

Научная статья

Original article

УДК 338.31:633.412:528.8

doi: 10.55186/2413046X_2025_10_5_143

**СРАВНЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ И ФАКТИЧЕСКОЙ УРОЖАЙНОСТИ
СТОЛОВОЙ СВЕКЛЫ (*BETA VULGARIS L.*) ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА НА ЭРОДИРОВАННЫХ
ЗЕМЛЯХ**

**COMPARISON OF PREDICTED AND ACTUAL TABLE BEET (*BETA
VULGARIS L.*) YIELDS BY SATELLITE MONITORING DATA ON
ERODED LANDS**



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>

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

Аннотация. Цель исследования заключалась в сравнении прогнозной и фактической урожайности столовой свеклы (*Beta vulgaris L.*) по значению вегетационного индекса NDVI на эродированных землях орошаемого участка в Московской области. Пиковых значений NDVI ($0,81 \pm 0,04$) культура достигла в фазу интенсивного развития корнеплода. С использованием данных дистанционного зондирования Земли выполнен прогноз урожайности, которая составила 58,30...64,14 т/га. Различия между фактической (60 т/га) и

прогнозной урожайностью составили 1,8...6,9%. Оценены риски потери доходности хозяйства от эрозии и вымочек по значению фактической и прогнозной урожайности, которые составили 2,8%.

Abstract. Comparison of the predicted and actual yields of table beets (*Beta vulgaris* L.) by the value of the vegetation index NDVI on eroded lands of the irrigated area in the Moscow region was the purpose of this study. The culture of table beets reached the peak NDVI values (0.81 ± 0.04) on the phase of intensive development of the root crop. The yield forecast was made using remote sensing data. The yield was 58.30...64.14 t/ha. The differences between the actual (60 t/ha) and forecast yields were 1.8...6.9%. The risks of loss of farm profitability from erosion and soil degradation were estimated by the value of actual and forecast yields and was 2.8%.

Ключевые слова: урожайность, столовая свекла, дистанционное зондирование, NDVI, эрозия, доходность

Keywords: yield, table beet, remote sensing, NDVI, erosion, yield

Введение. Прогноз урожайности является одним из основных звеньев управления сельскохозяйственным производством. Эта информация позволяет оценивать не только потенциальный уровень доходности, но и прогнозировать риски, связанные с недобором урожая из-за развития деградационных процессов на мелиорируемых землях. Оценка эффективности и рентабельности возделывания сельскохозяйственных культур всегда остается актуальной научно-практической проблемой [1]. При этом особенно популярным в последнее время является использование цифровых инструментов в практике мониторинга за состоянием посевов, почв, мелиорируемых систем и объектов [2, 3, 4]. В научной литературе отмечаются удовлетворительные результаты использования спутниковых снимков в качестве оперативной информации при фенологических наблюдениях за культурой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и картофеля

(*Solanum tuberosum* L.) [5, 6, 7]. Мало освященным остается вопрос оценки урожайности столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) по значению вегетационного индекса NDVI, который рассматривается в основном в исследованиях зарубежных авторов [8, 9].

Цель настоящего исследования заключалась в сравнении прогнозной и фактической урожайности столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) по значению вегетационного индекса NDVI на эродированных землях орошаемого участка в Московской области. По данным Росстата в период 2019–2023 гг. урожайность столовой свеклы в Московской области составила 36,2 т/га, что выше, чем в среднем по стране (25,6 т/га). По данным ФГБНУ ВНИИ «Радуга» урожайность столовой свеклы при орошении составляет в среднем по стране 28,9 т/га, что выше на 10,7 т/га чем в богарных условиях.

Материалы и методы исследования. На опытном участке, расположенном на землях АО «Северка» в Коломенском городском округе Московской области в с. Шкинью, в соответствии со схемой севооборота в 2024 г. выращивали столовую свеклу сорта Кестрел F1 (оригинатор Sakata Vegetables Europe S.A.S.). Полив осуществляли дождевальными машинами кругового действия Т-Л. Площадь посева составила 34,3 га. Сорт среднеспелый (период вегетации 115–120 дней), включен в Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию. Розетка листьев полупрямостоячая. Лист овальный, зеленый, слабопузырчатый, волнистость края сильная. Черешок с нижней стороны красный. Корнеплод округлый, опробковение головки среднего размера, кольца среднего размера. Мякоть красная. Масса корнеплода 203...375 г. Содержание сухого вещества составляет 13,0...17,4%, общего сахара – 5,7...10,0%, выход товарной продукции – 84...96%. Посев выполнен в период с 20 по 27.05.2024 г., первые всходы появились 01.06.2024 г., массовые всходы – 05.06.2024 г., уборка корнеплодов выполнена 01.10.2024 г. Посадка осуществлялась в ряды шириной 150 см с расстоянием между рядами 25 см, глубина заделки семян

составила 3 см, расход семян – 840 кг/га. Фактическая урожайность по данным хозяйства составила 60 т/га.

При программировании урожайности использован стандартный метод А.А. Ничипоровича согласно зависимости:

$$Y_{\text{FAR}} = \frac{\Sigma Q_{\text{FAR}} K}{10^2 q 10^2},$$

где Y_{FAR} – урожайность абсолютно сухой растительной массы, т/га; ΣQ_{FAR} – количество приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР) за период вегетации культуры в данном регионе, млрд ккал/га; K – запланированный коэффициент использования ФАР, % (для условий расчета принят $K = 3\%$); 10^2 – перевод K в абсолютные величины; q – калорийность органического вещества единицы урожая (количество энергии, выделяемое при сжигании 1 кг сухого вещества), ккал/кг; 10^2 – перевод из кг в ц.

Для культуры столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) в литературе отсутствуют данные о значениях q . Однако известно, что для свеклы сахарной (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *saccharifera* L.) и кормовой (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* var. *crassa*) этот показатель составляет соответственно 4230 и 3850 ккал/кг [10, 11]. Необходимо также отметить, что корнеплоды разных сортов свеклы отличаются по содержанию сахара (в среднем в % сухого вещества): кормовая – 1...3, столовая – 11...12, сахарная – до 20. На этом основании в данном исследовании при расчете прогнозного значения урожайности столовой свеклы принят диапазон $q = 3850...4230$ ккал/кг (в том числе среднее значение). Период вегетации от массовых всходов до уборки составил 117 дней, что соответствует сортовым особенностям культуры. Расчет количества приходящей ФАР выполнен по среднемноголетним данным на широте участка ($55,122^\circ$ с. ш.) по методике [12]. Накопленный посевами *Beta vulgaris* L. приход ФАР с 05.06.2024 г. по 30.09.2024 г. составил 28,4 ккал/см² или 28,4 10^8 млрд ккал/га.

Урожайность основной продукции стандартной влажности $Y_{\text{ст.вл.}}$ вычислена по формуле (т/га):

$$Y_{\text{ст.вл.}} = Y_{\text{FAR}} \frac{100}{(100 - w)\alpha'}$$

где w – стандартная влажность, %; α – отношение суммы абсолютно сухой биомассы основной продукции, равной единице, к абсолютно сухой биомассе побочной продукции.

Картографирование участка гидромелиоративной системы выполнено в среде программы QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze»). Цифровой двойник поля соответствует ГОСТ Р 70611-2022. Исходная система координат – WGS 84 (Pseudo-Mercator, EPSG:3857). Расчет вегетационного индекса NDVI проведен в растровом калькуляторе путем микширования спектральных каналов B08 (NIR) и B04 (RED) по данным спутника Sentinel-2 Европейского космического агентства. Отбирались «безоблачные» спектральные снимки. Полученные растры векторизованы в геоинформационной системе SAGA GIS 9.3.1. Оценка площадей выполнена с помощью функции геометрии полигонального объекта \$area, которая позволяет вычислить площадь по эллипсоиду (если он установлен в системе координат) или на плоскости (если эллипсоид не установлен).

Известно, что временные ряды NDVI (Normalized difference vegetation index – нормализованный разностный вегетационный индекс) на разных фенологических стадиях развития сельскохозяйственных культур или в течение всего вегетационного периода являются хорошим предиктором в моделях урожайности сельскохозяйственных культур [13]. После векторизации растра для каждой фенофазы на протяжении вегетационного периода получен набор атрибутивных данных со значениями NDVI. Эти данные используются в прогнозе урожайности $Y_{\text{пр}}$ по зависимости:

$$Y_{\text{пр},i} = f(\text{NDVI}_i(x_i; y_i); Y_{\text{ст.вл.}}),$$

где NDVI_i – значение вегетационного индекса в векторизованном участке поля с координатами центра $(x_i; y_i)$.

Для итогового векторного слоя по атрибутивным значениям NDVI рассчитывались значения зональной статистики (медиана *median*, минимальные *min* и максимальные *max* значения). Уровень статистической значимости принят 0,05, рассчитывалось стандартное отклонение *s*, доверительный интервал медианы и коэффициент корреляции *r*. Обработка данных и графическое оформление результатов исследования также выполнены в электронных таблицах Microsoft Office Excel (ver. 16.10 Build 180124 (2018)).

При расчете экономического риска эрозии *C* приняты следующие допущения: сумма эколого-экономических ущербов за пределами изучаемого участка отсутствует. А сумма локальных эффектов из-за риска эрозии (и других деградационных процессов) выражается только недобором урожая из-за неэффективного использования площади участка. Тогда стоимость ущерба C_c от потери урожая составит:

$$C_c = C(Y_{pot}) - C(Y) = C_y(Y_{pot} - Y),$$

где $C(Y_{pot})$ – потенциально возможный доход (экономический эффект, прибыль) от реализации урожая; $C(Y)$ – доход за реально собранный урожай; C_y – цена реализации единицы урожая.

Для условий расчета значение $C_y = 19655,39$ руб./т принято по средней для Московской области (в среднем за январь–сентябрь 2024 г.) цене производителей сельскохозяйственной продукции на столовую свеклу по данным Росстата.

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 1а показан график хронологического хода NDVI для *Beta vulgaris* L., на рисунке 1б – гистограмма распределения значений вегетационного индекса при максимальном значении. Самые низкие медианные значения NDVI $0,19 \pm 0,02$ ($s = 0,03$) и $0,17 \pm 0,02$ ($s = 0,04$) пришлись соответственно на голую почву в период посева 30.05 и в период массовых всходов 12.06. Несмотря на разницу в значениях в этот период вегетационный индекс у голой почвы и

всходов не имеют статистических различий ($r = 0,98$), на графике (рисунок 1а) диапазоны значений *min* и *max* также достаточно близкие: 0,12...0,22 и 0,11...0,22 соответственно. При образовании 1 пары настоящих листьев (наиболее релевантный снимок за 19.06) значение NDVI выросло до $median = 0,40 \pm 0,03$ ($s = 0,09$), в период образования 2 и 3 пары листьев – $0,63 \pm 0,04$ ($s = 0,13$) и $0,68 \pm 0,04$ ($s = 0,12$) соответственно 27.06 и 04.07.

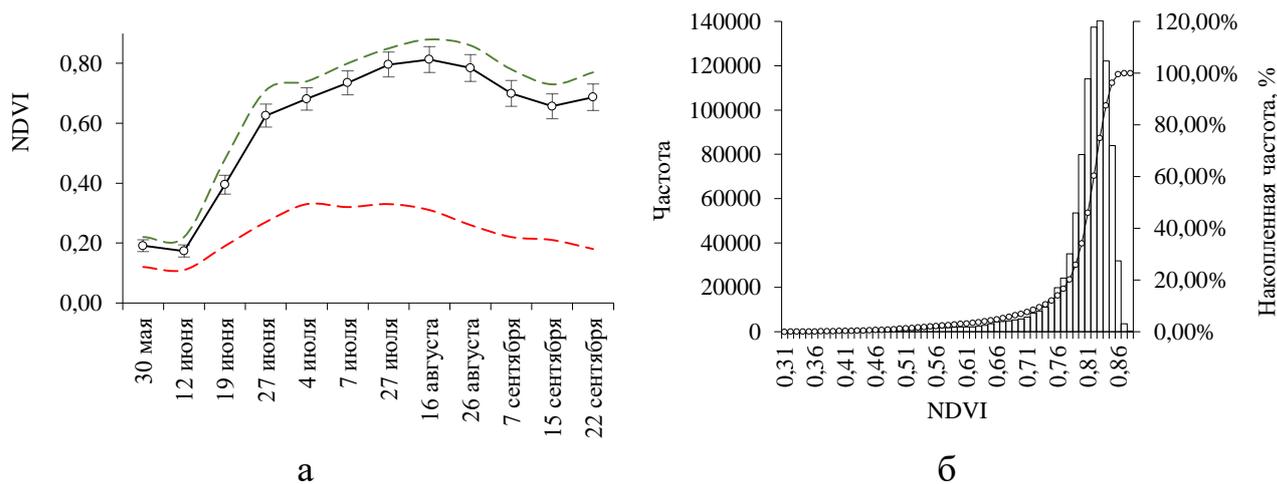
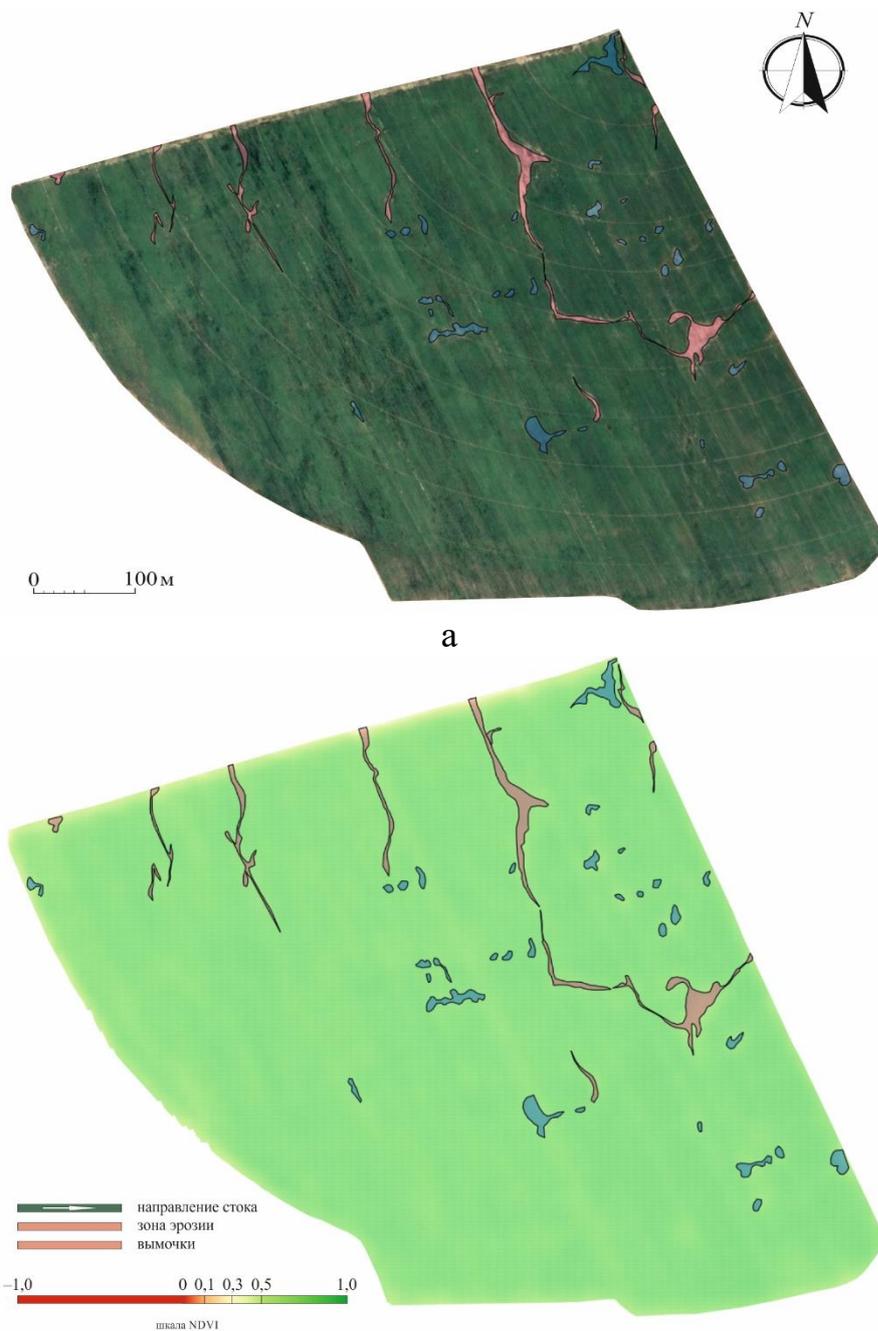


Рисунок 1 – График хронологического хода (а) и гистограмма за 16.08.2024 г. (б) значений NDVI для *Beta vulgaris* L. на опытном участке: —○— — значения NDVI; - - - - и - . - . - — соответственно максимальные и минимальные значения NDVI; □ — гистограмма частот NDVI; —○— — накопленная частота NDVI

Образование 4 пары листьев и начало смыкания рядков пришлось на 07.07, в этот период вегетационный индекс составил $0,74 \pm 0,04$ ($s = 0,14$). На рисунке 1а обращает на себя внимание увеличение диапазона значений *min* и *max* после 12.06, что связано с неоднородностью снимков из-за присутствия технологических рядков между грядами и из-за нарушения мелиоративного состояния участка, возникновением очагов эрозии почвы и вымочек (см. рисунок 2). Последние по данным [14] являются одними из часто встречающихся последствий снижения мелиоративного состояния земель. По данным дистанционного мониторинга и дешифрирования спутниковых снимков площадь переувлажненных участков (вымочек) составляет 0,52 га (1,8% от общей площади), эродированных почв – 0,37 га (1,4%). С точки

зрения нормативных показателей по ГОСТ Р 70611-2022 (приложение А) по доле переувлажненных участков группа мелиоративного состояния хорошая (допустимо), по эрозии – удовлетворительная. Общая площадь деградационных процессов наблюдается на площади 0,89 га (3,2%), на которой произошла гибель растений свеклы и, как результат, снижение валовых сборов.



б

Рисунок 2 – Снимок (а) в естественных цветах («true color») и картосхема индекса NDVI (б) за 16.08.2024 г.

Максимальное значение NDVI по данным мониторинга культуры пришлось на 16.08 в период интенсивного наращивания корнеплода (рисунок 1б) и составило $median = 0,81 \pm 0,04$ ($s = 0,17$). Эта точка является перегибом на графике (рисунок 1а). Необходимо отметить, что в период пучковой зрелости (27.07) вегетационный индекс составил $0,80 \pm 0,04$ ($s = 0,15$). Данные ряды NDVI не имеют статистических различий ($r = 0,98$), поэтому оба значения $median$ могут использоваться для прогноза урожайности. В период с 26.08 по 15.09 значения NDVI уменьшались и находились в диапазоне $0,78 \pm 0,04$ и $0,66 \pm 0,04$ соответственно. Последние наблюдения состоялись 22.09 в фазу технической спелости: $median = 0,69 \pm 0,04$ ($s = 0,17$).

Прогнозные значения урожайности (и ошибка в % по сравнению с фактически полученной) для калорийности q органического вещества единицы урожая, равной 3850, 4037,5 и 4230 ккал/кг соответственно составили 64,14 (6,9%), 61,09 (1,8%) и 58,3 (2,8%) т/га. В таблице приведены результаты расчетов экономических рисков потери доходности хозяйства от эрозии и вымочек по значению фактической и прогнозной урожайности.

Результаты расчетов экономических рисков потери доходности хозяйства от эрозии и вымочек

Показатель и	Оценка экономических рисков (руб.) от потери урожая по данным			
	прогноза			фактическим
	64,14 т/га	61,09 т/га	58,3 т/га	60 т/га
$C(Y_{pot})$	40846573,6	38904228	37127459	38210078
$C(Y_3)$ *	660605,078	629191,8	600456,4	617965,5
$C(Y_B)$ **	470239,875	447878,9	427424,1	439887,6
C_c	1130844,95	1077071	1027881	1057853

Примечания: * – потерянная доходность из-за эрозионных процессов на почве; ** – то же для вымочек.

Выводы. С использованием данных дистанционного зондирования Земли выполнен прогноз урожайности столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.). Различия

между фактической и прогнозной урожайностью составили 1,8...6,9%.
Оценены риски потери доходности хозяйства от эрозии и вымочек по значению фактической и прогнозной урожайности, которые составили 2,8%.

Список источников

1. Эффективность возделывания сорговых культур в условиях центральной зоны Республики Калмыкия / М.В. Евчук, В.А. Батыров, С.А. Оросов // Экология и строительство. 2025. № 1. С. 28-34. DOI 10.35688/2413-8452-2025-01-004.
2. Алгоритм геоботанических исследований на мелиоративных объектах с использованием данных беспилотных летательных аппаратов / С.С. Смелова // Экология и строительство. 2021. № 3. С. 9-16. DOI 10.35688/2413-8452-2021-03-004.
3. Спектральная отражательная способность почв Мильской степи Азербайджана в зависимости от их химических и физических свойств / С.А. Кочарли, М.Г. Мустафаев, Э.М. Ахмедзаде [и др.] // Экология и строительство. 2025. № 1. С. 4-11. DOI 10.35688/2413-8452-2025-01-001.
4. К вопросу о ретроспективном картографировании прибрежно-водной растительности мелиоративных водоемов / С.С. Смелова // Экология и строительство. 2025. № 2. DOI 10.35688/2413-8452-2025-02-002.
5. Belmahi M., Hanchane M., Krakauer N. Y., Kessabi R., Bouayad H., Mahjoub A., Zouhri D. Analysis of Relationship between Grain Yield and NDVI from MODIS in the Fez-Meknes Region, Morocco // Remote Sensing, 2023, vol. 15(11). DOI: 10.3390/rs15112707.
6. Normalized difference vegetation index as a tool for wheat yield estimation: a case study from Faisalabad, Pakistan / Sultana S.R., Ali A., Ahmad A. et al. // The Scientific World Journal, 2014, 725326, 8 p. DOI: 10.1155/2014/725326.
7. A Systematic Review of Vegetation Indices for Potato Growth Monitoring and Tuber Yield Prediction from Remote Sensing / Mukiibi A., Machakaire A.T.B.,

Franke A.C. et al. // *Potato Res.* 2025. Vol. 68, P. 409–448. doi: 10.1007/s11540-024-09748-7.

8. Chancia R., van Aardt J., Pethybridge S., Cross D., Henderson J. Predicting Table Beet Root Yield with Multispectral UAS Imagery // *Remote Sens.* 2021, vol. 13, 2180. doi: 10.3390/rs13112180.

9. Saif M.S., Chancia R., Pethybridge S., Murphy S.P., Hassanzadeh A., van Aardt, J. Forecasting Table Beet Root Yield Using Spectral and Textural Features from Hyperspectral UAS Imagery // *Remote Sens.* 2023, vol. 15, 794. doi: 10.3390/rs15030794.

10. Справочник агронома Нечерноземной зоны / под ред. Г.В. Гуляева. М.: Агропромиздат, 1990. 575 с.

11. Каюмов М. К. Программирование продуктивности полевых культур: справочник. М. : Росагропромиздат, 1989. 368 с.

12. Биоклиматический потенциал России: методы мониторинга в условиях изменяющегося климата / А.Д. Клещенко, Б.А. Черняков, О.Д. Сиротенко [и др.]; Под редакцией А.В. Гордеева. М: Типография Россельхозакадемии, 2007. 236 с.

13. A Systematic Review of Vegetation Indices for Potato Growth Monitoring and Tuber Yield Prediction from Remote Sensing / Mukiibi A., Machakaire A.T.B., Franke A.C. et al. // *Potato Res.* 2025. Vol. 68, P. 409–448. doi: 10.1007/s11540-024-09748-7.

14. Моделирование условий формирования вымочек на мелиорируемых землях с учетом гидрофизических свойств почв / А.Е. Качаев, С.С. Турапин // *Экология и строительство.* 2025. № 2. DOI 10.35688/2413-8452-2025-02-004.

References

1. Effektivnost' vozdeleyvaniya sorgovykh kul'tur v usloviyakh tsentral'noi zony Respubliki Kalmykiya / M.V. Evchuk, V.A. Batyrov, S.A. Orosov // *Ekologiya i stroitel'stvo.* 2025. № 1. S. 28-34. DOI 10.35688/2413-8452-2025-01-004.

2. Algoritm geobotanicheskikh issledovaniy na meliorativnykh ob'ektakh s ispol'zovaniem dannykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov / S.S. Smelova // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2021. № 3. S. 9-16. DOI 10.35688/2413-8452-2021-03-004.
3. Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' pochv Mil'skoi stepi Azerbaidzhana v zavisimosti ot ikh khimicheskikh i fizicheskikh svoystv / S.A. Kocharli, M.G. Mustafaev, E.M. Akhmedzade [i dr.] // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2025. № 1. S. 4-11. DOI 10.35688/2413-8452-2025-01-001.
4. K voprosu o retrospektivnom kartografirovaniy pribrezhno-vodnoi rastitel'nosti meliorativnykh vodoemov / S.S. Smelova // *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2025. № 2. DOI 10.35688/2413-8452-2025-02-002.
5. Belmahi M., Hanchane M., Krakauer N. Y., Kessabi R., Bouayad H., Mahjoub A., Zouhri D. Analysis of Relationship between Grain Yield and NDVI from MODIS in the Fez-Meknes Region, Morocco // *Remote Sensing*, 2023, vol. 15(11). DOI: 10.3390/rs15112707.
6. Normalized difference vegetation index as a tool for wheat yield estimation: a case study from Faisalabad, Pakistan / Sultana S.R., Ali A., Ahmad A. et al. // *The Scientific World Journal*, 2014, 725326, 8 p. DOI: 10.1155/2014/725326.
7. A Systematic Review of Vegetation Indices for Potato Growth Monitoring and Tuber Yield Prediction from Remote Sensing / Mukiibi A., Machakaire A.T.B., Franke A.C. et al. // *Potato Res.* 2025. Vol. 68, P. 409–448. doi: 10.1007/s11540-024-09748-7.
8. Chancia R., van Aardt J., Pethybridge S., Cross D., Henderson J. Predicting Table Beet Root Yield with Multispectral UAS Imagery // *Remote Sens.* 2021, vol. 13, 2180. doi: 10.3390/rs13112180.
9. Saif M.S., Chancia R., Pethybridge S., Murphy S.P., Hassanzadeh A., van Aardt, J. Forecasting Table Beet Root Yield Using Spectral and Textural Features from Hyperspectral UAS Imagery // *Remote Sens.* 2023, vol. 15, 794. doi: 10.3390/rs15030794.

10. Spravochnik agronoma Nechernozemnoi zony / pod red. G.V. Gulyaeva. M.: Agropromizdat, 1990. 575 s.
11. Kayumov M. K. Programmirovaniye produktivnosti polevykh kul'tur: spravochnik. M. : Rosagropromizdat, 1989. 368 s.
12. Bioklimaticheskii potentsial Rossii: metody monitoringa v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata / A.D. Kleshchenko, B.A. Chernyakov, O.D. Sirotenko [i dr.]; Pod redaktsiei A.V. Gordeeva. M: Tipografiya Rossel'khozakademii, 2007. 236 s.
13. A Systematic Review of Vegetation Indices for Potato Growth Monitoring and Tuber Yield Prediction from Remote Sensing / Mukiibi A., Machakaire A.T.B., Franke A.C. et al. // Potato Res. 2025. Vol. 68, P. 409–448. doi: 10.1007/s11540-024-09748-7.
14. Modelirovaniye uslovii formirovaniya vymochek na melioriruemykh zemlyakh s uchetom gidrofizicheskikh svoistv pochv / A.E. Kachaev, S.S. Turapin // Ekologiya i stroitel'stvo. 2025. № 2. DOI 10.35688/2413-8452-2025-02-004.

© Зверьков М.С., 2025. *Московский экономический журнал*, 2025, № 5.