

Научная статья

Original article

УДК 633.11 : 528.8

DOI 10.55186/25880209_2025_9_6_28

4.1.5 «Мелиорация, водное хозяйство, агрофизика» (сельскохозяйственные науки)

ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ NDVI И ЛИМИТУ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ

WINTER WHEAT YIELD ASSESSMENT BY NDVI VALUE AND MOISTURE
AVAILABILITY LIMIT



Зверьков Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт «Радуга» (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>, rad_sc@bk.ru

Смелова Светлана Станиславовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт «Радуга» (пос. Радужный, д. 38, Коломна, Московская обл., Россия, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1717-0026>

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

Svetlana Stanislavovna Smelova, candidate of biological sciences, senior researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Raduzhny village, 38, Kolomna, Moscow region, Russia, 140483), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1717-0026>

Аннотация. Цель настоящего исследования заключалась в оценке урожайности озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по величине спектрального вегетационного индекса NDVI и лимиту влагообеспеченности. Анализ спутниковых данных и графика NDVI показал, что математическое ожидание функции вегетационного индекса соответствует величине $0,83 \pm 0,05$ (стандартное отклонение 0,18, коэффициент вариации 0,23). Возможный урожай по приходу ФАР по методике А.А. Ничипоровича, приведенной к стандартной влажности, оценивается на уровне 72,79 ц/га. При уровне NDVI вблизи окрестности максимального значения медианы и максимума 0,8...0,9 хозяйственно полезная урожайность может составить 60,41 ц/га. Для *Triticum aestivum* L. величина суммарного водопотребления за период вегетации составила 199,3 мм. Тогда потенциально возможная урожайность культуры, исходя из условий влагообеспеченности территории, составит 122 ц/га, а с учетом NDVI по модели авторов настоящего исследования – 102,1 ц/га для стандартной влажности 14% – 47,5 ц/га. Фактическая урожайность, полученная в хозяйстве, составляет 59,1 ц/га. Ошибка прогноза урожайности по ФАР и NDVI соответствует 2,5%, а по уровню влагообеспеченности и NDVI – 19,7%.

Abstract. The assessment of winter wheat yield (*Triticum aestivum* L.) by the value of spectral vegetation NDVI and moisture supply limit is the purpose of this article. The mathematical expectation of the vegetation index function corresponds to a value of 0.83 ± 0.05 (standard deviation 0.18, coefficient of variation 0.23) is showed by analysis of satellite data and the NDVI plot. The possible yield for the arrival of solar photosynthetically active radiation according to the method of A.A. Nichiporovich, reduced to standard humidity, is estimated at 72.79 centners per hectare. At the NDVI level near the vicinity of the median and maximum 0.8... 0.9, the economically useful yield can be 60.41 centners per hectare. The total water consumption during the growing season was 199.3 mm for *Triticum aestivum* L. Then the potential yield of the crop based

on the conditions of moisture supply of the territory will be 122 centners per hectare, and taking into account NDVI according to the model of the authors of this study – 102.1 centners per hectare, for a standard humidity of 14% – 47.5 centners per hectare. The actual yield obtained on the farm is at the level of 59.1 centners per hectare. The error of the yield forecast for PAR and NDVI is within 2.5%, and for the level of moisture supply and NDVI – 19.7%.

Ключевые слова: урожайность, озимая пшеница, NDVI, влагообеспеченность, фотосинтетически активная солнечная радиация

Keywords: yield, winter wheat, NDVI, moisture availability, photosynthetically active solar radiation

Введение

В последнее время фокус многих исследований направлен на оценку продуктивности сельскохозяйственных культур. В работе [1] отмечается рост числа исследований с использованием данных дистанционного зондирования Земли. С одной стороны, это связано с доступностью последних, с другой – интенсивным поиском статистически значимых результатов. Это особенно важно в период цифровизации отрасли растениеводства и адаптации прецизионного земледелия для фермеров. Появление все новых сервисов позволяет выполнять анализ спутниковых данных практически в режиме реального времени. С развитием технологий искусственного интеллекта и методов машинного обучения точность таких анализов и прогнозов на их основе будет расти, так как будет учитываться большее количество условий и их сочетаний. Нейронные сети все чаще используются для построения моделей урожайности, основанных на big data. Последние достижения свидетельствуют о высоких прогностических возможностях этих моделей [2]. Многие авторы отмечают важность оценки продуктивности сельскохозяйственных культур в целях оптимизации севооборотов и менеджмента ресурсов [3]. Ряд работ посвящен оценке эффективности возделывания культур при различных экологических условиях и вариантах агротехники [4, 5]. Оценка урожайности также требуется при обосновании рентабельности производства. Для руководства агропромышленного

комплекса прогноз урожайности позволяет оценивать достижимость целей экономического развития [6].

Цель настоящего исследования состояла в том, чтобы выполнить оценку урожайности озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по величине спектрального вегетационного индекса NDVI и лимиту влагообеспеченности.

В задачи исследования входила оценка статистически значимых параметров индекса NDVI (уровень значимости $p < 0,05$). Также выполнялась параметризация моделей А.А. Ничипоровича, влагообеспеченности, анализ метеорологических данных. Оценивалась ошибка результатов прогноза в соответствии с фактически полученной урожайностью в хозяйстве.

Методы и методология проведения исследования

Участок, на котором в 2024 г. выращивали культуру озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), расположен на склоновых землях АО «Северка» (Группы компаний «Малино»). На участке отмечается выраженный процесс водной эрозии. Во влажные годы при отсутствии ливневых осадков эродированная зона зарастает сорной растительностью. Для севооборота характерно чередование пропашных культур (картофеля) и зерновых.

Для вычисления урожайности озимой пшеницы использовали классические зависимости для оценки потенциально возможного уровня продуктивности сельскохозяйственной культуры в зависимости от количества поступившей солнечной радиации и уровня обеспеченности посевов влагой. В первом случае использовали зависимость А.А. Ничипоровича, включающую сумму приходящей фотосинтетически активной солнечной радиации Q (ФАР) за период вегетации в зависимости от коэффициента k , ее использование культурой и энергетическую характеристику абсолютно сухой биомассы урожая q . Величина ФАР в модели определяется широтой местности. При наиболее жестких граничных условиях поле необходимо разбивать на сетку примерно равных по площади земельных участков, для каждого из которых требуется оценить Q . Однако, для практических целей с достаточной точностью возможно оценивать Q для центра поля. При использовании геоинформационных систем возможно вычислить координаты

центра поля для заданных границ полигонального векторного объекта. Затем с помощью инструментов анализа растровых изображений путем автоматической интерполяции можно оценить величину Q по геореференцированному grid-изображению зон суммарной ФАР. Также возможно вычислить Q по уравнению баланса прямой и рассеянной ФАР.

Установлено, что за рассматриваемый период с 01.04.2024 г. (возобновление весенней вегетации после перехода среднесуточных температур воздуха через отметку $+5^{\circ}\text{C}$) и до полного созревания культуры 25.07.2024 г. , суммарная ФАР составила около $28,51 \text{ ккал/см}^2$. Для прогноза урожайности принят коэффициент использования солнечной радиации на уровне $k = 3\%$. Необходимо отметить, что для культуры *Triticum aestivum* L. это достаточно высокий показатель, что в условиях данного хозяйства является обоснованным высоким уровнем агротехники и использованием семян только первой репродукции. По наблюдениям авторов все это в совокупности позволяет культуре наиболее эффективно использовать ФАР. Калорийность сухого органического вещества принята на уровне $q = 4450 \text{ ккал/кг}$. Хозяйственно полезная урожайность оценивалась по общепринятой методике с использованием данных о стандартной влажности зерна $w = 14\%$ и доле побочной продукции – 1,5.

Для оценки потенциально возможной урожайности культуры, исходя из условий влагообеспеченности территории, использован подход, описанный в работах М.К. Каюмова [7]. В общем виде зависимость имеет следующий вид:

$$Y_{p,w} = 100W_p/E,$$

где $Y_{p,w}$ – потенциально возможная урожайность культуры исходя из условий влагообеспеченности, ц/га; W_p – уровень продуктивной влаги в почве, расходуемой растениями, мм; E – коэффициент водопотребления культуры, мм га/ц.

Уровень продуктивной влаги W_p обычно оценивается по сокращенной зависимости:

$$W_p = W_s + P,$$

где W_s – количество влаги на начало вегетационного периода (возобновление вегетации) в 100 см слое почвы, выраженное в мм; P – количество осадков за вегетационный период, мм.

В действительности W_p определяется уравнением водного баланса поля, который в общем виде можно выразить следующим уравнением:

$$W_p = W_s + K_p P + V_{gr} - ET + M,$$

где W_s – уровень весенних влагозапасов в почве на начало вегетации (принят по С.А. Вериго), $W_s = 200$ мм; k_p – коэффициент использования осадков за вегетационный период культуры, принимается равным 0,7…1,0; M – оросительная норма, мм (равна 0, так как рассматриваемая культура выращивалась в богарных условиях); V_{gr} – количество влаги, расходуемой за счет капиллярного подпитывания грунтовыми водами за тот же период, мм; ET – потенциальная эвапотранспирация культуры (испаряемость), мм.

ET оценивалась по методике ФГБНУ ВНИИ «Радуга», подробно изложенной в [8] и [9]. Уравнение для расчета эвапотранспирации за вегетационный период имеет следующий вид:

$$ET = 0,0061(25 + t)^2(1 - 0,01\varphi) 0,64(1 + 0,19v),$$

где t – среднесуточная температура воздуха за каждый день вегетации, $^{\circ}\text{C}$; φ – относительная влажность воздуха, %; v – приведенная скорость ветра на высоте 2 м.

Грунтовые воды на участке в среднем находились на глубине около 4 м от поверхности земли. Почвы участка подзолистого ряда, глинистого гранулометрического состава. Количество влаги V_{gr} , расходуемой растениями за счет капиллярного подпитывания грунтовыми водами, в данной работе оценивается по эмпирической зависимости вида:

$$V_{gr} = \sum_{i=1}^n ET e^{-m_j h_j},$$

где n – порядковый номер дня вегетационного периода; $i = 1$ – первый день периода (возобновления) вегетации; e – экспонента (основание натурального логарифма); m_j – эмпирический параметр, зависящий от периода вегетации j , для активной вегетации почвенных условий участка $m = 0,7$, в предпоследнюю декаду – 0,9, в последнюю декаду – 1,2.

Для характеристики уровня влагообеспеченности использовались данные метеорологической станции г. Коломны (индекс станции 27625). Графики хода ежедневных сумм выпавших осадков K_pP , испаряемости ET приведены на рисунке 1, капиллярного подпитывания грунтовыми водами V_{gr} – на рисунке 2.

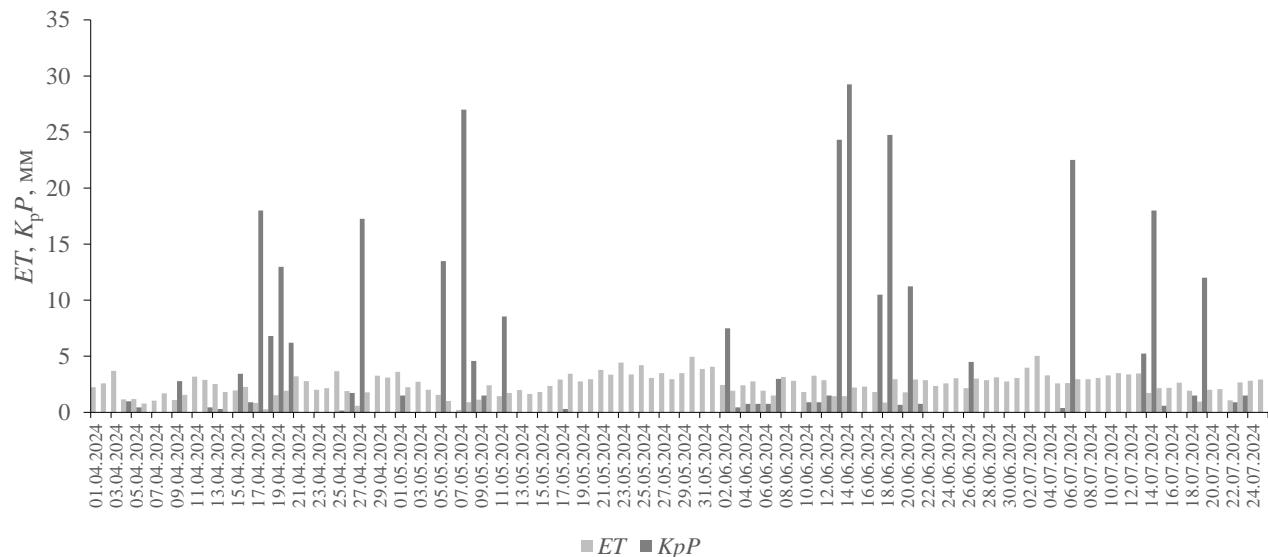


Рисунок 1 – Графики хода ежедневных сумм выпавших осадков K_pP , испаряемости ET

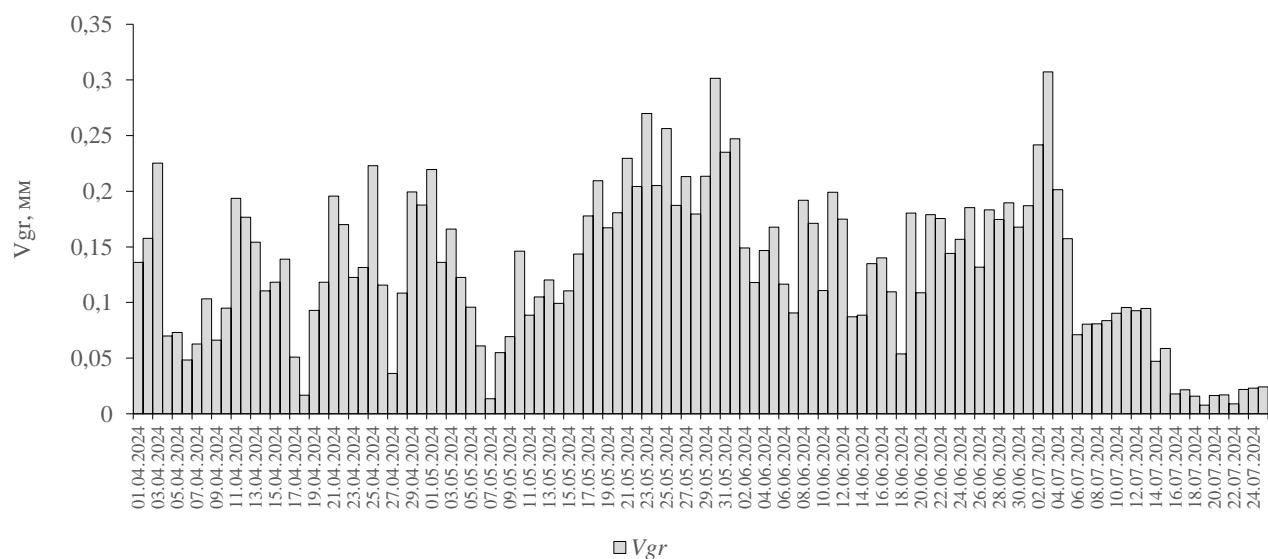


Рисунок 2 – Графики хода ежедневных сумм капиллярного подпитывания грунтовыми водами V_{gr}

Вегетационный индекс NDVI оценивался по спутниковым данным. Для исследования использовались растровые изображения в красном и ближнем

инфракрасном каналах орбитального съемочного оборудования Sentinel-2. По мнению авторов настоящего исследования, изображения этого семейства спутников наиболее предпочтительны для анализа, так как актуальные данные не нуждаются в существенной атмосферной коррекции при условии наличия безоблачных снимков и соотнесение результатов дешифрирования с метеорологической информацией. Вычисления индекса NDVI выполнялись с помощью инструмента анализа «Grid Calculator» геоинформационной системы Saga Gis. На рисунке 3 приведен хронологический график изменения величины индекса NDVI за вегетационный период *Triticum aestivum* L.

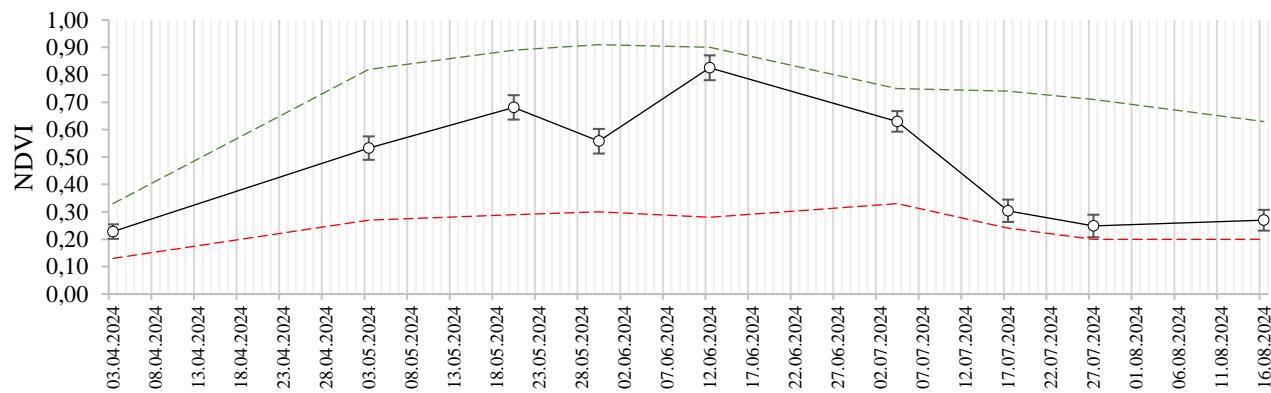


Рисунок 3 – Хронологический график изменения величины индекса NDVI за вегетационный период *Triticum aestivum* L.

Результаты и обсуждение

Анализ спутниковых данных и графика NDVI на рисунке 3, показывает, что математическое ожидание функции вегетационного индекса соответствует величине $0,83 \pm 0,05$ (стандартное отклонение 0,18, коэффициент вариации 0,23). График функции куполообразный, характерный для спектральных вегетационных индексов. Максимальное значение диаграммы рассеяния NDVI (не приводится в статье) в пик вегетации (на дату 12.06.2024 г.) находится на уровне 0,9, минимальное – 0,28. Приведенные данные подтверждают ранее принятое решение о коэффициенте использования ФАР $k = 3\%$. Культура развивалась по срокам, несмотря на возвратные заморозки в апреле и мае 2024 г., однако, уборка пришлась на неделю позже средних сроков для данной природно-хозяйственной зоны. Но

достижение NDVI уровня 0,9 позволяет сделать вывод о реализованном биологическом потенциале сорта «Тимирязевская 150».

Возможный урожай по приходу ФАР по методике А.А. Ничипоровича, приведенной к стандартной влажности, оценивается на уровне 72,79 ц/га. При уровне NDVI вблизи значений медианы и максимума 0,8...0,9 хозяйственное полезная урожайность может составить 60,41 ц/га.

Уровень продуктивной влаги W_p по уравнению водного баланса составил 244,97 мм. Сумма активных температур за период вегетации находится на уровне 1856 °С. Согласно ГОСТ Р 58331.3-2019 биоклиматический коэффициент водопотребления для озимых культур составляет для зоны расположения опытного участка $k_b = 0,7$.

Эвапотранспирация ЕТ за период вегетации культуры составляет 284,7 мм. Формула математической модели ФГБНУ ВНИИ «Радуга» для суммарного водопотребления E имеет следующий вид:

$$E = k_b k_0 ET,$$

где k_0 – коэффициент влияния орошения на микроклимат (принят равным 1, так как культура выращивалась в боярных условиях).

Для *Triticum aestivum* L. величина равна $E = 199,3$ мм. Тогда потенциально возможная урожайность культуры, исходя из условий влагообеспеченности территории, составит 122 ц/га, а с учетом NDVI по модели авторов настоящего исследования – 102,1 ц/га, для стандартной влажности 14% – 47,5 ц/га.

Выводы

Фактическая урожайность, полученная в хозяйстве, находится на уровне 59,1 ц/га. Ошибка прогноза урожайности по ФАР и NDVI находится в пределах 2,5%, а по уровню влагообеспеченности и NDVI – 19,7%.

Литература

1. Filippi P. et. al. On crop yield modelling, predicting, and forecasting and addressing the common issues in published studies. Precision Agriculture - Springer Link. 2025. Vol. 26, DOI: 10.1007/s11119-024-10212-2.

2. Predictive Models Based on Artificial Intelligence to Estimate Crop Yield // Agricultureю. 2025. Volume 15, 2438. DOI: 10.3390/agriculture15232438.

3. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe // Agricultural Systems. 2019. Volume 168, Pages 191-202.

4. Эффективность возделывания сорговых культур в условиях центральной зоны Республики Калмыкия // Экология и строительство. 2025. No 1. С. 28–34.

5. Определение оптимальных гидротермических условий произрастания пшеницы мягкой яровой в засушливой степи Алтайского края // Экология и строительство. 2025. No 3. С. 12–22.

6. Enhancing crop yield forecasting performance through integration of process-based crop model and remote sensing data assimilation techniques / Agricultural and Forest Meteorology. 2025. Volume 372, 110696. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110696.

7. Программирование продуктивности полевых культур: Справочник. М.: Росагропромиздат, 1989. 368 с.

8. Планирование водопользования при орошении сельскохозяйственных культур: инстр.-метод, изд. / под ред. Г.В. Ольгаренко. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014.172 с.

9. ГОСТ Р 58331.3-2019. Системы и сооружения мелиоративные. Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур. Общие требования [Электронный ресурс]. URL: <https://vniiraduga.ru/wp-content/uploads/2019/03/GOST-R-583312-2019.pdf> (Дата обращения 12.12.2025 г.).

References

1. Filippi P. et. al. On crop yield modelling, predicting, and forecasting and addressing the common issues in published studies. Precision Agriculture - Springer Link. 2025. Vol. 26, DOI: 10.1007/s11119-024-10212-2.

2. Predictive Models Based on Artificial Intelligence to Estimate Crop Yield // Agricultureyu. 2025. Volume 15, 2438. DOI: 10.3390/agriculture15232438.

3. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe // Agricultural Systems. 2019. Volume 168, Pages 191-202.

4. Effektivnost' vozdelyvaniya sorgovykh kul'tur v usloviyakh tsentral'noi zony Respubliki Kalmykiya // Ekologiya i stroitel'stvo. 2025. No 1. C. 28–34.
5. Opredelenie optimal'nykh gidrotermicheskikh uslovii proizrastaniya pshenitsy myagkoi yarovoi v zasushlivoi stepi Altaiskogo kraya // Ekologiya i stroitel'stvo. 2025. No 3. C. 12–22.
6. Enhancing crop yield forecasting performance through integration of process-based crop model and remote sensing data assimilation techniques / Agricultural and Forest Meteorology. 2025. Volume 372, 110696. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110696.
7. Programmirovaniye produktivnosti polevykh kul'tur: Spravochnik. M.: Rosagropromizdat, 1989. 368 s.
8. Planirovaniye vodopol'zovaniya pri oroshenii sel'skokhozyaistvennykh kul'tur: instr.-metod, izd. / pod red. G.V. Ol'garenko. M.: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2014. 172 s.
9. GOST R 58331.3-2019. Sistemy i sooruzheniya meliorativnye. Vodopotrebnost' dlya orosheniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. Obshchie trebovaniya [Elektronnyi resurs]. URL: <https://vniiraduga.ru/wp-content/uploads/2019/03/GOST-R-583312-2019.pdf> (Data obrashcheniya 12.12.2025 g.).

© Зверьков М.С., Смелова С.С. 2025. International agricultural journal, 2025, № 6, 500-510.

Для цитирования: Зверьков М.С., Смелова С.С. ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ NDVI И ЛИМИТУ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ // International agricultural journal. 2025. № 6, 500-510.