

Физико-географические исследования

УДК 633.1:631.559:551.58(470.51)(045)

П.Б. Акмаров, О.П. Князева, И.И. Рысин

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ В СЛОЖНОПРЕДСКАЗУЕМЫХ УСЛОВИЯХ КЛИМАТА¹

Представлены особенности формирования урожайности зерновых культур в полевом растениеводстве, выделены климатические показатели, как основные факторы нестабильности аграрного производства. На материалах сельскохозяйственных организаций Глазовского района Удмуртии и многолетних наблюдений Глазовской метеостанции показана зависимость урожайности растениеводческой продукции не только от целенаправленной работы человека, но и, в существенной мере, от условий климата в период активного роста возделываемых культур. Особое внимание уделено температурному режиму и режиму влагообеспеченности растений в вегетационный период с мая по август. Установлено, что за счет внесения минеральных удобрений урожайность зерновых можно повысить в среднем на 66 кг на каждый килограмм внесенных удобрений. Предложены различные регрессионные модели для прогнозных расчетов будущих урожаев зерновых, которые могут также применяться для планирования при выработке управленческих решений. Получены выводы о том, что из климатических показателей, влияющих на урожайность зерновых, наиболее существенным является отношение количества осадков к средним температурам в июне месяце. Чуть слабее и с обратным знаком подтверждается влияние такого же отношения показателей климата в мае. Показан пример использования моделей для аграрного производства исследуемого района. Отдельно представлены варианты возможных моделей для грубой оценки климатических условий будущих урожаев, основанные на использовании нейронных сетей, что позволит обосновать план агротехнических мероприятий возделывания зерновых культур.

Ключевые слова: климат, урожайность зерновых культур, вегетационный период, регрессионные модели, нейронные сети, Удмуртия.

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-1-72-81

Экономическая эффективность аграрного производства определяется множеством взаимосвязанных факторов, среди которых естественные условия выращивания возделываемых культур играют решающую роль. Конечно, с развитием техники и технологий их роль снижается, как отмечают ученые в работе по данной проблематике [1]. Однако остаются неуправляемые человеком климатические условия, которые сложно предсказать даже на небольшую перспективу, и они являются основным источником нестабильности в растениеводстве. Поэтому анализ климатических условий возделывания культур является базовым элементом оценки потенциала земледелия по нескольким причинам [2]. В первую очередь, метеорологические факторы относятся к абиотическим условиям выращивания растений [3]. Следовательно, от режимов температуры, увлажнения, солнечной радиации зависят и урожайность сельскохозяйственных культур, и качество произведенной растениеводческой продукции. С другой стороны, погодные условия в значительной степени влияют на сроки и агротехнические приемы возделывания. По этой причине изменение климата, особенно метеорологических характеристик вегетационных периодов культурных растений, существенно влияет на эффективность сельскохозяйственного производства.

В то же время развитие науки и технологического обеспечения аграрного производства формируют долгосрочную тенденцию роста продуктивности сельскохозяйственных земель, в первую очередь за счет применения удобрений и микродобавок, новых высокоурожайных сортов растений, средств химической и биологической защиты, высокопроизводительной техники для возделывания культур [4; 5].

Необходимо отметить, что на эффективность земледелия значительное влияние оказывают и почвенное плодородие, и географическое местоположение полей, и контуры возделываемых участков,

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00194. URL: <https://rscf.ru/project/23-27-00194>.

и многие другие объективные факторы. Поэтому оценка потенциала аграрного производства должна учитывать также и территориальные (ландшафтные) особенности земледелия [6].

Целью данной работы является разработка математических моделей для прогнозирования урожайности зерновых культур, которые составляют сегодня основу всей растениеводческой отрасли России, в том числе и Удмуртии, где они занимают более половины обрабатываемой пашни. При этом основное внимание уделено климатическим условиям, как основным источникам нестабильного производства.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования служат урожайность зерновых культур на фоне внесения минеральных и органических удобрений в хозяйствах Глазовского района и метеорологические сведения, полученные на Глазовской метеостанции Удмуртской Республики за 1951–2021 гг., фрагмент которых отражен в табл. 1.

Таблица 1

Условия формирования урожайности зерновых культур в Глазовском районе

Годы	Урожайность зерновых культур, ц/га	Внесено минеральных удобрений, кг/га	Сумма осадков, мм				Среднемесячные температуры, град.			
			май	июнь	июль	август	май	июнь	июль	август
обозначение	У	М	R5	R6	R7	R8	T5	T6	T7	T8
1990	16,7	14,1	67	128	44	54	7,8	15,4	18,0	15,6
1995	10,9	8,7	65	87	87	110	12,4	17,4	17,7	15,7
2000	10,4	9,2	41	88	40	63	8,4	17,5	20,7	14,3
2004	7,6	9,5	24	138	61	125	12,3	15,4	20,2	15,4
2005	8,9	10,2	70	129	150	57	14,3	14,4	17,6	15,9
2006	9,0	10,3	47	23	59	43	11,2	19,0	15,7	15,3
2007	11,7	12,5	39	75	110	12	12,3	13,1	18,7	18,5
2008	14,2	11,2	39	63	41	53	10,2	15,0	19,1	16,4
2009	18,2	12,1	12	63	40	61	11,8	16,5	16,5	14,7
2010	16,3	13,2	15	82	22	83	14,4	17,0	21,0	17,7
2011	16,7	18,9	21	58	99	26	12,2	16,0	20,4	14,6
2012	13,1	14,2	66	63	64	127	12,2	17,5	19,2	16,2
2013	7,4	11,0	24	26	46	22	11,7	18,4	19,2	16,9
2014	14,4	12,6	19	82	32	91	14,4	14,8	15,1	16,9
2015	12,2	10,6	47	63	132	133	13,6	17,9	14,7	13,1
2016	10,7	11,1	19	61	40	30	12,8	15,7	20,1	20,6
2017	16,5	12,3	32	40	136	27	7,8	14,1	17,1	16,4
2018	16,4	8,1	46	63	90	56	10,3	14,1	20,0	15,5
2019	19,1	8,7	45	76	69	67	13,2	15,0	15,6	13,2
2020	16,6	11,0	33	44	146	25	12,3	14,1	20,0	14,9
2021	16,3	12,4	50	38	89	63	16,4	19,0	18,4	15,9
среднее	13,5	11,5	39	71	76	63	12,0	16,1	18,3	15,9
минимум	7,4	8,1	12	23	22	12	7,8	13,1	14,7	13,1
максимум	19,1	18,9	70	138	150	133	16,4	19,0	21,0	20,6

Климатические условия возделывания представлены показателями осадков и температуры в виде месячной суммы атмосферных осадков за вегетационный период (май-август) и среднемесячной температуры в этот же период. Кроме того, в расчетах учтена среднегодовая сумма осадков.

Глазовский район является одним из наиболее крупных сельских районов Удмуртии, который находится в северном умеренно теплом и умеренно влажном подрайоне республики. Район занимает территорию 216 тыс. га, более 103 тысяч из них составляют сельскохозяйственные угодья, в том числе пашня более 72 тыс. га. Преобладают дерново-среднеподзолистые и дерново-сильноподзолистые среднесуглинистые почвы с небольшими площадями дерново-карбонатных и серых лесных почв. Кислотность дерново-подзолистых почв очень высокая, что требует известкования почв. По результатам последней оценки качества почв, проведенной в 1990 году, средний бонитировочный балл земель Глазовского района составляет 22,4, что немного выше среднереспубликанского уровня (20,3). Среднегодовая температура воздуха по метеостанции Глазов за последние 30 лет наблюдений составляет +2,6 °С, среднегодовая сумма осадков – 559 мм, продолжительность безморозного периода – 118 дней, сумма среднесуточных температур выше 10 °С – около 1725 °С [7].

При проведении исследования использованы методы математической статистики, моделирования, корреляционно-регрессионного анализа, кластерного анализа [8; 9]. Теоретической основой исследования стали труды зарубежных и отечественных ученых в области климатологии и агрономии.

Результаты и их обсуждение

Урожайность зерновых культур формируется под влиянием множества факторов, которые условно можно разделить на управляемые человеком и неуправляемые факторы [10–14]. К управляемым можно отнести не только технологические и организационно-экономические условия хозяйствования, но и некоторые природные. Так, за счет грамотной, планомерной работы с землей можно добиться улучшения почвенного плодородия, добиться оптимальной структуры контуров обрабатываемых участков. Сегодня основным направлением улучшения качества почв является совершенствование их структуры за счет внесения удобрений и микроэлементов, а также оптимизации севооборотов [15; 16].

В данном исследовании в качестве управляемых факторов использованы удобрения, вносимые под урожай возделываемых культур, а климатические условия представлены показателями температуры и осадков за вегетационный период с мая по август. Выбор именно этого периода связан с тем, что основная доля зерновых культур в районе является яровыми, а на долю озимых приходится не более 15 % посевов, к тому же основной период роста озимых культур также приходится на летние месяцы. Значения показателей для выбранных факторов отражены в табл. 1.

Средние климатические условия роста растений в районе за разные периоды представлены в табл. 2. Анализ табличных данных показывает, что произошли изменения в среднесуточных температурах и продолжительности периодов с различными температурами, подтверждающие региональные тенденции потепления климата. Однако, необходимо отметить, что в последние годы наметилась тенденция к увеличению вариации климатических показателей, особенно температуры. Так, если вариация среднесуточных температур в вегетационный период в первом десятилетии 21 века составила между годами 1,5 °С, то во втором десятилетии она возросла до 2,2 °С.

Таблица 2

Климатические условия вегетационного периода в Глазовском районе

Показатель	1961–1990 гг.	1991–2021 гг.	1951–2021 гг.
Среднесуточная температура вегетационного периода, °С	14,6	15,2	15,0
Продолжительность периода с температурой воздуха выше 5 °С, дней	157–162	163–166	160–164
Продолжительность периода с температурой воздуха выше 10 °С, дней	112–122	120–129	115–124
Минимальная сумма осадков за май–август, мм	107	118	107
Максимальная сумма осадков за май–август, мм	414	406	414

В целом, рост урожайности зерновых в Глазовском районе за счет совокупного воздействия всех факторов описывается уравнением тренда вида:

$$Y_p = 10,48 + 0,27t, \quad (1)$$

где Y_p – расчетное значение урожайности, t – лаг, сдвиг от базового периода, лет.

Таким образом, урожайность зерновых в районе ежегодно повышается в среднем на 0,27 центнеров с гектара. Но коэффициент детерминации этого тренда составляет только 22 %, при уровне значимости по критерию Фишера 0,97. Это значит, основной причиной роста урожайности являются другие факторы. Многочисленные исследования доказывают, что за счет внесения удобрений можно существенно регулировать продуктивность полей. По материалам Глазовского района нами получена следующая регрессионная модель влияния удобрений на урожайность:

$$Y_p = 5,76 + 0,66M. \quad (2)$$

Из модели исключены органические удобрения, так как их влияние на урожайность статистически не подтверждается. Коэффициент детерминации модели составляет 24 %, значимость по критерию Фишера – 0,98. Это уже более значимый показатель, который подтверждает, что за счет внесения минеральных удобрений урожайность зерновых можно повысить в среднем на 66 кг на каждый килограмм внесенных удобрений.

Особый интерес представляет модель влияния климата на эффективность земледелия. Для решения этой задачи нами построена корреляционная матрица по показателям урожайности, температуры и осадков, которая приведена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица коэффициентов корреляции по климатическим условиям вегетационного периода*

	Y	R5	R6	R7	R8	T5	T6	T7	T8
Y	1,000								
R5	-0,128	1,000							
R6	-0,158	0,263	1,000						
R7	0,026	0,360	-0,072	1,000					
R8	-0,134	0,259	0,406	-0,141	1,000				
T5	-0,035	-0,102	-0,036	0,092	0,287	1,000			
T6	-0,278	0,088	-0,350	-0,333	0,329	0,218	1,000		
T7	-0,105	-0,197	0,103	-0,150	-0,228	-0,153	-0,091	1,000	
T8	-0,260	-0,267	-0,056	-0,265	-0,334	0,105	-0,196	0,355	1,000

Примечание: * – условные обозначения климатических показателей см. в табл. 1.

Полученный результат подтверждает вывод авторов статьи [17] о том, что между климатическими факторами существует корреляционная связь. Все коэффициенты парной корреляции между факторами температуры и осадков отрицательные, значит, чем выше температура в определенном периоде, тем меньше сумма осадков за этот период. Вышесказанное подтверждается и графиком изменения отношения количества осадков к температуре соответствующего периода (см. рис.). В мае эта величина, как правило, ниже, чем в июне. С другой стороны, и вариация указанного соотношения в последние годы значительно уменьшилась и колеблется от 2 до 5 мм осадков на один градус температуры.

С величиной урожайности отдельные климатические факторы связаны слабой связью, однако влияние температуры более существенно, чем влияние осадков.

При построении регрессионной модели следует учитывать не только воздействие отдельных факторов на результат, но и их взаимодействие. Без учета этой особенности модель принимает вид:

$$Y_p = 60,59 + 0,03 \cdot R5 - 0,06 \cdot R6 - 0,05 \cdot R7 - 0,002 \cdot R8 + 0,45 \cdot T5 - 1,72 \cdot T6 + 0,16 \cdot T7 - 1,31 \cdot T8. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации этой модели составляет 43 %, но достоверность по критерию Фишера – всего 58 %. Поэтому в модель ввели относительные показатели как отношение суммы осадков на один градус средней температуры. После исключения несущественных элементов получили модель следующего вида:

$$Y_p = 50,26 - 0,49 \cdot R_5 + 0,39 \cdot R_6 + 2,63 \cdot T_5 - 3,03 \cdot T_6 - 0,96 \cdot T_8 + 5,94 \cdot R_5/T_5 - 7,38 \cdot R_6/T_6. \quad (4)$$

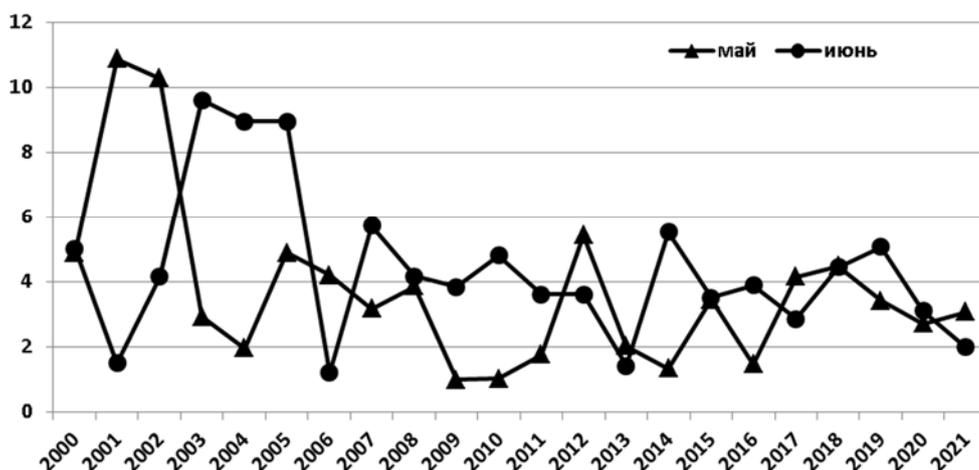


Рис. Соотношение осадков к температурам в месяцы активного роста растений на территории Глазовского района Удмуртии, мм/градус

Для полученной модели коэффициент детерминации составляет 74 %, и, таким образом, вновь подтверждается гипотеза о том, что основным источником нестабильности в полевом растениеводстве являются метеорологические условия. Значимость модели по критерию Фишера 0,99. Достаточно надежны и отдельные коэффициенты регрессии, определенные по критерию Стьюдента на 95 % уровне значимости (табл. 4). Вероятность нулевой гипотезы для них (Р-значение) не превышает 6 %.

Таблица 4

Параметры регрессионной модели влияния климата на урожайность

Показатель	Свободный член	R5	R6	T5	T6	T8	R5/T5	R6/T6
Коэффициенты регрессии	50,2658	-0,4868	0,3910	2,6299	-3,0325	-0,9641	5,9451	-7,3787
Р-Значение, %	0,2183	0,2989	5,6616	0,1320	0,1620	1,3348	0,2099	2,7253

Эта модель вполне приемлема для прогнозирования. Из нее можно сделать вывод о том, что из показателей климатических факторов, влияющих на урожайность зерновых, наиболее существенным является отношение количества осадков к средним температурам в июне месяце. Чуть слабее и с обратным знаком подтверждается влияние такого же отношения факторов климата в мае. Если росту урожайности в июне способствует уменьшение количества осадков к средней температуре, то в мае наоборот, чем больше приходится осадков на единицу температуры, тем лучше для растений.

Применение модели (4) совместно с уравнением технологического тренда урожайности (1) позволяет рассчитать прогнозное значение урожайности для конкретной территории. Так, для Глазовского района расчетный прогноз урожайности зерновых по нашей модели на 2022 год составляет 16,8 центнеров с гектара. Фактически, по предварительным данным средняя урожайность зерновых культур в 2022 году в районе составила 18,1 центнеров с гектара, то есть ошибка прогноза составила 7,7 %. И эта ошибка может быть еще ниже после уточнения расчетов. Таким образом, представленная модель может применяться для предварительных расчетов при допустимом уровне надежности 90 %.

Казалось бы, получена достаточно надежная модель для прогнозирования урожайности зерновых культур. Однако, главным ее недостатком является отсутствие прогнозных значений исходных факторов климата. Поэтому основная задача заключается в определении величины показателей температуры и осадков на прогнозируемый период. Учитывая, что полный цикл производства растение-

водческой продукции охватывает целый календарный год, необходимо спрогнозировать на приемлемом уровне метеорологические условия вегетационного периода хотя бы на один год вперед.

Сегодня наукой не разработано готовых решений для такой задачи, но развитие цифровых технологий и искусственного интеллекта позволяет подойти к решению этой проблемы [18–21]. В частности, проблему можно решить на основе построения динамической нейронной сети, опирающейся на технологию «big data». В качестве основы баз данных могут быть использованы материалы метеорологических станций, которые систематически формируются уже более 70 лет, начиная с 1951 года на всей территории страны.

Нейронная сеть может быть изначально построена по известным значениям метеорологических показателей в виде исходной модели предсказаний [22]. Далее эта сеть будет обучаться с получением новых данных и самосовершенствоваться, тем самым получая все более точные результаты прогнозов.

Для начального этапа прогнозирования значений климатических факторов и первого шага обучения нейронной сети можно предложить использование модели из системы одновременных эконометрических уравнений, где в качестве эндогенных переменных используются прогнозируемые метеорологические показатели, а экзогенными являются факторы климата прошлых периодов. Таким образом, математическая модель для расчета климатических факторов вегетационного периода будущего урожая будет иметь вид матрицы:

$$\begin{aligned}
 R5_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 R6_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 R7_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 R8_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 T5_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 T6_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 T7_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}) \\
 T8_t &= f(R1_{t-1}, R2_{t-1}, \dots, R12_{t-1}, T1_{t-1}, T2_{t-1}, \dots, T12_{t-1}),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где R_i – сумма осадков в i -ом месяце, T_i – среднемесячная температура i -го месяца.

Нижний индекс t обозначает текущий год, а $t-1$ – предыдущий год. Расчет параметров системы одновременных уравнений следует проводить на основе рекурсивных алгоритмов вычислений за весь период наблюдений. В нашем примере информационная база наблюдений начинается с 1951 года и продолжается по настоящее время.

Так, матричная система (5) на основе базы данных за 1951–2021 годы для Глазовского района Удмуртской Республики дала следующие прогнозы на 2022 год (табл. 5).

Таблица 5

Прогноз метеорологических условий на 2022 год в Глазовском районе Удмуртии

Показатель климата	месяц			
	май	июнь	июль	август
Средняя температура воздуха (°C)	11,9	15,9	18,1	15,2
Месячная сумма осадков, мм	38,0	77,7	76,1	66,8

Конечно, это пока очень грубый прогноз, в котором ошибки по отдельным показателям доходят до 30 %, но это уже лучше, чем вообще не иметь никаких прогнозов. К тому же, алгоритм можно усовершенствовать, переходя от линейных моделей уравнений временных рядов, представленных в модели (5), к нелинейным, в первую очередь к полиномиальным с высокими степенями полиномов. Но для этого требуются мощные вычислительные машины. Поэтому мы предлагаем ограничиться для грубых прогнозов системой одновременных уравнений, а для более точных расчетов прибегнуть к возможностям нейронных сетей.

Заключение

Возможности моделирования урожайности сельскохозяйственных культур позволяют значительно повысить эффективность производственной деятельности в сельском хозяйстве [23–26]. Так,

полученная на примере Глазовского района Удмуртской Республики регрессионная модель подтверждает, что только за счет внесения минеральных удобрений урожайность зерновых можно повысить в среднем на 66 кг на каждый килограмм внесенных удобрений.

Однако, основной проблемой в решении этой задачи является сложность учета климатических факторов, которые являются главной причиной нестабильности в полевом растениеводстве. Из совокупности этих факторов нами выделены основные, оказывающие наиболее значительное воздействие на продуктивность полей – это температурный и влажностный режим вегетационного периода зерновых культур с мая по август. При этом наиболее существенным является отношение количества осадков к средним температурам в июне. Чуть слабее и с обратным знаком подтверждается влияние такого же отношения факторов климата в мае.

Полученная математическая модель урожайности зерновых культур может использоваться не только для прогнозирования будущих урожаев, но и для сравнительной оценки эффективности производственной деятельности сельских товаропроизводителей, для оценки правильности принимаемых руководством районов и сельскохозяйственных организаций управленческих решений. К примеру, в Удмуртской Республике расположено восемь метеостанций, которые в целом охватывают все 25 сельских районов республики, а это значит, что имеется возможность оценить прогнозируемую урожайность и планировать в краткосрочной перспективе производственные мероприятия в отрасли растениеводства на всей территории региона.

Наиболее сложную проблему прогноза климатических условий мы предлагаем решить с использованием современных информационных технологий, включая разработку нейронных сетей и решение эконометрических моделей в виде системы одновременных уравнений временных рядов. Для Глазовского района Удмуртии впервые получены прогнозные значения климатических условий (среднемесячные температуры воздуха и месячные суммы осадков) на май–август 2022 года, при этом ошибки по отдельным показателям могут достигать 30 %. Однако, эти вопросы сегодня мало проработаны и требуют дальнейших детальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акмаров П.Б., Князева О.П., Рысин И.И. Изменение климата и его влияние на эффективность земледелия (на материалах Удмуртии) // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2022. Т. 32. Вып. 3. С. 312–322.
2. Вильфанд Р.М., Страшная А.И. Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата // Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодноклиматическим условиям. Сборник докладов международной научно-практической конференции (7–11 декабря 2010). М.: РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2011. С. 23–38.
3. Макаров В.И. Агроклиматические ресурсы Удмуртии и их связь с урожайностью зерновых культур (на примере Ижевской ГМС) // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2016. Т. 26, вып. 3. С. 112–121.
4. Пасов И.М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. Л.: Гидрометеопиздат, 1986. 152 с.
5. Akmarov P.B., Rysin I.I., Knyazeva O. P. About the Role of Digitalization of Agriculture in Reducing the Impact of Climate on the Technological Development of Crop Production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022. Virtual, Online, 2022. P. 042012. doi:10.1088/1755-1315/988/4/042012.
6. Смагин Б.И. Экономический анализ и статистическое моделирование аграрного производства. Мичуринск: Изд-во Мичурин. гос. аграр. ун-та, 2007. 153 с.
7. Атлас Удмуртской Республики / Под общей ред. И.И. Рысина. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Феория; Ижевск: Удмуртия, 2020. 288 с.
8. Пасов В.М., Яцало Б.И. Использование комплекса моделей в агрометеорологическом прогнозировании // Метеорология и гидрология. 1992. № 12. С. 87–94.
9. Козлов А.Ю., Мхитарян В.С., Шишов В.Ф. Статистический анализ данных в MS Excel: Учебное пособие. М.: Инфра-М, 2018. 80 с.
10. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу / Под ред. В.М. Катцова, Б.Н. Порфирьева. М.: Д'АРТ: Главная геофизическая обсерватория, 2011. 252 с.

11. Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв // Метеорология и гидрология. 1995. № 4. С. 107–114.
12. Liefert W. Comparative Advantage in Russian agriculture // American Journal of Agricultural Economics. 2002. Vol. 84. Pp. 762–767.
13. Павлова В.Н. Продуктивность зерновых культур в России при изменении агроклиматических ресурсов в 20–21 веках: дис. ... докт. геогр. наук. Москва, 2021. 271 с.
14. Обухов В.М. Урожайность и метеорологические факторы. М.: Госпланиздат, 1949. 317 с.
15. Фатыхов И.Ш. Программирование урожаев сельскохозяйственных культур в условиях Западного Предуралья. Ижевск: ИжСХИ, 1991. С. 6–9.
16. Батталов Ф.З. Сельскохозяйственная продуктивность климата для яровых зерновых культур. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 112 с.
17. Переведенцев Ю.П., Давлятшин И.Д., Лукманов А.А., Мустафина А.Б. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы по метеорологическим показателям на примере Тетюшского района Республики Татарстан // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30, вып. 4. С. 457–464.
18. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере: Учебное пособие / Науч. ред. В.Э. Фигурнов. М.: ИД ФОРУМ, 2017. 368 с.
19. Гелиг А.Х., Матвеев А.С. Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей. Учебное пособие. М.: Издательство СПбГУ, 2018. 224 с.
20. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 382 с.
21. Хайкин Саймон. Нейронные сети. Полный курс: моногр. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. 788 с.
22. Макшанов А.В. Журавлев А.Е. Технологии интеллектуального анализа данных: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 212 с.
23. Чазова И.Ю., Акмаров П.Б., Князева О.П. Развитие цифровизации аграрного производства и оценка использования ее потенциала в Удмуртии // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. 2022. Т. 32, №6. С. 1035–1041.
24. Ормели Е.И. Зависимость урожайности яровой пшеницы от гидротермических условий в Саратовском регионе // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31, вып. 4. С. 467–473.
25. Bras T.A, Seixas J, Carvalhais N, Jägermeyr J (18 march 2021) Environmental research letters // IOP Publishing Ltd. 16(6): 06512. Doi: 10.1088/1748-9326/abf004
26. Акмаров П.Б., Князева О.П., Рысин И.И. Агроклиматический потенциал эффективности земледелия (на примере зерновых культур Удмуртии) // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2014. Вып. 2. С. 89–96.

Поступила в редакцию 02.02.2023

Акмаров Петр Борисович, кандидат экономических наук, профессор
E-mail: akmarov@izhgsha.ru

Князева Ольга Петровна, кандидат экономических наук, доцент
E-mail: knyazevaop@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет»
426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11

Рысин Иван Иванович, доктор географических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
426034, Россия, г. Ижевск. ул. Университетская, 1 (корп. 1)
E-mail: rysin.iwan@yandex.ru

P.B. Akmarov, O.P. Knyazeva, I.I. Rysin

MODELING OF GRAIN YIELD UNDER HARD-TO-PREDICT CLIMATE

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-1-72-81

The features of the formation of grain yields in field crop production are presented, climatic indicators are highlighted as the main factors of instability of agricultural production. On the materials of agricultural organizations of the Glazov region and long-term observations of the Glazov meteorological station Udmurtia shows the dependence of crop productivity not only on the purposeful work of a person, but also, to a large extent, on climate conditions during the

period of active growth of cultivated crops. Particular attention is paid to the temperature regime and the regime of moisture supply of plants during the growing season from May to August. It has been established that due to the application of mineral fertilizers, grain yields can be increased by an average of 66 kg per kilogram of fertilizers applied. Various regression models are proposed for predictive calculations of future grain harvests, which can also be used for planning when making management decisions. Conclusions were obtained that the ratio of precipitation to average temperatures in the month of June is the most significant of the climatic indicators affecting grain yields. Slightly weaker and with the opposite sign, the influence of the same ratio of climate indicators in May is confirmed. An example of the use of models for agricultural production in the study area is shown. Variants of possible models for a rough assessment of the climatic conditions of future harvests based on the use of neural networks are presented separately, which will justify the plan of agrotechnical measures for the cultivation of grain crops.

Keywords: climate, crop yield, growing season, regression models, neural networks, Udmurtia.

REFERENCES

1. Akmarov P.B., Knyazeva O.P., Rysin I.I. [Climate change and its impact on the efficiency of agriculture (on the materials of Udmurtia)], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2022, vol. 32, iss. 3, pp. 312-322 (in Russ.).
2. Vil'fand R.M., Strashnaya A.I. *Klimat, prognozy pogody i agrometeorologicheskoe obespechenie sel'skogo khozyaystva v usloviyakh izmeneniya klimata* [Climate, weather forecasts and agrometeorological support of agriculture in conditions of climate change], in *Sborn. dokladov mezhd. nauch.-prakt. konf. "Adaptatsiya sel'skogo khozyaystva Rossii k menyayushchimsya pogodno-klimaticheskim usloviyam"* (7–11 december, 2010), Moscow: RGAU-MSKHA im. K. A. Timiryazeva, 2011, pp. 23-38 (in Russ.).
3. Makarov V.I. [Agroclimatic resources of the Udmurt Republic and their connection with cereal grains yield (evidence from Izhevsk hydrometeorostation)], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2016, vol. 26, iss. 3, pp. 112-121 (in Russ.).
4. Pasov I.M. *Izmenchivost' urozhayev i otsenka ozhidaemoy produktivnosti zernovykh kul'tur* [Variability of yields and assessment of expected productivity of grain crops], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1986, 152 p. (in Russ.).
5. Akmarov P.B., Rysin I.I., Knyazeva O. P. About the Role of Digitalization of Agriculture in Reducing the Impact of Climate on the Technological Development of Crop Production, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (10–12 January 2022). Virtual, Online, 2022. P. 042012. doi:10.1088/1755-1315/988/4/042012
6. Smagin B.I. *Ekonomicheskij analiz i statisticheskoye modelirovaniye agrarnogo proizvodstva* [Economic analysis and statistical modeling of agricultural production], Michurinsk: Michurin. Gos. Agrar. Univ., 2007, 153 p. (in Russ.).
7. *Atlas Udmurtskoy Respubliki* [Atlas of the Udmurt Republic], 2nd ed, Rysin I.I. (ed), Moscow: Feoriya; Izhevsk: Udmurtiya, 2020, 288 p. (in Russ.).
8. Pasov V.M., Yatsalo B.I. Ispol'zovanie kompleksa modeley v agrometeorologicheskoy prognozirovaniy [The use of a set of models in agrometeorological forecasting], in *Meteorologiya i gidrologiya*, 1992, no. 12, pp. 87-94 (in Russ.).
9. Kozlov A.Yu., Mkhitarian V.S., Shishov V.F. *Statisticheskij analiz dannykh v MS Excel: Uchebnoe posobie* [Statistical data analysis in MS Excel: Textbook], Moscow: Infra-M Publ., 2018, 80 p. (in Russ.).
10. *Otsenka makroekonomicheskikh posledstviy izmeneniy klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda i dal'neyshuyu perspektivu* [Assessment of macroeconomic impacts of climate change over the territory of Russian federation until 2030 and beyond], Kattsov V.M., Porfir'yev B.N. (ed), Moscow: D'ART; Glavnaya geofizicheskaya observatoriya, 2011, 252 p. (in Russ.).
11. Sirotenko O.D., Abashina E.V., Pavlova V.N. *Chuvstvitel'nost' sel'skogo khozyaystva Rossii k izmeneniyam klimata, khimicheskogo sostava atmosfery i plodorodiya pochv* [Sensitivity of agriculture in Russia to climate changes, chemical composition of the atmosphere and soil fertility], in *Meteorologiya i gidrologiya*, 1995, no. 4, pp. 107-114 (in Russ.).
12. Liefert W. Comparative Advantage in Russian agriculture // *American Journal of Agricultural Economics*. 2002. Vol. 84. pp. 762–767.
13. Pavlova V.N. [Productivity of grain crops in Russia with changes in agro-climatic resources in the 20th-21st centuries], Dokt. Geogr. sci. diss., Moscow, 2021, 271 p. (in Russ.).
14. Obukhov V.M. *Urozhaynost' i meteorologicheskoye faktor* [Productivity and meteorological factors], Moscow: Gosplanizdat Publ., 1949, 317 p. (in Russ.).
15. Fatykhov I.Sh. *Programmirovaniye urozhayev sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v usloviyakh Zapadnogo Predural'ya* [Programming of crop yields in the conditions of the Western Urals], Izhevsk: Izhevsk. sel'skokhoz. institut, 1991, p. 6-9 (in Russ.).
16. Battalov F.Z. *Sel'skokhozyaystvennaya produktivnost' klimata dlya yarovykh zernovykh kul'tur* [Agricultural climate productivity for spring grain crops], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980, 112 p. (in Russ.).

17. Perevedentsev Yu.P., Davlyatshin I.D., Lukmanov A.A., Mustafina A.B. [Forecasting of spring wheat yield by meteorological indicators on the example of the Tetyushsky district of the Republic of Tatarstan], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2020, vol. 30, iss. 4, pp. 457-464 (in Russ.).
18. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Analiz dannykh na komp'yutere: Uchebnoe posobie* [Data analysis on a computer: Textbook], Figurnov V.E. (ed), Moscow: ID FORUM Publ., 2017, 368 p. (in Russ.).
19. Gelig A.Kh., Matveev A.S. *Vvedenie v matematicheskuyu teoriyu obuchaemykh raspoznavayushchikh sistem i neyronnykh setey* [Introduction to the mathematical theory of learnable recognition systems and neural networks. Textbook], Moscow: SPbGU, 2018, 224 p. (in Russ.).
20. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice], Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2019, 382 p. (in Russ.).
21. Khaykin Saymon. *Neyronnye seti. Polnyy kurs* [Neural networks. Full course], Moscow: "ID Vil'yams" Publ., 2017, 788 p. (in Russ.).
22. Makshanov A.V. Zhuravlev A.E. *Tekhnologii intellektual'nogo analiza dannykh: Uchebnoe posobie* [technologies of data mining: A textbook], St. Petersburg: Lan' Publ., 2018, 212 p. (in Russ.).
23. Chazova I.YU., Akmarov P.B., Knyazeva O.P. [Development of digitalization of agricultural production and assessment of the use of its potential in Udmurtia], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Ekonomika i pravo*, 2022, vol. 32, no. 6, pp. 1035-1041 (in Russ.).
24. Ormeli Ye.I. [Dependence of spring wheat yield on hydrothermic conditions in the Saratov Region], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zeml*, 2021, vol. 31, iss. 4, pp. 467-473 (in Russ.).
25. Bras T.A, Seixas J, Carvalhais N, Jägermeyr J (18 march 2021) Environmental research letters // IOP Publishing Ltd. 16(6): 06512. Doi: 10.1088/1748-9326/abf004
26. Akmarov P.B., Knyazeva O.P., Rysin I.I. [Agroclimatic potential of efficiency of agriculture (illustrated by the example of grain crops of Udmurtiya)], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2014, iss. 2, pp. 89-96 (in Russ.).

Received 02.02.2023

Akmarov P.B., Candidate of Economics, Professor

E-mail: akmarov@izhgsha.ru

Knyazeva O.P., Candidate of Economics, Associate Professor

E-mail: knyazevaop@yandex.ru

Udmurt State Agrarian University

Studencheskaya st., 11, Izhevsk, Russia, 426069

Rysin I.I., Doctor of Geography, Professor

Udmurt State University

Universitetskaya st., 1/1, Izhevsk, Russia, 426034

E-mail: rysin.iwan@yandex.ru