grain crop failure in grain-producing regions of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.,* 2017, vol. 42, no. 8, pp. 510–517. https://doi.org/10.3103/S1068373917080040

Poskrebysheva M.M., Ismagilov R.R. Speeds of spring wheat growth and development depending on hydrothermal conditions. *Vestn. Kazan. Gos. Agrarn. Univ.,* 2020, no. 15 (57), pp. 38–42. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-1-38-42

Pronko V.V., Chub M.P., Yaroshenko T.M., Klimova N.F., Zhuravlev D.Yu. Response of agricultural crops to mineral fertilization in different hydrothermal conditions of steppe Povolzhye region. *Agrarn. Nauch. Zh.*, 2017, no. 9, pp. 27–32. (In Russ.).

Pryakhina S.I., Sklyarov Yu.A., Vasileva M.Yu., Fridman Yu.N., Belotserkovskaya A.V. Agrometeorological conditions for the formation of spring wheat productivity in the interphase periods of ontogenesis. *Izv. Saratov. Univ., Ser. Nauki o Zemle,* 2008, no. 8 (1), pp. 22–25. (In Russ.).

Roy R.N., Fink A., Blair G.J., Tandon H.L.S. *Plant Nutrition for Food Security. A Guide for Integrated Nutrient Management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, no. 16. Rome: FAO, 2006. 349 p.

Sapozhnikova S.A. *Agroklimaticheskie resursy Nechernozemnoi zony RSFSR* [Agroclimatic Resources of the Non-Chernozem Zone of RSFSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 9 p.

Schlenker W., Roberts M.J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2009, vol. 106 (37), pp. 15594–15598. https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106

Shaikhutdinov F.Sh., Serzhanov I.M., Shaikhraziev Sh.Sh. Theoretical foundations of grain yield formation of spring soft wheat in the Republic of Tatarstan. *Vestn. Kazan. Gos. Agrarn. Univ.*, 2008, no. 4 (10), pp. 100–104. (In Russ.).

Shchennikova I.N. Influence of weather conditions on growth and development of barley plants in Kirov region. *Agrarn. Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2014, vol. 41, no. 4, pp. 9–12. (In Russ.).

Sirotenko O.D., Pavlova V.N. A new approach to identifying the weather-crop yield functionals for assessing climate change consequences. *Russ. Meteorol. Hydrol.,* 2010, vol. 35, no. 2, pp. 142–148. https://doi.org/10.3103/S1068373910020093

Tseluiko O.A., Medvedeva V.I., Povolotskaya Yu.S. Dependence of chemical composition of farm crops grain on agrotechnics. *Izv. Orenburg. Gos. Agrarn. Univ.*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 37–40. (In Russ.).

Yakushev V.P. Risk analysis as the basis for evaluating the consequences of climate changes in agriculture. *Russ. Agric. Sci.*, 2009, vol. 35, no. 5, pp. 355–358.

Zav'yalova N.E., Storozheva A.N. Agrochemical properties of sod-podzolic soil and productivity of field crops at entering of increasing doses of complete mineral fertilizer. *Agrarn. Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2015, vol. 47, no. 4, pp. 35–41. (In Russ.).

Zavalin A.A., Sokolov O.A. *Potoki azota v agroekosisteme: ot idei D.N. Pryanishnikova do nashikh dnei* [Fluxes of Nitrogen in an Agroecosystem: From the Ideas of D.N. Pryanishnikov to the Present Days]. Moscow: VNIIA, 2016. 595 p.