

Научная статья

Original article

УДК 631.559 : 528.8

doi: 10.55186/2413046X_2025_10_12_295

edn: EDKHNB

**ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ В ЗЕРНОВЫХ ЕДИНИЦАХ С
ПОМОЩЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ МЕЛИОРАЦИИ
FORECAST OF YIELD IN GRAIN UNITS USING A GEOGRAPHIC
INFORMATION SYSTEM TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF LAND
RECLAMATION PROJECTS**



Зверьков Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483)

E-mail: rad_sc@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>

Мазурова Ирина Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483)

Zverkov Mikhail Sergeevich, candidate of technical sciences, leading researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Raduzhny village, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>, rad_sc@bk.ru

Mazurova Irina Sergeevna, junior researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Raduzhny village, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483)

Аннотация. В данной статье рассматривается методика вычисления продуктивности сельскохозяйственных культур в эквивалентных значениях. Это необходимо для сравнения урожайности сельскохозяйственных культур различных групп между собой. Также подобная оценка используется при анализе рентабельности инвестиционных проектов и эффективности экономической деятельности. Инструменты геоинформационной системы используются для визуализации расчетов. Приводятся результаты исследования авторов за период 2024 и 2025 гг. Анализируются геореференцированные растры NDVI. Отмечается, что на практике для оптимизации вычислений и обработки атрибутивной информации выполняют прямой анализ растров и извлечение статистики. Точность прогноза также определяется точностью оценки вероятного уровня урожайности исходной модели. Актуальность исследования обоснована тем, что для оценки эффективности мелиоративных мероприятий в настоящее время используется эквивалентная оценка урожайности в зерновых единицах как показатель эффективности выполнения запланированных мероприятий получателями субсидии. Результаты могут быть также использованы Департаментом мелиорации Минсельхоза России для дальнейшего совершенствования отраслевой информационной системы.

Abstract. This the method of calculating crop productivity in equivalent values is considered in the article. This is necessary to compare the yield of crops of different groups with each other. Also, such an assessment is used in the analysis of the profitability of investment projects and the effectiveness of economic activity. Geographic information system tools are used to visualize calculations. The results of the authors' study for the period 2024 and 2025 are presented. NDVI georeferenced raster-grids are analyzed. It is noted that in practice, to optimize calculations and processing attribute information, direct analysis of rasters and extraction of statistics are performed. The accuracy of the forecast is also determined by the accuracy of estimating the likely yield level of the original

model. The relevance of the study is justified by the fact that to assess the effectiveness of land reclamation activities, an equivalent assessment of yield is currently used as an indicator of the effectiveness of the planned activities by the recipients of the subsidy. The results of this study can also be used by to further improve the industry information system.

Ключевые слова: урожайность, геоинформационная система, моделирование, мелиорация

Keywords: yield, geo-information system, modeling, reclamation

Введение. Важнейшим индикатором эффективности аграрного производства в отрасли растениеводства является достижение плановых показателей по урожайности сельскохозяйственных культур. Достижение потенциально возможной в данных природно-хозяйственных условиях урожайности сельскохозяйственных культур зависит от многих показателей. Во многом продуктивность растений определяется уровнем плодородия почвы, в том числе содержанием гумуса, обеспеченности питательными элементами (азотом, фосфором, калием). Не случайно ряд моделей для программирования урожайности подразумевает оценку этих показателей. Так, например, широко распространенными являются методы прогноза урожайности на заданную дозу внесения удобрений. Это действительно очень важный показатель, так как от уровня почвенного плодородия зависят корректировки технологических карт возделывания культуры.

Некоторые методики прогнозирования действительно возможной урожайности, подразумевает учет влагообеспеченности. Это важный показатель для оценки эффективности мелиоративных мероприятий. В этих моделях предусмотрены предикторы, учитывающие условия водопотребления сельскохозяйственной культуры, а также, например, обеспеченность теплом (по биоклиматическим индексам в методике Д.И.

Шишко) в зависимости от суммы активных температур (более 10 °С) за вегетационный период.

Поскольку факторы, влияющие на урожай, являются величинами стохастической природы, то в прогнозе для расчета рентабельности выбирают минимальное из полученных значений по различным лимитирующим факторам. Таким образом экономисты учитывают возможные риски не достижения запланированного уровня.

В практике прогнозов специалисты редко сталкиваются с проблемой учета товарной урожайности, которая, как известно, меньше валового сбора. Поэтому для обоснования инвестиций в растениеводстве обычно считают, что прогноз составлен именно для валового сбора. Стоит отметить, что опыт прогноза урожайности по приходу фотосинтетически активной радиации (ФАР) по методу А.А. Ничипоровича, в котором учитывается соотношение основной и побочной продукции (доля которой в том числе определяет товарную урожайность), не в полной мере учитывает эту проблему.

Рыночные механизмы требуют от инвестора и агрария учет различных рисков, которые влияют на достижение плановых показателей урожайности. Все чаще для обоснования потенциально возможной величины продуктивности культур специалисты используют методы дистанционного зондирования Земли и инструментарий геоинформационных систем для таких прогнозов [1]. Оценка эффективности возделывания сельскохозяйственных культур остается в фокусе внимания различных авторов [2, 3, 4]. Дистанционное зондирование Земли наряду с применением геоинформационных систем для анализа данных широко используется как современный инструмент исследования при наблюдении за вегетирующими культурами, оценке риска эрозии почв, картографировании различных природных процессов и явлений [5, 6].

В последние годы широкое распространения получают методы прогноза урожайности с применением технологий дистанционного зондирования и

беспилотных летательных аппаратов. Во многом это обусловлено доступностью для ученых и фермеров современных инструментов оценки состояния сельскохозяйственных культур и так называемых технологий неразрушающего контроля. Оценка показателей вегетирующих на больших площадях культур осложняется невозможностью проведения контроля на всей территории сразу. Поэтому пристальное внимание уделяют совершенствованию методов оценки состояния растений с помощью различных вегетационных индексов. Среди них наибольшее распространение получил, например, нормализованный разностный индекс NDVI, который представляет собой характеристику соотношения величин красного и ближнего инфракрасного спектра. Этот диапазон длин волн успешно используют для картирования растительности [7]. Этот индекс является одним из универсальных методов качественной оценки состояния растительного покрова [8].

Не случайно, что за последние годы появилось много убедительных результатов исследований, показывающих статистически значимую корреляционную зависимость между урожайностью сельскохозяйственных культур и индексами NDVI. По мере развития сельскохозяйственных культур и наступления фенологических фаз значения индексов NDVI изменяются. Поэтому важным с научной точки зрения является вопрос о том, какое значение NDVI наиболее оптимально подходит для прогноза урожайности. Так, например, в исследовании [9] отмечается, что наиболее тесно связаны с урожайностью значения NDVI, зафиксированные на средних и поздних этапах развития кукурузы (*Zea mays* L.). Аналогичные выводы исследователи делают для зерновых, например, пшеницы (*Triticum aestivum* L.), для которой характерна наибольшая корреляционная связь между NDVI и урожайностью в период цветения или налива зерна. Эти результаты встречаются в ряде работ, например, в [10, 11]. Стоит отметить, что данный метод прогноза все еще носит эмпирический характер, поскольку фундаментальные признаки связи

урожайности и NDVI не имеют строгих научных обоснований. Ряд ученых в настоящее время предполагает, что развитие методов машинного обучения и искусственного интеллекта ввиду многофакторности такого прогноза станет основой для построения строгих научных теорий в этой области [12, 13]. Однако использование для прогноза урожайности именно максимальные значения NDVI за вегетационный период, как характеристика достижения культуры пика в своем развитии в данном сезоне, является достаточно распространенным в практике подобных анализов. Однако у данного способа есть и недостатки, в том числе влияние влажности воздуха, необходимость атмосферной коррекции и др. В тоже время технологическое совершенствование спутниковой съемочной аппаратуры учитывает эти особенности.

В некоторых случаях установленные уровни прогнозных величин возможной урожайности необходимо приводить к эквивалентным значениям. Оценка урожайности в зерновых единицах является ключевым инструментом для принятия обоснованных управленческих решений, планирования финансово-хозяйственной деятельности и обеспечения устойчивости сельскохозяйственного производства.

С одной стороны, зерновые единицы позволяют сравнить урожайность сельскохозяйственных культур различных групп между собой. С другой стороны, этот подход позволяет масштабировать оценку с одного хозяйства на уровень муниципального образования или даже федерального округа.

Кроме того, такая унификация позволяет оценить последствия неблагоприятных условий (период засухи, обеспеченность атмосферных осадков и фотосинтетически активно солнечно радиации, вредители, засоренность посевов и др.) и уровня агротехники (проведения мелиоративных мероприятий, соблюдение агротехники в соответствии с технологической картой выращивания культуры, использование экстенсивных технологий и др.), которые повлияли на формирование урожая.

Сравнивая текущий урожай с историческим минимумом/максимумом, можно сформировать комплекс мер по митигации рисков.

Так, например, учет урожайности в зерновых единицах необходим для получения субсидии на оказание поддержки товаропроизводителям в области растениеводства. Для вычисления объема субсидии принят метод унификации объема производства. Для этого планируемая урожайность продукции вычисляется в эквиваленте зерновых единиц. Оценка именно в килограммах/тоннах зерновых единиц упрощает проверку соответствия нормам соответствующих программ субсидирования.

В настоящее время Минсельхозом России реализуется программа возмещения части затрат на реализованные мелиоративные мероприятия. Для этого хозяйства, которые соответствуют определенным нормативными правовыми актами требованиям подают заявку на участие в программе субсидирования. При этом одним из показателей, характеризующих достижение принятых обязательств по выращиванию растениеводческой продукции, является оценка плановой и фактической урожайности сельскохозяйственных культур. Поскольку различные культуры характеризуются качественно различным типом продукции (например, сухое зерно или сочные плоды), то для возможности сравнения целевых ориентиров между собой, урожайность на мелиорируемых землях оценивается в унифицированных значениях урожайности, в пересчете на зерновые единицы¹.

Актуальность настоящей работы обоснована тем, что для оценки эффективности мелиоративных мероприятий, реализуемых в рамках Приказа Минсельхоза России от 27.09.2024 г. N 562., в настоящее время используется эквивалентная оценка урожайности в зерновых единицах как показатель

¹ Приказ Минсельхоза России от 27.09.2024 N 562 «Об утверждении Порядка отбора проектов мелиорации» (Зарегистрировано в Минюсте России 26.12.2024 N 80783) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1310684527> (Дата обращения 17.12.2025 г.).

эффективности выполнения запланированных мероприятий получателями субсидии.

Практическая значимость результатов заключается в том, что рассмотренная методика может быть использована при совершенствовании методов мониторинга эффективности реализации субсидируемых проектов Департаментом мелиорации Минсельхоза России. Также способ учета урожайности в зерновых единицах, описанный в данной работе, может быть интегрирован в геоинформационные системы, в том числе при развитии отраслевого сегмента ЕФИС ЗСН. В общем случае по величине урожайности судят об эффективности мелиоративных мероприятий, возможно оптимизации и управления водными ресурсами и рисками. Кроме того, по величине урожайности также выполняют экономическую оценку земель сельскохозяйственного назначения [14]. Оценке снижения продуктивности земель в настоящее время уделяется особое внимание в целях обоснования стратегий по достижению показателей устойчивого развития [15].

Материалы и методы исследования. На первом этапе для каждой сельскохозяйственной культуры, которая встречается в севооборотах определяется набор параметров, которые характеризуют модель продуктивности. Использовались данные метеорологических станций (для оценки релевантности и репрезентативности растров NDVI), зональные характеристики распределения величины солнечной радиации. Последняя оценивалась для каждого земельного участка индивидуально, так как эффективность использования этого показателя растениями зависит от географической широты местности, на которой расположен земельный участок. Параметры с помощью фильтров слоя в геоинформационной системе добавлялись в атрибутивные таблицы. Затем с помощью калькуляторов атрибутивных таблиц производились вычисления возможной для данных условий урожайности. Последняя нормировалась по величине стандартной влажности и вычислялись значения $U_{\text{ст.вл.,i}}$.

На величину NDVI могут оказывать влияние сроки съемки, выпадение осадков накануне съемки спутником, наличие облаков (не только сами облака на снимках, но и тени, которые они отбрасывают на поверхность Земли), состояние растительности, засоренность посадок. Поэтому аномальные значения NDVI требуют корректировок. Например, при выявлении слишком высоких или низких значений вегетационных индексов для одной и той же культуры и за одну и ту же дату, необходимо оценить возможность выявления причин. При невозможности установления причины, значения таких индексов не могут быть скорректированы, поэтому из генеральной совокупности данных должны быть удалены.

В общем случае прогнозное значение урожайности Y_{NDVI} является случайной величиной, так как определяющие ее параметры имеют стохастические свойства:

$$Y_{NDVI} = f(NDVI_{\max,i}; Y_{\text{ст.вл.}}),$$

где $NDVI_{\max,i}$ и $Y_{\text{ст.вл.}}$ – соответственно максимальное значение функции распределения вегетационного индекса и величина вероятной урожайности стандартной влажности.

Принят следующий порядок учета урожайности в зерновых единицах. Прогнозные значения потенциальной урожайности с учетом ординат нормализованного относительного вегетационного индекса NDVI для i -го сезона обозначены соответственно как $Y_{NDVI,i}$ и выражены в ц/га. Эти значения пересчитываются на эквивалент урожая в зерновых единицах Y_k с помощью специального коэффициента k_i (см. таблицу) по следующей зависимости:

$$Y_k = k Y_{NDVI,i}.$$

Для визуализации результатов исследования использовалась геоинформационная система QGIS, система координат WGS 84. Для вычисления вегетационных индексов NDVI использовались свободно распространяемые геореференцированные растровые изображения в красном

и ближнем инфракрасном диапазонах спутника Sentinel-2, которые в настоящее время являются наиболее предпочтительными материалами для анализа. Последнее обусловлено их разрешающей способностью по сравнению с другими спутниковыми данными.

В геоинформационной системе предварительно разработан слой векторных данных, включающий границы земельных участков. Форматом векторных данных является набор файлов с расширениями *.shp, *.shx, *.dbf. Для земельных участков стандартными методами вычислялась площадь по эллипсоиду. Полученные растры NDVI подвергались статистическому анализу (вычисляли среднее арифметическое, медиану, максимальные и минимальные значения, среднеквадратичное отклонение и стандартную ошибку при уровне значимости $p < 0,05$). Гистограммы результатов анализа атрибутивных данных оформлялись с помощью программы Microsoft Office Excel. Сведения о составе севооборотов собраны лично авторами.

Таблица – Коэффициенты k_i

Группа культур	Культура	k_i
Зернобобовые	Горох	0,99
	Соя	1,17
	Горох + люпин	0,88
	Горох + люцерна	0,84
Зерновые	Пшеница	1,00
	Пшеница озимая	1,00
	Пшеница яровая	1,00
	Рожь озимая	1,00
Зернофуражные	Ячмень яровой	1,00
	Овес	0,80
	Овес яровой	0,80
	Овес + вика	0,93
	Овес + горох	0,80
Зернокормовые	Кукуруза	1,14
Крупяные	Гречиха	0,75
Масличные	Лен	1,65
	Подсолнечник	1,47
	Рапс озимый	1,36
	Рапс яровой	1,36
Медоносные	Фацелия (на семена)	0,34
Кормовые	Сенокос сеяный (сено)	0,40
	Многолетние травы (сено)	0,50
	Люцерна (сено)	0,14
Картофель	Картофель	0,25
Овощные	Зеленные культуры	0,14
	Капуста белокочанная	0,11
	Лук репчатый	0,14

Морковь столовая	0,20
Овощи	0,16
Свекла столовая	0,20

Результаты исследований и их обсуждение. Исследования проводились в 2024 и 2025 гг. всего в 2024 г. были собраны сведения о возделываемой сельскохозяйственной культуре на 741 земельном участке, в 2025 г. – 844. Участки расположены на территории коломенского городского округа Московской области. На рисунке 1 приведены гистограммы распределения математического ожидания вегетационного индекса NDVI на пиковую фазу вегетации различных культур в севооборотах 2024 и 2025 гг. на рисунке 2 показаны гистограммы медианных результатов прогноза урожайности по данным вегетационных индексов NDVI в 2024 и 2025 гг. На рисунке 3 приведены результаты моделирования урожайности, визуализированные в геоинформационной системе.

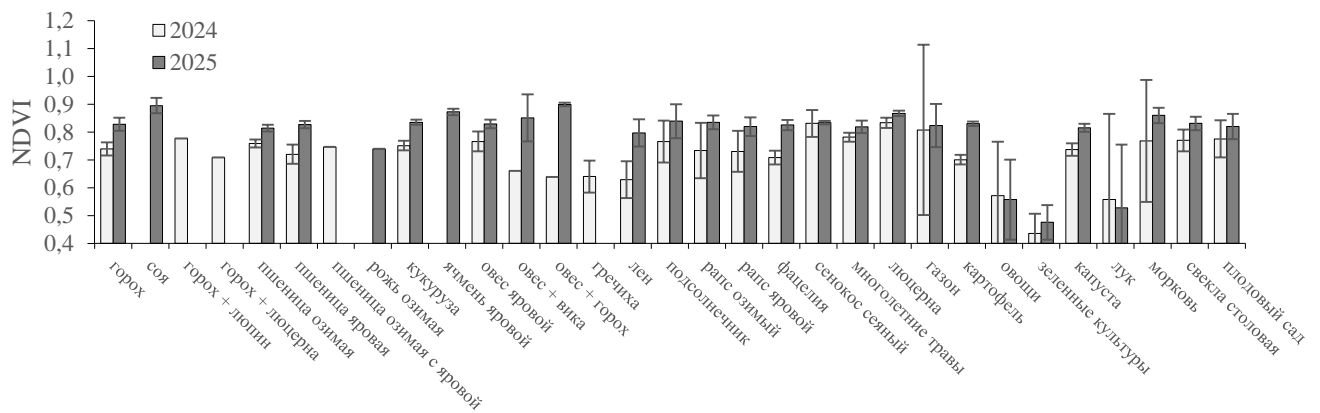


Рисунок 1 – Гистограммы распределения математического ожидания вегетационного индекса NDVI на пиковую фазу вегетации различных культур в севооборотах 2024 и 2025 гг.

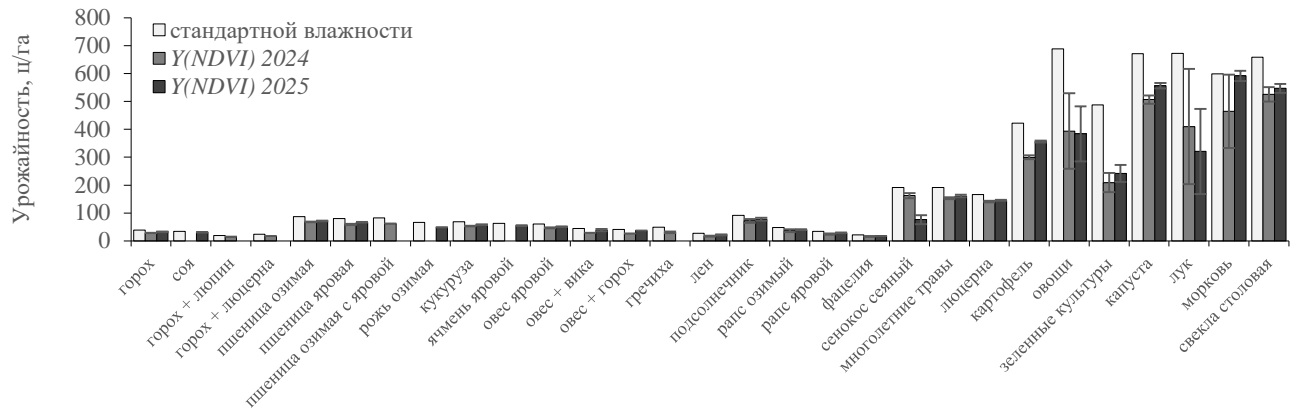


Рисунок 2 – Гистограммы медианных результатов прогноза урожайности по данным вегетационных индексов NDVI в 2024 и 2025 гг.

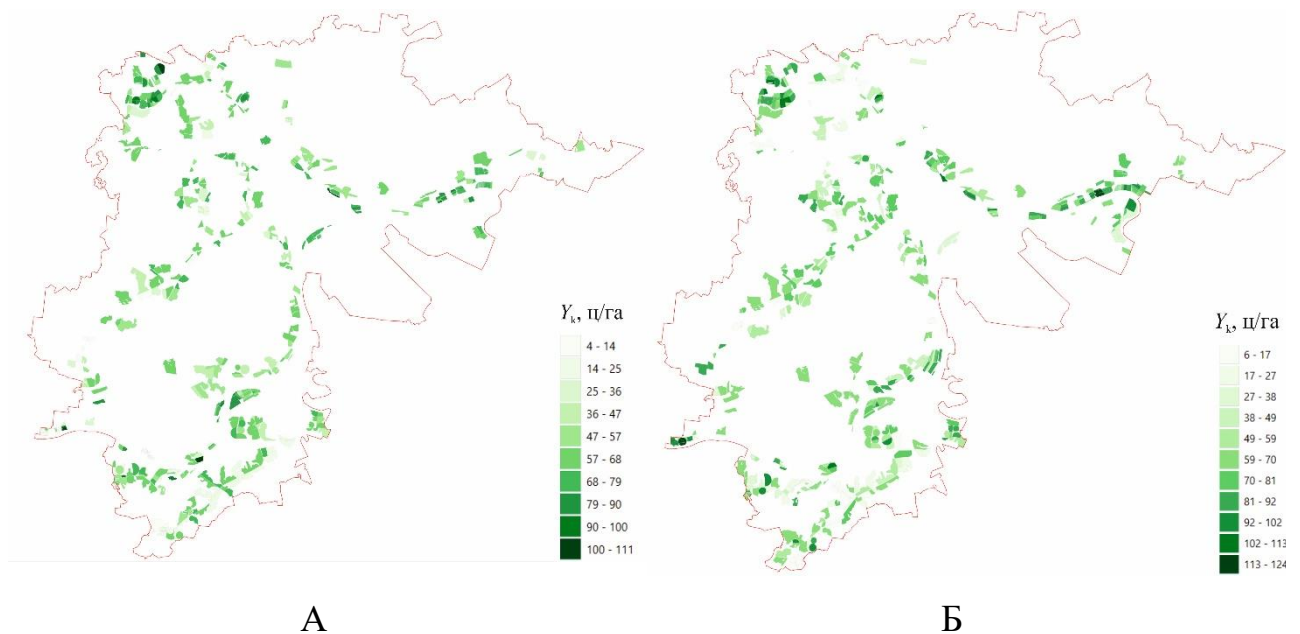


Рисунок 3 – Результаты моделирования урожайности, визуализированные в геоинформационной систем в 2024 (А) и 2025 (Б) годах

По рисунку 4 видно, что урожайность в зерновых единицах в 2024 г. в разрезе всех культур имеет более однородную структуру гистограммы, чем в 2024 г. Коэффициенты вариации выборок соответствующих групп до и после перевода урожая в зерновые единицы остались в основном на прежнем уровне 0,01...0,18. Медиана средних значений урожайности в зерновых единицах по всем культурам в севообороте 2024 года с коэффициентом

вариации 0,12 составила $Y_k = 45,87 \pm 2,77$ ц/га (стандартная ошибка $SE = 0,75$, стандартное отклонение $SD = 5,54$), минимальное значение $min = 33,36$ ц/га и максимальное значение $max = 54,73$ ц/га. Медиана средних значений урожайности в зерновых единицах по всем культурам в севообороте 2025 года с коэффициентом вариации 0,05 составила $Y_k = 49,76 \pm 1,31$ ц/га ($SE = 0,54$, $SD = 2,60$), $min = 43,35$ ц/га и $max = 55,88$ ц/га. На этом основании можно сделать вывод, что сезон 2025 года был более урожайным на 8,4% по сравнению с сезоном 2024 г. в пересчете на зерновые единицы.

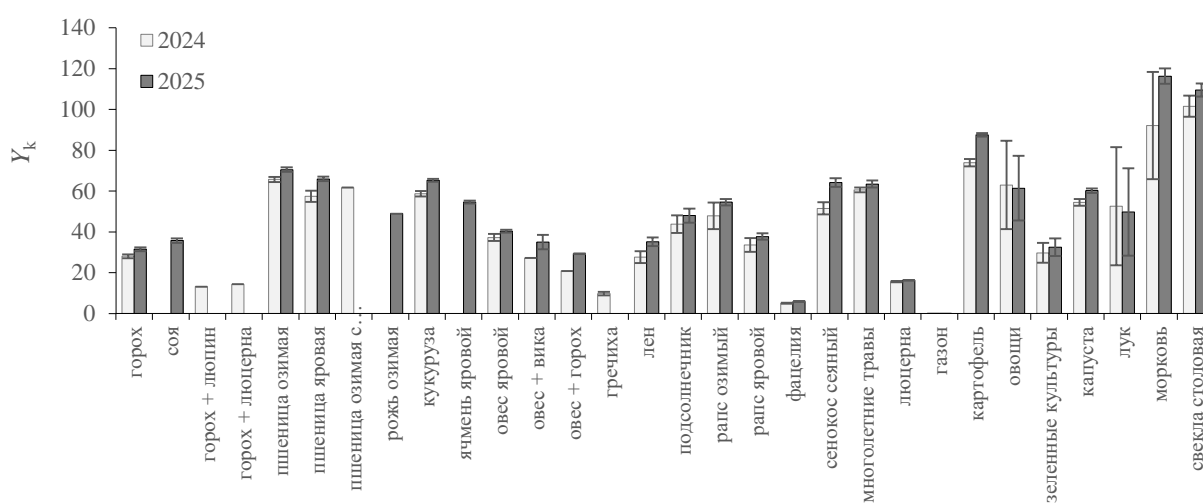


Рисунок 4 – Урожайность в пересчете на зерновые единицы

Выводы. Выполнены расчеты продуктивности сельскохозяйственных культур в зерновых единицах, результаты которого визуализированы в геоинформационной системе. Методика может быть использована для оценки эффективности мелиоративных мероприятий, реализуемых в рамках Приказа Минсельхоза России от 27.09.2024 N 562.

Необходимо также отметить важность в оценке точности прогноза урожайности. По данным автором детальный анализ растров и учет значения NDVI в каждом пикселе дает высокие уровни корреляции с фактическими данными. Однако такой подход очень требователен к ресурсам вычислительных процессов, поскольку оценка сопровождается сплошной

векторизацией растровых данных. Поэтому на практике для оптимизации вычислений и обработки атрибутивной информации выполняют прямой анализ растров и извлечение статистики. По данным авторов точность прогноза также определяется точностью оценки вероятного уровня урожайности исходной модели.

Список источников

1. Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А., Толпин В.А., Хвостиков С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 3. С. 275-285.
2. Зверьков М.С., Смелова С.С. Научно-аналитический обзор методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // *Экология и строительство*. 2023. № 2. С. 4–14. doi: 10.35688/2413-8452-2023-02-001.
3. Евчук М.В., Батыров В.А., Оросов С.А. Эффективность возделывания сорговых культур в условиях центральной зоны Республики Калмыкия // *Экология и строительство*. 2025. № 1. С. 28–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2025-01-004.
4. Татаринцев Л.М., Татаринцев В.Л. Определение оптимальных гидротермических условий произрастания пшеницы мягкой яровой в засушливой степи Алтайского края // *Экология и строительство*. 2025. № 3. С. 12–22. DOI: 10.35688/2413-8452-2025-03-002.
5. Mapping irrigated areas in Afghanistan over the past decade using MODIS NDVI / Shahriar Pervez, M., Budde, M. & Rowland, J. // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 149. P. 155–165.
6. Оценка площади и объема полигона твердых бытовых отходов с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Д. И. Маклашин, М. Р. Вагизов, Р. М. Бобровская // *Экология и строительство*. 2025. № 2. С. 39-47. DOI: 10.35688/2413-8452-2025-02-005. EDN FNMMIE.

7. Hassan M. et al. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform // *Plant Science (journal)*. 2019, Vol. 282, P. 95–103.
8. Bede L., Milics G. et al. Yield Prediction Using NDVI Values from GreenSeeker and MicaSense Cameras at Different Stages of Winter Wheat Phenology // *Drones*. 2024, Vol. 8, P. 88. DOI: 10.3390/drones8030088.
9. Feng, D., Yang, H., Gao, K., Jin, X., Li, Z., Nie, C., ... Li, S. (2025). Time-series NDVI and greenness spectral indices in mid-to-late growth stages enhance maize yield estimation. *Field Crops Research*, 333. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.110069
10. Zheng B. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // *Field Crops Research (Elsevier B.V.)*. 2017, Vol. 210, P. 71–80.
11. Dahal S. et al. Using NDVI to Differentiate Wheat Genotypes Productivity Under Dryland and Irrigated Conditions // *Remote Sensing (journal)*. 2020, Vol. 12, 824.
12. Zhang J. et al. Machine learning techniques and interpretability for maize yield estimation using Time-Series images of MODIS and Multi-Source data // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109063.
13. Mirhoseini Nejad S. M. et al. A Deep Neural Network for Crop Yield Prediction Using Earth Observations and Remotely Sensed Data // *Journal of Se. T. in Applied Earth Obs. and Rem. Se.* 2024. Vol. 17, P. 17489–17502. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3464411.
14. Lavalle C. et al. Economic evaluation of agricultural land to assess land use changes // *LUP*. 2016. Vol. 56. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.04.020.
15. Zhi, Y., Li, X., Shen, T. et al. Land productivity declines in the GGW while human contributions to restoration far outweighing degradation. *Sci Rep* 15, 34948 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-18963-2.

References

1. Savin I.Yu., Bartalev S.A., Lupyan E.A., Tolpin V.A., Khvostikov S.A. Prognozirovaniye urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove sputnikovykh dannykh: vozmozhnosti i perspektivy // *Sovrem. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010. T. 7. № 3. S. 275-285.
2. Zver'kov M.S., Smelova S.S. Nauchno-analiticheskii obzor metodov prognozirovaniya urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2023. № 2. С. 4–14. doi: 10.35688/2413-8452-2023-02-001.
3. Evchuk M.V., Batyrov V.A., Orosov S.A. Effektivnost' vozdeystviya sorgovykh kul'tur v usloviyakh tsentral'noi zony Respubliki Kalmykiya // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2025. No 1. С. 28–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2025-01-004.
4. Tatarintsev L.M., Tatarintsev V.L. Opredeleniye optimal'nykh gidrotermicheskikh uslovii proizrastaniya pshenitsy myagkoi yarovoi v zasushlivoi stepi Altaiskogo kraya // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2025. No 3. С. 12–22. DOI: 10.35688/2413-8452-2025-03-002.
5. Mapping irrigated areas in Afghanistan over the past decade using MODIS NDVI / Shahriar Pervez, M., Budde, M. & Rowland, J. // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 149. P. 155–165.
6. Otsenka ploshchadi i ob"ema poligona tverdykh bytovykh otkhodov s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli / D. I. Maklashin, M. R. Vagizov, R. M. Bobrovskaya // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2025. № 2. S. 39-47. DOI: 10.35688/2413-8452-2025-02-005. EDN FNMMIE.
7. Hassan M. et al. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform // *Plant Science (journal)*. 2019, Vol. 282, P. 95–103.
8. Bede L., Milics G. et al. Yield Prediction Using NDVI Values from GreenSeeker and MicaSense Cameras at Different Stages of Winter Wheat Phenology // *Drones*. 2024, Vol. 8, P. 88. DOI: 10.3390/drones8030088.

9. Feng, D., Yang, H., Gao, K., Jin, X., Li, Z., Nie, C., ... Li, S. (2025). Time-series NDVI and greenness spectral indices in mid-to-late growth stages enhance maize yield estimation. *Field Crops Research*, 333. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.110069
10. Zheng B. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // *Field Crops Research (Elsevier B.V.)*. 2017, Vol. 210, P. 71–80.
11. Dahal S. et al. Using NDVI to Differentiate Wheat Genotypes Productivity Under Dryland and Irrigated Conditions // *Remote Sensing (journal)*. 2020, Vol. 12, 824.
12. Zhang J. et al. Machine learning techniques and interpretability for maize yield estimation using Time-Series images of MODIS and Multi-Source data // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109063.
13. Mirhoseini Nejad S. M. et al. A Deep Neural Network for Crop Yield Prediction Using Earth Observations and Remotely Sensed Data // *Journal of Se. T. in Applied Earth Obs. and Rem. Se.* 2024. Vol. 17, P. 17489–17502. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3464411.
14. Lavallo C. et al. Economic evaluation of agricultural land to assess land use changes // *LUP*. 2016. Vol. 56. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.04.020.
15. Zhi, Y., Li, X., Shen, T. et al. Land productivity declines in the GGW while human contributions to restoration far outweighing degradation. *Sci Rep* 15, 34948 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-18963-2.

© Зверьков М.С., Мазурова И.С., 2025. *Московский экономический журнал*,
2025, № 12.