

Земледелие и мелиорация

УДК 631.5:631.6:911.2

DOI 10.31857/S2500262724040015 EDN FLQQPS

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ТРАВΟΣМЕСЕЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

© 2024 г. Д. А. Иванов, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН,
Н. А. Хархардинов, К. С. Курпас

Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В. В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Исследования проводили с целью нахождения закономерностей влияния условий ландшафтной среды на урожайность клеверотимофеечных травостоев 1 года пользования в различных агроклиматических обстановках. Работу выполняли на основе данных длительного мониторинга (1998–2023 гг.), полученных в пределах моренного холма, находящегося на агрополигоне «Губино» ВНИИМЗ в Тверской области. Почвообразующие породы – двучленные отложения, состоящие из верхнего, сложенного относительно легкими породами слоя, подстилаемого моренным завалуненным суглинком. Травостой эксплуатировали без удобрений в одноукосном режиме на поле, разбитом на 120 делянок. Методом регрессионного анализа определяли влияние факторов ландшафтно-почвенной среды (рельеф, физические и агрохимические свойства почвы) на урожайность трав, а также на зависимость степени этого воздействия от климатических условий. Сильнее всего на сбор продукции многолетних трав влияют разнообразные фракции гранулометрического состава почв – от камней до пыли (до 16 % его вариабельности) и высота местоположения (до 38 %), так как от них во многом зависят термические и водно-воздушные характеристики почв и растительного покрова. Такие характеристики рельефа, как крутизна и кривизна поверхности, оказывают незначительное воздействие на урожай трав (до 12 %). Степень воздействия факторов агроландшафтной среды на произрастание трав во многом регулируется изменениями метеосудовий. «Климатические сценарии» конкретного фактора – наборы параметров погоды, при которых проявляется его действие на продукционный процесс культуры, в годы посева и укоса, как правило, кардинально не различаются. Знание характера влияния климатических факторов позволяет точнее прогнозировать урожайность культуры в пределах агроландшафта и, таким образом, оптимизировать расположение посевов на территории конкретного хозяйства.

ON THE ISSUE OF FORECASTING CROP YIELDS FOR THE PURPOSES OF ADAPTIVE LANDSCAPE AGRICULTURE

D. A. Ivanov, N. A. Kharhardinov, K. S. Kurpas

Federal Research Centre Dokuchaev Soil Science Institute,
119017, Moscow, Pyzhevskii per., 7, str. 2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Long-term monitoring (1998–2023) of the yield of clover-timothy grass stands of the first year of use was carried out in order to find patterns of influence of landscape environmental conditions on it in various agroclimatic conditions. The research was conducted within the moraine hill located at the Gubino VNIIMZ agro-testing site in the Tver region. Soil-forming rocks are two-membered deposits consisting of an upper layer composed of relatively light rocks, underlain by moraine bouldery loam. The grass stands were exploited without fertilizers in a single-cut mode on a field divided into 120 plots. Using regression analysis, the influence of landscape and soil environment factors was determined: relief, physical and agrochemical properties of soils on grass yield, as well as the dependence of the degree of this impact on climatic conditions. It was found that the yield of perennial grasses is most strongly influenced by various fractions of the granulometric composition of soils – from stones to dust (up to 16 % of its variability) and the altitude of the location (up to 38 %), since the thermal and water-air characteristics of soils and vegetation largely depend on them. Terrain characteristics such as steepness and curvature of the surface have a minor impact on grass yield (up to 12 %). The degree of influence of agro-landscape environmental factors on the growth of grasses is largely regulated by fluctuations in weather conditions. “Climate scenarios” of a specific factor – sets of weather parameters under which its effect on the production process of a crop is manifested – in the years of sowing and mowing, as a rule, do not differ fundamentally. Knowing the nature of the influence of climatic factors allows us to more accurately predict crop yields within an agricultural landscape and, thus, optimize the location of crops on the territory of a particular farm.

Ключевые слова: мониторинг, травостой, трансекта, статистический анализ, климат, ландшафт.

Keywords: monitoring, grass stand, transect, statistical analysis, climate, landscape.

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур – одна из наиболее сложных и старых проблем научной агрономии. Это необходимо, прежде всего, для планирования мероприятий по уборке и обработке урожая, а также организации производства на перспективу, оценки экономических и экологических рисков. Традиционное прогнозирование урожайности предназначено для оценки будущего урожая на конкретном поле на основе изучения состояния посевов в определенные сроки и влияния на них почвенно-ландшафтных и климатических условий [1, 2, 3].

Для количественного учета каждого, влияющего на урожай, фактора необходимо периодическое выполнение прямых или косвенных измерений параметров абиотической и биотической сред поля, что, в ряде случаев, представляет собой трудоемкий процесс, поэтому математические модели прогнозирования, работающие на прямом измерении широкого набора показателей состояния посевов и ландшафтных условий, пока не получили большого распространения в реальном производстве [4, 5, 6].

Появление доступных космоснимков с изображением сельхозугодий в разных спектральных диапазонах

не только открыло широкие возможности для дифференциации растительного покрова по уровню биомассы или морфологическим отличиям, но и дало основу для создания принципиально новых моделей прогнозирования урожайности. Результаты многочисленных экспериментов свидетельствуют, что динамика спектральных индексов в процессе вегетации сельскохозяйственных культур имеет выраженную корреляцию с урожайностью [7, 8, 9].

Развитие теории адаптивно-ландшафтного земледелия также требует применения прогнозных процедур при проектировании мероприятий по адаптации агротехнических приемов к условиям агроландшафта. Однако, в отличие от традиционных подходов, прогнозирование в этом случае должно иметь ярко выраженный экстраполяционный смысл – давать возможность строить пространственные модели изменения урожайности культуры в пределах реального поля на основе анализа данных, полученных на опытном полигоне, расположенном за его пределами. Прогнозирование поведения культур на территории проектируемого хозяйства позволяет определить оптимальные местоположения посевов и угодий, а также характер использования того или иного агротехнического приема [10, 11].

Для прогнозирования урожайности культур и корректного переноса установленных закономерностей на другие территории, необходимо знать особенности их адаптивных реакций на смену ландшафтной (в пространстве) и климатической (во времени) обстановок, главным инструментом выявления которых служит долговременный мониторинг особенностей их произрастания в пределах опытных участков. Основа проектирования системы земледелия – учет погодных условий [12, 13]. Это показано еще в трудах классиков агроклиматологии и ландшафтоведения [14, 15]. Анализ влияния климата и, прежде всего, характера пространственного перераспределения гидротермических ресурсов на процессы создания биомассы служит основой для разработки стратегий адаптации производства сельскохозяйственных культур к условиям различных регионов [16].

Изучение влияния погодных условий позволяет выявить многие закономерности процесса формирования биомассы сельскохозяйственных растений. Воздействие климата на урожайность культур проявляется в сложной системе временных, пространственных и агротехнических факторов, во многом определяющих характер динамических процессов в агрогеокомплексе [17].

Следует отметить, что изменение погодных условий сказывается не только напрямую на физиологических процессах в растениях, но и на характере их зависимости от факторов рельефа, агрохимических, агрофизических, биологических свойств почв и др. Влияние климата на микробиологические сообщества почвы довольно хорошо изучена. В частности, для почв Северного Кавказа выявлена тесная связь активности почвенной дегидрогеназы с показателями увлажнения, а инвертазы, с температурными особенностями климата [18]. Отмечено влияние глобального потепления на микробные пулы почв сельскохозяйственных угодий в разных климатических зонах [19]. Есть сведения и об изменении при трансформации погодных условий набора эдафических факторов, влияющих на урожайность [20, 21]. Изучение зависимостей степени влияния на растение конкретного параметра почв и рельефа от вариабельности погодных условий позволяет развивать научную агрономию как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах. Такие знания позволяют более полно представить картину культурного ландшафтогенеза и, как следствие, про-

водить «тонкую настройку» продукционного процесса культуры в различных ландшафтных условиях.

Цель исследований – выявление особенностей зависимости продуктивности клеверотимофеечных травосмесей от почвенно-ландшафтных условий в различных климатических обстановках на основе изучения результатов многолетнего мониторинга для прогнозирования урожайности трав в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия.

Методика. Исследования проводили на агроэкологическом полигоне «Губино» ВНИИМЗ, который заложен в 1996 г. и располагается в 4 км к востоку от г. Тверь. Он занимает площадь 50 га в пределах моренного холма с относительной высотой 15 м, с четко выраженными геоморфологическими элементами – плоской вершиной, северным пологим склоном, крутизной 2...3°, южным, более крутым (3...5°), склоном и межхолмными депрессиями (северной и южной).

Почвообразующие породы на полигоне – двучленные отложения, состоящие из верхнего, сложенного относительно легкими породами слоя, подстилаемого моренным завалуненным суглинком. В южной части полигона мощность песчаного наноса иногда превышает 1,5 м (мощный двучлен). На вершине и северном склоне холма верхние горизонты почв сложены супесью, мощность которой составляет около 1 м (среднемощный и маломощный двучлены), а в межхолмной депрессии на севере полигона морена местами выходит на поверхность. Почвенный покров полигона представляет собой вариацию-мозаику дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв. Полигон осушен гончарным дренажем со средним междренним расстоением – 30 м.

В ходе исследований, в период с 1998 по 2023 г., проводили мониторинг урожайности сена клеверотимофеечной травосмеси 1 года пользования на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – производственном массиве, состоящем из 10 продольных полей-полос, пересекающим все микроландшафтные позиции полигона. Поля имели ширину 7,2 м, длину – 1300 м. Травы высевали под покров овса и выращивали без внесения удобрений, кроме подкормки его в фазе кушения аммиачной селитрой в дозе 1 ц/га (N_{30}). Травостой эксплуатировали в одноукосном режиме. Каждое поле разбито на 120 одинаковых равноудаленных делянок, площадью 20 м², на которых определяли урожайность сена в четырехкратной повторности.

Исследования заключались в определении методом регрессионного анализа влияния на продуктивность трав ряда факторов, величины показателей которых измеряли в точках опробования: высота местоположения над уровнем моря (м), показатель радиационного баланса (ватт/м²), кривизна поверхности, крутизна поверхности (град.), pH пахотного горизонта, гидролитическая кислотность, содержание легкоподвижного фосфора и калия (мг/100 г), гумуса (%), частиц >10 мм, 10...7 мм, 7...5 мм, 5...3 мм – камни, 3...2 мм, 2...1 мм – гравий, 1...0,5 мм – крупный песок, 0,5...0,25 мм – средний песок, 0,25...0,05 мм – мелкий песок, 0,05...0,01 мм – крупная пыль, 0,01...0,005 мм – средняя пыль, сумма пылевых фракций, сумма песчаных фракций, сумма фракций <0,25 мм. Статистический анализ по каждому году исследований проводили с использованием пакета Statgraphics+. Степень влияния факторов на урожайность рассчитывали методом Н. А. Плехинского путем деления частной факториальной суммы квадратов на общую [22]. Так как влияние факторов ландшафтной среды различалось по годам, то методом регрессионного анализа, определяли зависимость наиболее значимых

эдафических факторов от многолетнего варьирования следующих метеорологических параметров: минимальная температура (град.), среднегодовая температура (град.), максимальная температура (град.), максимум суточных осадков (мм), сумма осадков при температуре $>0^{\circ}\text{C}$ (мм), $>5^{\circ}\text{C}$ (мм), $>8^{\circ}\text{C}$ (мм), $>10^{\circ}\text{C}$ (мм), $>15^{\circ}\text{C}$ (мм), сумма температур $>0^{\circ}\text{C}$, $>5^{\circ}\text{C}$, $>8^{\circ}\text{C}$, $>10^{\circ}\text{C}$, $>15^{\circ}\text{C}$, градусо-дни с температурой $>5^{\circ}\text{C}$, $>8^{\circ}\text{C}$, $>15^{\circ}\text{C}$, сумма температур $10\ldots 30^{\circ}\text{C}$, число дней с пересечением отметки 0°C , 5°C , 10°C , 15°C , число дней с температурой $>30^{\circ}\text{C}$, ГТК по Селянинову, индекс аридности Де Мартона. Климатические данные взяты из архивов метеостанции Тверь.

Результаты и обсуждение. Анализируя 26 регрессионных моделей, можно отметить, что степень и характер влияния эдафических факторов на урожайность культуры меняется год от года. Все факторы по частоте воздействия на урожайность сена можно разделить на несколько групп. Достоверно влияют на величину этого показателя более чем в 50 % случаев содержание в почве камней ($10\ldots 7$ мм), гравия ($1\ldots 0,5$ мм), среднего песка ($0,5\ldots 0,25$ мм), суммы фракций $<0,25$ мм, крупной пыли. Факторы, влияющие на продуктивность трав с вероятностью 40...50 % – содержание в почве камней (>10 мм), гравия ($3\ldots 2$ мм), средней пыли, гидролитическая кислотность почвы, содержание в ней фосфора. С вероятностью 30...40 % на урожайность воздействуют высота местоположения, содержание в почве калия, крупного песка, суммы пылевых фракций, камней ($5\ldots 3$ мм), гравия ($3\ldots 2$ мм), тонкого песка, суммы песчаных фракций, пространственная вариабельность солнечной радиации и кислотность почв. Содержание в почве гумуса и камней диаметром от 7 до 5 мм воздействуют на урожай в 25 % случаев. Крутизна и кривизна поверхности проявляют себя реже всего (<20 %).

По средним значениям степени воздействия на урожайность трав факторы также можно разбить на несколько групп. Наиболее сильно влияет на величину этого показателя – определяет в среднем >6 % его пространственной вариабельности – высота местоположения. Содержание в почве камней диаметром от 10 до 7 мм и суммы фракций $<0,25$ мм в среднем определяет от 3 до 4 % пространственной изменчивости выхода сена с 1 га. От 2 до 3 % вариабельности урожайности трав зависит от содержания в почве калия и фосфора, среднего песка, крупного песка, сумм пылевых и песчаных фракций, а также от ее гидролитической и обменной кислотностей. От 1 до 2 % сбора сена определяют содержание в почве камней крупнее 10 мм и от 5 до 3 мм, крупного и среднего песка, крупной и средней пыли, а также пестроты степени прогрева территории. Менее 1 % урожайности определяют содержание в почве камней от 7 до 5 мм, гравия ($3\ldots 2$ мм), тонкого песка, гумуса, крутизны и кривизны поверхности.

В целом, степень воздействия изучаемых факторов на урожайность трав за многолетний период наблюдений была непостоянной, что во многом объясняется изменением агроклиматических условий. Сопоставление временной изменчивости степени воздействия фактора на урожайность с климатическими параметрами лет наблюдения позволит описать его «климатический сценарий» – совокупность погодных условий, при которых фактор ландшафтной среды оказывает достоверное влияние на сбор продукции культуры. Определение основных черт «климатических сценариев» факторов осуществляется также с помощью регрессионного анализа.

Многолетние травы зависят от метеоусловий как года посева, так и года укоса. Поэтому для описания

Характеристики «климатических сценариев» факторов почвенно-ландшафтной среды агрополигона «Губино», наиболее сильно влияющих на урожайность трав

Фактор	Климатический параметр	Оптимальные значения
Год посева		
Высота местоположения	индекс аридности Мартонна	1280...1480
	сумма осадков при $t > 8^{\circ}\text{C}$	300...400 мм
	градусо-дни $>5^{\circ}\text{C}$	1800 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$
	градусо-дни $>15^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$
	сумма $t > 15^{\circ}\text{C}$	1500...2000
	суточные максимумы осадков	>400 мм
Камни 10...7 мм	индекс аридности Мартонна	1000 $<>$ 1500
	сумма $t > 10^{\circ}\text{C}$	2200
	сумма $t > 8^{\circ}\text{C}$	2500
	количество дней с пересечением	>80
	10-и градусной отметки	
	сумма осадков при $t > 5^{\circ}\text{C}$	360 $<>$ 460
	количество дней с пересечением	>75
	5-и градусной отметки	
Сумма фракций $<0,25$ мм	количество дней с пересечением	>80
	0-градусной отметки	
	градусо-дни $>5^{\circ}\text{C}$	1850 $<>$ 1870 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$
	сумма $t > 5^{\circ}\text{C}$	2700 $<>$ 2900
	сумма t от 10 до 30°C	<11060
	количество дней с пересечением	70
	0-градусной отметки	
	сумма $t > 15^{\circ}\text{C}$	1440
Год укоса		
Высота местоположения	сумма осадков при $t > 10^{\circ}\text{C}$	350...400 мм
	индекс аридности Мартонна	1000...2000
	среднесуточная температура	5...6 $^{\circ}\text{C}$
	сумма осадков при $t > 0^{\circ}\text{C}$	500...700 мм
	количество дней с пересечением	90...110
Камни 10...7 мм	10-и градусной отметки	
	ГТК	1,5 ... 2
	индекс аридности Мартонна	1000 $<>$ 1500
	сумма $t > 10^{\circ}\text{C}$	2300...2500
	максимальная t	$<33^{\circ}\text{C}$
	градусо-дни $>15^{\circ}\text{C}$	227...427 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$
Сумма фракций $<0,25$ мм	сумма $t > 8^{\circ}\text{C}$	2427...2627
	количество дней с пересечением	<120
	15-и градусной отметки	
	сумма осадков при $t > 0^{\circ}\text{C}$	280...480 мм
	градусо-дни $>8^{\circ}\text{C}$	$<1380^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$

«климатических сценариев» необходимо рассчитывать две мультирегрессионные модели, которые позволят выявить климатические особенности проявления конкретного фактора в оба года их развития. Для выявления оптимальных значений климатических параметров, при которых фактор ландшафтно-почвенной среды достоверно воздействует на растения, применяли метод парных регрессий (см. табл.).

Влияние высоты местоположения на продуктивность трав объясняется тем, что она тесно связана с геохимическими и микроклиматическими особенностями территории. Самые высокие гипсометрические отметки ландшафта занимают, как правило, элювиальные и элювиально-аккумулятивные геокомплексы, на средних отметках располагаются транзитные (склоновые) позиции, а в низинах – транзитно-аккумулятивные местоположения. Разность геохимических обстановок существенным образом сказывается на урожайности трав и других культур. Следует также отметить, что на вершинах холмов формируются наиболее благоприятные для растений термические и фотосинтетические условия, тогда как в низинах нередко наблюдается об-

разование «озер холода», а также недостаток освещенности. Степень влияния высоты на урожайность трав зависит от характера варьирования как термических ресурсов, так и осадков в годы посева и укоса. При взрослении трав особенности «климатического сценария» высоты сильно не меняются, отмечается только снижение влияния индекса аридности Мартонна, увеличение роли суммы осадков, как в теплые, так и в прохладные периоды и достоверное воздействие изменений ГТК.

Крупные камни выполняют в агроландшафте роль регуляторов термического и водно-воздушного режимов. Они способствуют увеличению суточной амплитуды температуры почв, а также усиливают отвод излишней влаги. Влияние камней на урожайность трав в пределах опытного участка в основном определяет временная вариабельность поступления тепла в агроландшафт. Осадки в этом случае играют подчиненную роль, что свидетельствует о дефиците термических ресурсов в агроландшафтах центра Нечерноземья. По мере взросления трав влияние термических ресурсов только увеличивается.

Сумма фракций тоньше среднего песка во многом определяет тепловые, мелиоративные и агрохимические свойства почв. В пределах агрополигона «Губино» их влияние на урожайность трав определяла изменчивость термического режима, однако в годы укоса воздействие тонких фракций мелкозема зависело и от осадков в холодные периоды.

Выводы. К факторам, чаще всего (до 55 % случаев) влияющим на урожайность трав, и, как следствие, в наименьшей степени зависящим от метеоусловий года, относятся разнообразные фракции гранулометрического состава почв (от камней до пыли), что свидетельствует о высокой чувствительности растений к физическим и химическим особенностям почв. Наиболее редко на величину изучаемого показателя влияют такие параметры рельефа, как кривизна и крутизна поверхности (только в 20 % случаев наблюдается достоверная зависимость от этих факторов), что указывает на высокую пластичность травостоев к условиям увлажнения.

Самое значительное воздействие на урожайность многолетних трав оказывают такие факторы агроландшафтной среды, как высота местоположения (до 38 % вариабельности) и гранулометрический состав почв (до 16 %), от которых во многом зависят термические и водно-воздушные характеристики почв и растительного покрова. Такие характеристики рельефа, как крутизна и кривизна поверхности оказывают незначительное влияние на величину изучаемого показателя (до 12 %).

Степень воздействия факторов агроландшафтной среды на произрастание трав во многом регулируется варьированием метеоусловий. Так, степень влияния высоты местоположения на их урожайность во многом зависит от изменений термических ресурсов агроландшафта, выраженных через различные показатели, а также от степени увлажнения территории. Влияние камней и мелких фракций почвы на растения в основном регулирует изменчивость степени прогрева поверхности. «Климатические сценарии» конкретного фактора – наборы погодных параметров, при которых проявляется его воздействие на продукционный процесс культуры, в годы посева и укоса, как правило, кардинально не различаются.

Знание характеров «климатических сценариев» факторов позволяет точнее прогнозировать урожайность культуры в пределах агроландшафта и, таким образом, оптимизировать расположение посевов на территории конкретного хозяйства.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федерального исследовательского центра «Почвенный институт имени В. В. Докучаева». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮЖДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. *Methodological evolution of potato yield prediction: a comprehensive review* / Y. Lin, S. Li, S. Duan, et al. // *Frontiers in plant science*. 2023. Vol. 14. 1214006. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1214006> (дата обращения: 19.06.2024).
2. *Crop Yield Prediction through Proximal Sensing and Machine Learning Algorithms* / F. Abbas, H. Afzaal, A. A. Farooque, et al. // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 7. 1046. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/7/1046> (дата обращения: 19.06.2024). doi: 10.3390/agronomy10071046.
3. Abou Ali H., Delparte D., Griffel L. M. From pixel to yield: forecasting potato productivity in lebanon and Idaho. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. Vol. 42–3. No. 11. P. 1–7. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-3-W11/1/2020/> (дата обращения: 19.06.2024). doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W11-1-2020.
4. Бисчиков Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2022. Т. 17. № 2. С. 146–157. doi: 10.22363/2312-797X.2022-17-2-146-157.
5. *Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе математических моделей баланса гумуса, кислотности почвы, НПК/Д. А. Благоев, С. В. Митрофанов, В. С. Никитин и др. // Междугосударственный научный сельскохозяйственный журнал*. 2019. № 3. С. 62–66.
6. Лебедева В. М., Найдина Т. А. Учет осенне-зимнего увлажнения почвы в динамико-статистической модели прогноза урожайности озимых культур // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2022. № 4(386). С. 79–95. doi: 10.37162/2618-9631-2022-4-79-95.
7. Степанов А. С. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере сои) // *Вычислительные технологии*. 2019. Т. 24. № 26. С. 125–132.
8. Степанов А. С., Асеева Т. А., Дубровник К. Н. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) // *Аграрный вестник Урала*. 2020. № 1 (192). С. 10–19. doi: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19.
9. Буховец А. А., Кучеренко М. В., Семин Е. А. Прогнозирование урожайности зерновых культур с помощью динамической модели нормализованного относительного индекса растительности,

- учитывающей физиологические особенности развития сельскохозяйственных растений // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021. № 3 (70). С. 93–104. doi: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_93.
10. Principles and applications of topography in precision agriculture / A. H. Rabia, J. Neupane, Z. Lin, et al. // *Advances in Agronomy*. 2022. Vol. 171. P. 143–189. doi: 10.1016/bs.agron.2021.08.005.
11. Иванов Д. А., Карасева О. В., Рублюк М. В. Изучение динамики продуктивности трав на основе данных многолетнего мониторинга // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021. № 22(1). С. 76–84. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.1.76-84.
12. Средостабилизирующая роль многолетних трав в условиях современных вызовов экологического и климатического характера / А. И. Белолюбцев, А. Н. Куприянов, И. А. Кузнецов и др. // *АгроЭкоИнфо*. 2023. № 1 (55). doi: 10.51419/202131127.
13. Ksenofontov M. Y., Polzikov D. A. On the issue of the impact of climate change on the development of russian agriculture in the long term // *Studies on Russian Economic Development*. 2020. Vol. 31. No. 3. P. 304–311. doi: 10.1134/S1075700720030089.
14. Шашко Д. И., Розов Н. Н. Внутриобластное природно-сельскохозяйственное районирование как форма учета биоклиматического потенциала // *Земледелие*. 1989. № 3. С. 18–22.
15. Беручашивили Н. Л. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.
16. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates / C. Zhaoa, B. Liub, S. Piaoa, et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114. No. 35. P. 9326–9331. doi: 10.1073/pnas.1701762114.
17. The application of the soil-agroclimatic index for assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia / D. S. Bulgakov, D. I. Rukhovich, E. A. Shishkonakova, et al. // *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51(4). P. 448–459. doi: 10.1134/S1064229318040038.
18. Козунь Ю. С., Казеева К. Ш., Колесников С. И. Влияние климата на ферментативную активность лесных почв северного Кавказа // *Лесоведение*. 2022. № 3. С. 262–269. doi: 10.31857/S002411482203010X.
19. Effects of Plastic Film Mulching on Soil Enzyme Activities and Stoichiometry in Dryland Agroecosystems / M. Liu, X. Zhao, M. E. Hossain, et al. // *Plants*. 2022. Vol. 11(13). P. 1748. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/13/1748> (дата обращения: 19.06.2024). doi: 10.3390/plants11131748.
20. Иванов Д. А., Рублюк М. В. Влияние погодных и ландшафтных условий на урожайность яровой пшеницы // *Зерновое хозяйство России*. 2023. Т. 15. № 5. С. 70–77. doi: 10.31367/2079-8725-2023-88-5-70-77.
21. Иванов Д. А., Рублюк М. В., Хархардинов Н. А. К вопросу об адаптивно-ландшафтном обустройстве заброшенных земель на основе результатов прогнозирования урожайности ячменя // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 5. С. 27–33. doi: 10.31857/S2500262723050058.
22. Плохинский Н. А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с.

Поступила в редакцию 04.07.2024
После доработки 21.07.2024
Принята к публикации 06.08.2024