

Научная статья

Original article

УДК 633.11:528.8

doi: 10.55186/2413046X_2024_9_12_455

**АНАЛИЗ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА
NDVI ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО
МОНИТОРИНГА LANDSAT 8 И В УСЛОВИЯХ «IN SITU»
ANALYSIS OF THE SEASONAL DYNAMICS OF THE VEGETATION
INDEX NDVI OF WINTER WHEAT BASED ON LANDSAT 8 SATELLITE
MONITORING DATA AND «IN SITU» CONDITIONS**



Зверьков Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна, E-mail: rad_sc@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>

Смелова Светлана Станиславовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна; доцент, Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета, Коломна, 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», Kolomna, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8348-4391>, rad_sc@bk.ru

Smelova Svetlana Stanislavovna, candidate of biological sciences, senior researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific

Research Institute «Raduga», Kolomna; associate professor, Kolomna Institute (branch) Moscow Polytechnic University, Kolomna, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1717-0026>

Аннотация. В статье отмечается, что в условиях цифровизации мелиоративного земледелия остро стоит задача получения актуальных достоверных исходных данных о состоянии сельскохозяйственных культур в целях прогноза урожайности и оценки эффективности мероприятий. Описываются трудности, возникающие при оперативном установлении сроков наступления фенологических фаз и соответствующих значений NDVI той стадии развития культуры, при которой наблюдаются наиболее благоприятные условия для формирования урожая. Цель настоящего исследования заключалась в анализе результатов оценки значений вегетационного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования Земли и наземного мониторинга в условиях *in situ* для посевов озимой пшеницы. Выявлены общие закономерности динамики значений NDVI для озимой пшеницы, полученных по данным спутникового мониторинга Landsat 8 и в условиях *in situ*. Минимальные значения во всех случаях регистрировались для голой почвы и всходов. Установлено, что NDVI постепенно растет и максимальных значений достигает в фазу колошения и цветения (0,43 для выборки >5%, 0,35 – для Landsat 8 и *in situ*). Полученные результаты могут быть использованы для прогноза урожайности озимой пшеницы.

Abstract. It is noted that in the context of digitalization of reclamation agriculture, the task of obtaining up-to-date reliable initial data on the state of crops in order to predict yields and assess the effectiveness of measures is acute. At the same time, difficulties arise in the prompt establishment of the timing of the onset of phenological phases and the corresponding NDVI values of the stage of culture development at which the most favorable conditions for the formation of yields are observed. The objective of this study was to analyze the results of assessment of

NDVI vegetation index values from remote sensing Earth and *in situ* ground monitoring for winter wheat crops. General patterns of dynamics of NDVI values for winter wheat obtained from Landsat 8 satellite monitoring data and *in situ* conditions were revealed. Minimum values in all cases were recorded for bare soil and seedlings. Then NDVI gradually grows and reaches its maximum values in the phase of ringing and flowering (0.43 for the sample > 5%, 0.35 for Landsat 8 and *in situ*). The obtained values can be used to predict winter wheat yield.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, вегетационный индекс, озимая пшеница, мониторинг, NDVI, Landsat 8

Keywords: remote sensing, vegetation index, winter wheat, monitoring, NDVI, Landsat 8

Введение. В условиях цифровизации мелиоративного земледелия остро стоит задача получения актуальных достоверных исходных данных о состоянии сельскохозяйственных культур.

При решении поставленной научно-практической задачи возникают две основные трудности. Во-первых, это сроки наступления фенологических фаз развития сельскохозяйственной культуры. Анализируя смены фенологических фаз у разных сортов озимой пшеницы, необходимо иметь в виду, что в первую очередь продолжительность межфазных периодов развития определяют климатические условия – температура и влажность. Другими немаловажными факторами являются генетическая особенность сорта и агротехника возделывания культуры. Так, например, согласно международной фенологической шкале Задокса [1], онтогенез озимой пшеницы составляет 93 дня (см. рисунок 1). Исследователи [2] отмечают, что продолжительность вегетационного периода озимой пшеницы зависит от генотипа (сорта) на 56,1%, в то время как агрометеорологические условия года влияют на 4,4%, а совместное воздействие двух этих факторов составляет 36,5%.

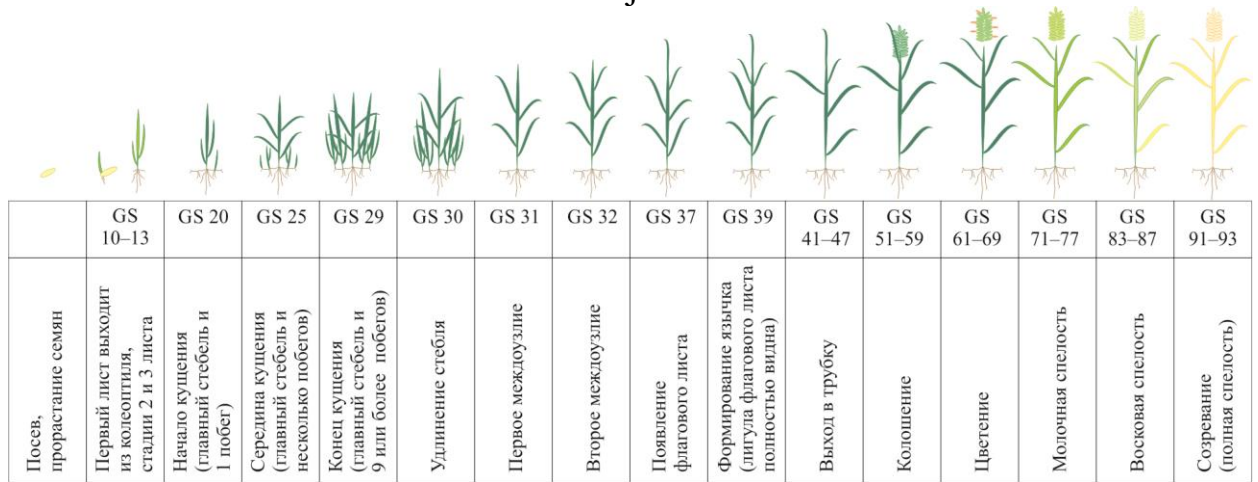


Рисунок 1 – Фенологические стадии развития озимой пшеницы по международной фенологической шкале Zadoks J.C. (рисунок с дополнениями авторов статьи, цифры обозначены примерные сроки в днях)

Опираясь на результаты опытов выращивания озимой пшеницы на серых лесных почвах лесостепной зоны Иркутской области (1993–1998 гг.) из работы [3], на среднекислых дерново-подзолистых суглинистых почвах Московской области (2020–2022 гг.) из [4], а также на черноземных почвах лесостепной зоны Воронежской области (2005–2010 гг.) из [5], можно сделать следующие выводы. В нечерноземной зоне до выхода в трубку продолжительность вегетации составляет 50 дней (самый минимальный срок – 42 дня, самый максимальный – 57), в то время как в черноземной зоне – около 28 дней. От выхода в трубку до колошения в нечерноземной зоне проходит в среднем 25 дней (самый минимальный срок – 21 дня, самый максимальный – 29), в черноземной – 17 суток. От колошения до наступления восковой спелости в нечерноземной зоне по литературным данным проходит около 29 дней (самый минимальный срок – 24 дня, самый максимальный – 34), в черноземной – 45 дней. Длительность весенне-летнего периода вегетации от ее возобновления до восковой спелости озимой пшеницы длится от 97 до 108 дней и в среднем составляет 105 дней, а в черноземной зоне – около 90 суток.

Во-вторых, это трудность определения соответствия значений NDVI той фенологической стадии развития культуры, при которой наблюдаются

наиболее благоприятные условия для формирования урожая.[6]. По данным авторов [7] примерно половину реализуемого урожая обеспечивает технология возделывания пшеницы, вторую половину – ее генотип, а их сочетание – обеспечивает прирост сборов качественного зерна.

Максимально достижимый диапазон значений NDVI для различных культур обычно находится в пределах от 0,1 до 0,8 [8]. Согласно исследованиям [9] значения NDVI увеличивались до начала налива зерна (в стадии колошения), при этом наибольшее значение NDVI было зарегистрировано на стадии молочной спелости, после чего снижалось до стадии физиологической зрелости. Максимальное значение NDVI для орошаемой пшеницы составило 0,82, для неорошаемой – 0,78. Аналогичные выводы делают исследователи в работах [10, 11, 12] с максимальными значениями NDVI (0,8...0,88) в начале фазы колошения.

При этом некоторые авторы отмечают, что орошаемые и неорошаемые культуры имеет существенные различия в значениях NDVI (даже для одного типа культуры и той же схемы выращивания) [8, 13]

В тоже время есть исследования [14, 15], согласно которым в стадии начала налива зерна индекс NDVI снижается до 0,3, поскольку культура испытывает стресс и ее способность поглощать фотосинтетически активную радиацию снижается. В отдельных источниках [16, 17] указывается, что NDVI постепенно возрастает по фазам развития до налива зерна, а затем снижается к фазе полной спелости.

Пиковые величины NDVI некоторые авторы рекомендуют использовать для прогнозирования урожайности [18]. В фазу полной спелости диапазон значений вегетационного индекса озимой пшеницы сорта «Московская 39» в условиях Новгородской области в 2022–2023 гг. составил по опытным участкам от 0,18 до 0,35 (среднее значение 0,26) при урожайности от 16 до 21,6 ц/га. А в работе [19] отмечается линейная зависимость увеличения

урожайности пшеницы от 57,12 до 87,36 ц/га¹ с ростом пиковых значений NDVI от 0,33 до 0,73.

По данным [10] в условиях Орловской области максимальное среднемноголетнее значение вегетационного индекса для пшеницы составляет 0,72, причем максимальные NDVI регистрировались в период с мая по июнь. Можно отметить, что примерно на конец этого периода приходится фаза колошения.

По данным [20] для пшеницы значения NDVI в условиях Фейсалабада (Пакистан) по разным фазам развития были следующие: кущение – 0,32...0,43, удлинения стебля – 0,53...0,70, выход в трубку – 0,55...0,74, цветение 0,74...0,85, колошение и налив зерна – 0,78...0,88, физиологическая зрелость – 0,40...0,65.

В дополнении к вышеперечисленному необходимо отметить, что данные мультиспектральной съемки в мелиоративном земледелии позволяют осуществить следующие виды работ: планировать и осуществлять на практике цифровизацию отрасли мелиорации [21]; выполнять оценку соблюдения технологической карты на возделывание культур; определять площади насаждений, подверженных болезням или вредителям для предотвращения их дальнейшего распространения [22]; осуществлять плановый и оперативный мониторинг состояния мелиоративных систем [23, 24] и сельскохозяйственных культур; на ранних этапах вегетации сельскохозяйственных культур выявлять очаги сорной растительности для разработки программы применения гербицидов или иных агротехнических мероприятий [25] и др. В некоторых работах также отмечается, что диапазон значений вегетационного индекса NDVI зависит от разрешающей способности съемочной аппаратуры и типа спутников [26].

Цель настоящего исследования заключалась в анализе результатов оценки значений вегетационного индекса NDVI по данным дистанционного

¹ Указаны значения, пересчитанные из бушелей на акр в центнеры на га.

зондирования Земли и наземного мониторинга в условиях *in situ* для посевов озимой пшеницы.

Научно-практическая значимость результатов исследования заключается в том, что для условий Московской области получен ряд значений NDVI для фенологических фаз озимой пшеницы с пиковым значением для использования в прогнозах урожайности культуры.

Материалы и методы исследования. Картографирование участка гидромелиоративной системы выполнено в среде программы QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze»). Исходная система координат – WGS 84 (Pseudo-Mercator, EPSG:3857) выбрана вследствие наилучшего совпадения спутниковых снимков семейства «Landsat/Copernicus» с исходными подложками используемых геоинформационных программных комплексов.

Обследованный участок оросительной системы на землях АО «Северка» расположен на территории Коломенского городского округа Московской области вблизи с. Шкинъ. В сезоне 2024 года на участке в соответствии со схемой севооборота выращивали озимую пшеницу *Triticum aestivum L.* сорта «Тимирязевская 150» (репродукция «ЭС», производитель ООО «Щелково агрохим») без орошения. Расход семян составил 270 кг/га. Глубина заделки семян составила 4 см, ширина междурядий – 15 см. Начало сева пришлось на 21.09.2024 г., конец – 22.09.2024 г., уборка состоялась в период 26.07–15.08.2024 г. Урожайность озимой пшеницы 59,1 ц/га. Весной вносили аммиачную селитру 34% (ФосАгро) в норме 150 кг/га. На участке в поперечном направлении отмечается устойчивая зона эрозии, которая фиксируется на спутниковых снимках в разные даты наблюдений (примеры на рисунке 2А). В период от восковой спелости до зрелости эродированный участок визуально отличается от посевов ярким зеленым цветом из-за практически сплошной засоренности ежовником обыкновенным *Echinochloa crus-galli (L.) Beauv.* (рисунок 2Б).

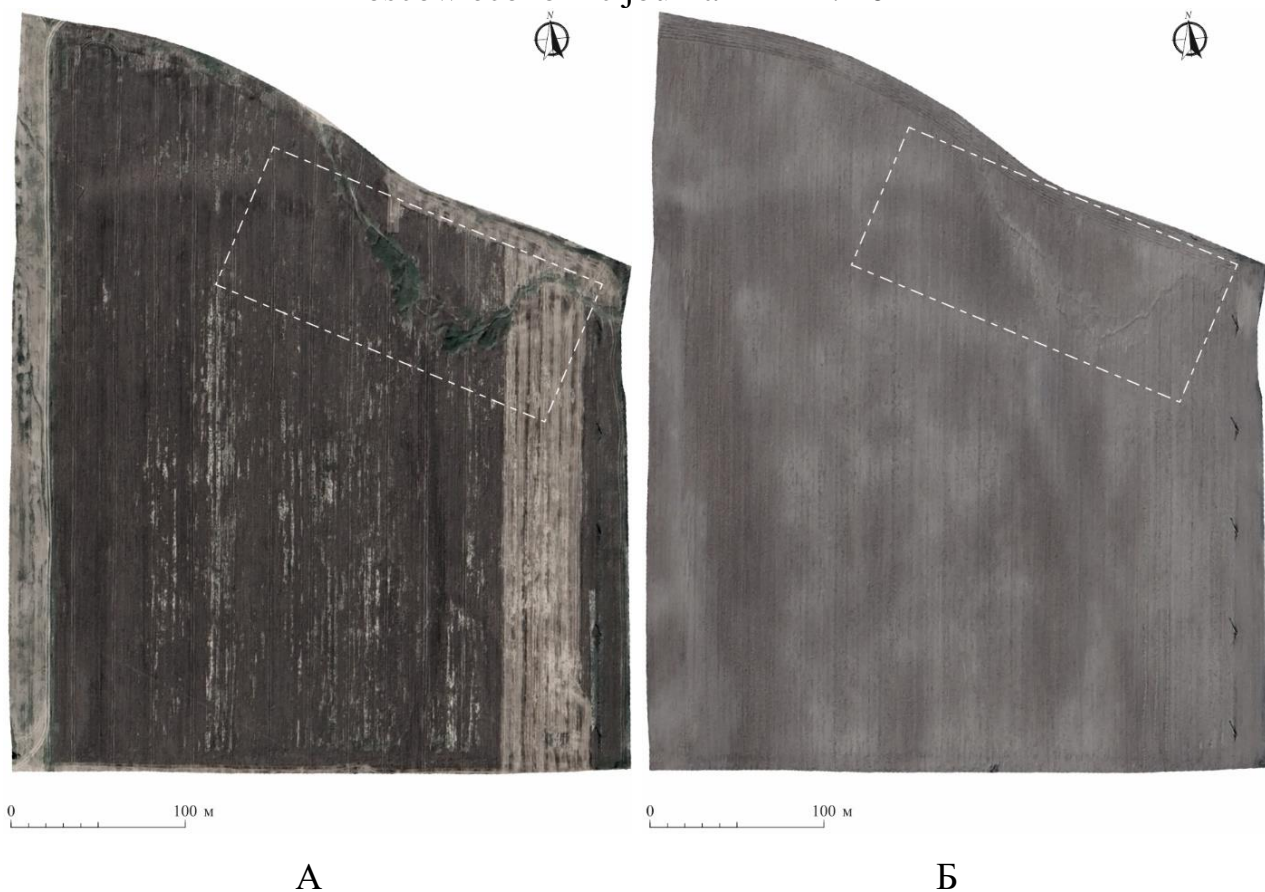


Рисунок 2 – Эродированный участок по данным снимков «true color» космических спутников семейства Landsat (А – 27.07.2024 г., Б – 29.08.2024 г., контуром показан эродированный участок) и засоренность ежовником обыкновенным *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (В, июль 2024 г.)

Для спектрального анализа выбраны безоблачные периоды 2023 г. (03.10) и 2024 г. (01.04, 10.04, 03.05, 20.05, 28.05, 06.06, 28.06, 07.07, 23.07, 16.08).
Использованы снимки спутника Landsat 8 (NASA / the United States

Geological Survey) в спектральных каналах B5 (NIR – ближний инфракрасный диапазон длин волн, 865 нм) и B4 (Red – видимое излучение, красная зона, 665 нм) за указанные даты. По этим данным с помощью инструмента «Растровый калькулятор» в среде программы QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze») вычислялись спектральные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель отражения и поглощения растениями солнечной радиации, который позволяет выявлять проблемные участки поля. Например, аномально высокие значения вероятнее всего свидетельствуют о сорной растительности, слишком низкие – о возможном повреждении растений вредителями или заболеваниях культур. Также индекс NDVI может помочь в выявлении участков поля с низким почвенным плодородием, например, в результате эрозии или других деграционных процессов. Формула расчета индекса следующая:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Векторизация итоговых растров выполнена в среде программы SAGA GIS 9.3.1. Использованы инструменты «Multilevel B-Spline» с последующей векторизацией полученной сетки «Grid System». В результате получен векторный слой с типом геометрии «полигон». Данные расчетов импортировались в программу QGIS (ver. 3.28.1 «Firenze»). Значения NDVI группировались по диапазонам спектра, частоте и удельному весу (в %) зоны спектра. Примеры векторных слоев NDVI приведены на рисунке 3. В условиях *in situ* с помощью мультиспектральной камеры MAPIR Survey3 в отдельные фенологические фазы развития культуры осуществлялся мониторинг состояния посевов. Снимки обрабатывались в поставляемом с камерой программном обеспечении, в котором вычислялись значения NDVI (рисунок 4).

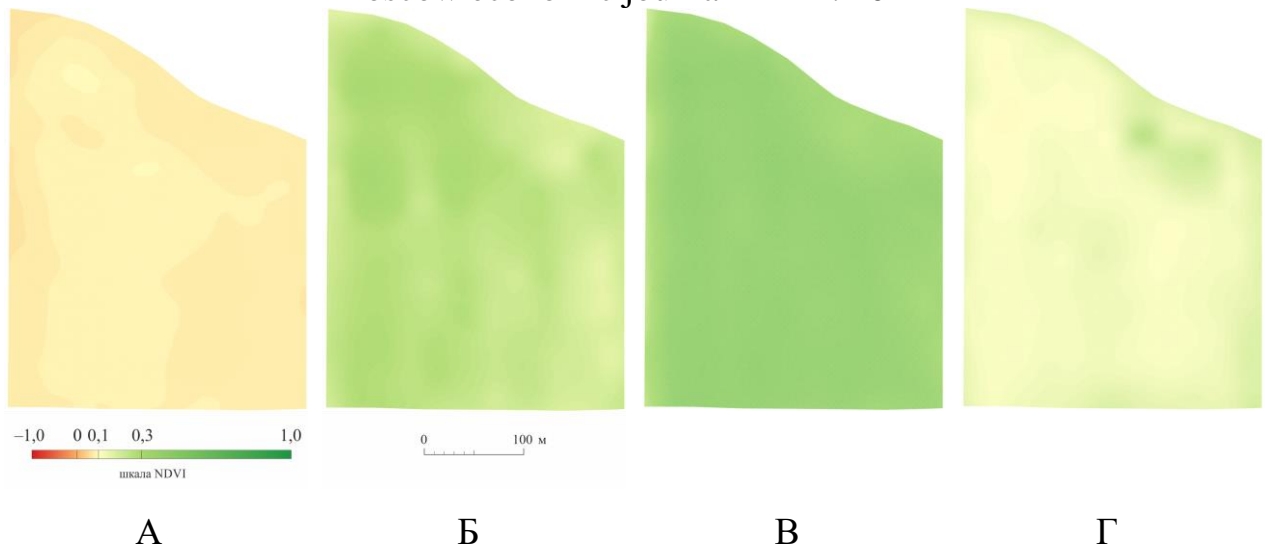


Рисунок 3 – Примеры полученных векторных слоев NDVI: А – 02.04.2024 г., после схода снега; Б – 04.05.2024 г., фазы удлинения стебля и формирования междоузлий; В – 12.06.2024 г., фазы колошения и цветения (максимальные значения NDVI за вегетацию); Г – 23.07.2024 г., фаза физической спелости (зеленые паттерны – сорная растительность)

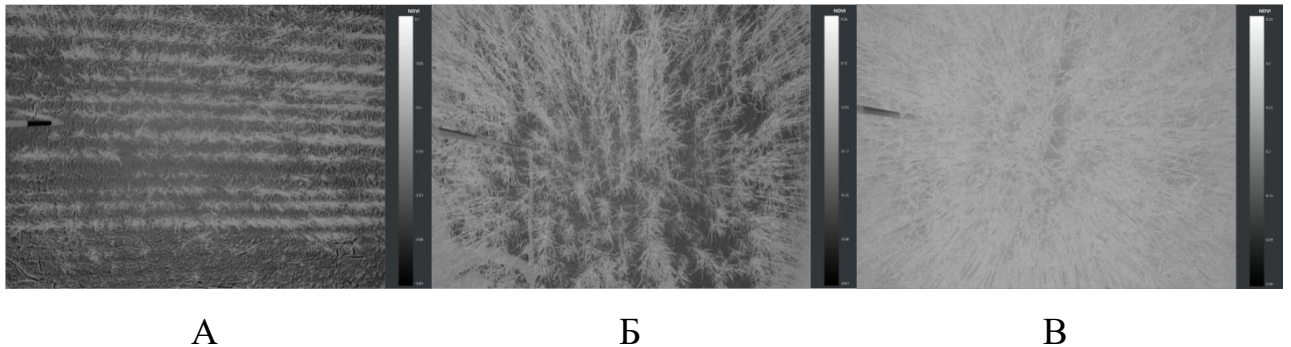


Рисунок 4 – Снимки NDVI в одноканальном сером цветовом режиме, полученные по результатам съемки *in situ*: А – всходы, Б – кущение, В – колошение, цветение

Для всех диапазонов вегетационных индексов вычислены данные зональной статистики (медиана *median*, минимальные *min* и максимальные *max* значения). Уровень статистической значимости принят 0,05, рассчитывалось стандартное отклонение *s* и доверительный интервал медианы. Обработка данных и графическое оформление результатов исследования также выполнены в электронных таблицах Microsoft Office Excel (ver. 16.10 Build 180124 (2018)).

В качестве дополнительной информации использовались температурные данные расположенной в границах мелиоративной системы метеорологической станции.

К методике проведения исследования необходимо добавить, что полученные в результате исследования данные могут иметь различия с данными, полученными в результате обработки других космических спутников. Например, разрешающая способность и интервал повторения спутников семейства Sentinel-2 Европейского космического агентства отличаются от снимков Landsat-9. Эту особенность, в частности, необходимо иметь ввиду при сравнении данных по динамике NDVI, полученных разными авторами, в разных условиях и при фактическом отсутствии унифицированных подходов в методиках подобных исследований.

Результаты исследований и их обсуждение. Вегетационный период 2024 года начался рано, уже в первой декаде апреля среднесуточная температура воздуха была выше 5°C , а в отдельные дни, как, например, 6 апреля, – около 0°C (рисунок 5). Начиная со второй декады апреля и до конца месяца, среднесуточная температура воздуха составляла примерно $10,5^{\circ}\text{C}$. Однако, до середины второй декады мая среднесуточная температура составила $6,0^{\circ}\text{C}$ с нижней амплитудой в сторону отрицательных значений в ночные часы. Такие метеорологические условия вызвали задержку наступления фенологических фаз и уборку примерно на 10–15 суток.

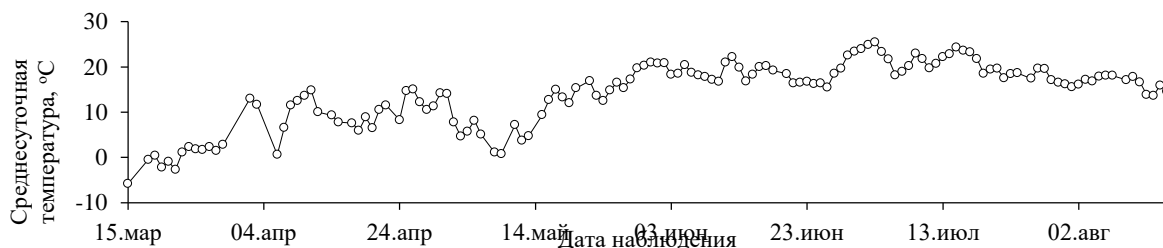


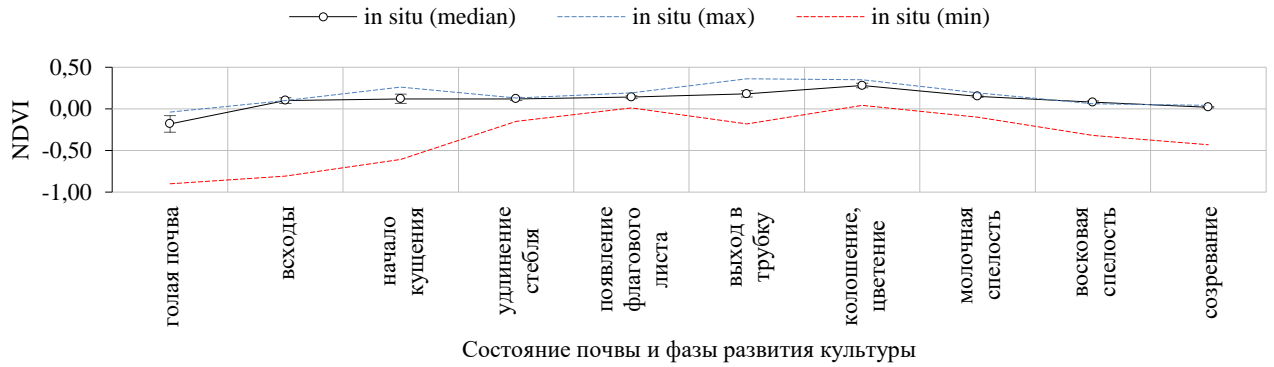
Рисунок 5 – График среднесуточных температур воздуха по данным метеостанции АО «Северка»

Медианные значения NDVI (рисунок 6А), определенные *in situ*, находятся в сравнительно узком диапазоне $-0,18...+0,28$ (стандартное отклонение $s =$

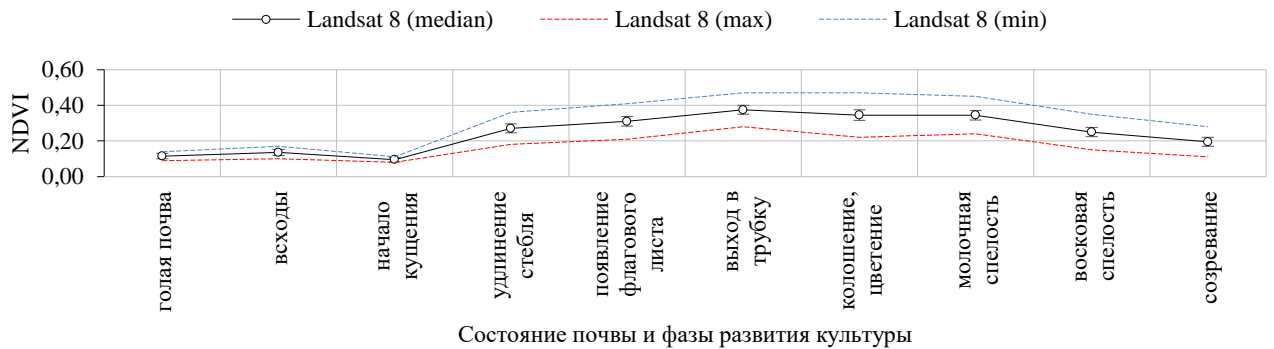
0,01...0,11), хотя общий диапазон значений очень широкий и находится в пределах от $-0,9$ до $+0,36$. Это объясняется тем, что съемка велась на близком расстоянии от растений и поверхности почвы (1,5...2 м). Из-за этого в фокус объектива попадала широкая полоса спектра. В результате на итоговых мультиспектральных снимках и в постобработке NDVI возникали различные артефакты из-за разной отражательной способности поверхностей (растения, почва). Необходимо также отметить несовершенство стандартного программного обеспечения для обработки снимков и фактически невозможность анализировать все значения NDVI на итоговом изображении. Вопрос обработки таких изображений требует дополнительных изысканий и не является предметом настоящего исследования.

Медианные значения NDVI (рисунок 6Б), рассчитанные по данным спутника Landsat 8 для полной совокупности данных, находятся в пределах от 0,10 до 0,38 (стандартное отклонение $s = 0,02...0,08$). В тоже время максимальные значения достигают 0,47, а минимальные – 0,08. Высокие значения могут быть объяснены тем, что посевы озимой пшеницы на участке умеренно засоренные. Так, например, на эродированном участке рос ежовник обыкновенный *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (рисунок 3В), растения которого даже в фазу физической спелости озимой пшеницы (NDVI 0,11...0,15) давали значения NDVI 0,2...0,27 (рисунок 3Г).

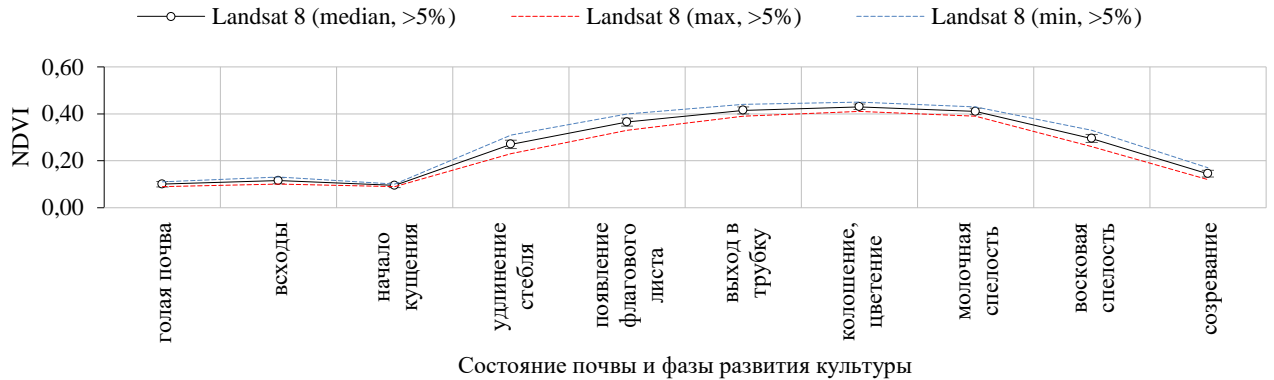
Более подробный анализ данных при статистической группировке выборок по диапазонам значений NDVI показывает, что распределение индексов неравномерно. При этом максимальные и минимальные граничные значения группировок в диапазонах чаще всего имеют удельный вес менее 5%. Причиной такой дифференциации может быть, с одной стороны, достаточно хорошее развитие отдельных групп растений пшеницы озимой или ее засоренность сегетальной растительностью (на поздних стадиях развития значения NDVI нивелируются). В результате на карте значений NDVI появляются паттерны с соответствующей окраской.



А



Б



В

Рисунок 6 – График медианных значений NDVI с доверительным интервалом (планки погрешности), полученных *in situ* (А), рассчитанных по данным спутника Landsat 8 (Б, полная совокупность данных) и выборка данных с удельным весом >5% (В)

С другой стороны, разрешающая способность съемочной аппаратуры Landsat 8 составляет 30 м, что достаточно много, в результате чего могут возникать искажения данных. Нельзя также не учитывать тот факт, что на значения NDVI могут влиять естественные или искусственные осадки

(полив), выпавшие накануне съемки, о чем в научной литературе также отмечено разными исследователями. В [27] исследователи отмечают, что недостатком NDVI также является его умеренная чувствительность к изменениям почвенного и атмосферного фона, он может быть мало информативен на участках со слабым развитием растений и на незанятых растительностью участках почвы.

Учитывая вышеизложенное, авторы настоящего исследования изучили выборку значений NDVI, удельный вес которых превышает 5% (рисунок 6В). Медианные значения находятся в диапазоне от 0,10 до 0,43 ($s = 0,01 \dots 0,03$), в то же время во всей выборке максимальные значения равны 0,45, а минимальные – 0,09.

Несмотря на существенные различия значений NDVI в описанных выборках, можно выделить общие закономерности. Минимальные значения во всех случаях регистрировались для голой почвы и всходов. Затем NDVI постепенно растет и максимальных значений достигает в фазу колошения и цветения (0,43 для выборки >5%, 0,35 – для Landsat 8 и *in situ*). В то же время для полной совокупности данных Landsat 8 пик медианных значений установлен в фазу выхода в трубку, хотя в фазы колошения, цветения и молочной спелости NDVI составил 0,35. Для фаз выхода в трубку и молочной спелости значения NDVI соответственно составили 0,42 и 0,41 (в выборке >5%) и 0,18 и 0,15 (*in situ*). В целом такой характер распределения пиковых значений NDVI согласуется с данными других исследователей, в частности [9, 10, 20] и др.

Сравнения полученные в настоящем исследовании более низкие значения NDVI с результатами других работ, необходимо отметить, что в данном случае это может быть объяснено тем, что в фазе возобновления вегетации культура получила стресс из-за частого колебания температур и ночных заморозков. С другой стороны, озимая пшеница в сезоне 2024 года выращивалась без орошения. Осадки в течение вегетации выпадали

неравномерно, а в фазу колошения и цветения были затяжные дожди с количеством осадков от 6,5 до 14 мм, а в отдельные дни до 54 мм (13.06.2024 г.).

Выводы. Несмотря на существенные различия значений NDVI для озимой пшеницы, полученных по данным спутникового мониторинга Landsat 8 и в условиях «*in situ*», выявлены общие закономерности. Минимальные значения во всех случаях регистрировались для голой почвы и всходов. Затем NDVI постепенно растет и максимальных значений достигает в фазу колошения и цветения (0,43 для выборки >5%, 0,35 – для Landsat 8 и *in situ*). Полученные значения могут быть использованы для прогноза урожайности озимой пшеницы.

Список источников

1. Zadoks, J.C., Chang, T.T. and Konzak, C.F. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals // Weed Research, 1974. Vol. 14. P. 415-421. DOI: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x.
2. Сортовая дифференциация озимой мягкой пшеницы по группам спелости в лесостепи Среднего Поволжья / Н.Н. Захарова, Н.Г. Захаров // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 2(50). С. 91-97. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-2-91-97. EDN ERKOEN.
3. Колесниченко В.Т. Озимая пшеница Заларинка в Иркутской области (результаты полевых опытов). М.: Промэкобезопасность, 2003. 306 с.
4. Агроэкологическая оценка эффективности фосфогипса в звене севооборота с озимой и яровой пшеницей / Холомьева Л.Н. // дис... канд с.-х. наук. М.: ФГБНУ ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2024. 169 с.
5. Подлесных Н.В. Особенности прохождения этапов онтогенеза, фаз роста и развития, урожайность и качество озимой твердой и мягкой пшеницы в условиях лесостепи Воронежской области // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 3 (46). С. 11–22.

6. Анализ состояния орошаемых культур по данным дистанционного зондирования Земли с использованием спектрального индекса NDVI / Зверьков М.С., Смелова С.С. // Экология и строительство. 2024. № 1.
7. Азотная подкормка современных интенсивных сортов озимой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья / Сандухадзе Б.И., Журавлева Е.В. // Питание растений. 2012. № 2. С. 2–6.
8. Ambika A.K., Wardlow B., Mishra V. Remotely sensed high resolution irrigated area mapping in India for 2000 to 2015 // Sci Data. 2016. Vol. 3. P. 1–14. DOI: 10.1038/sdata.2016.118.
9. Mazengo, T.E.R., Guo, Z., Liu, X. et al. Effects of irrigation and rainfed practices on Normalized Difference Vegetative Index of Wheat (*Triticum aestivum* L.) and its Implications on Grain Yield in Northern China // Environ Syst Res. 2023. Vol. 12, 36. DOI: 10.1186/s40068-023-00303-w.
10. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур / С.А. Родимцев, Н.Е. Павловская, С.В. Вершинин [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 4(65). С. 56-67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67. EDN IRLXQG.
11. Коротков А.А., Астапов А.Ю. Вегетационный индекс NDVI для мониторинга растительности // Наука и образование. 2020. Т. 3, № 3. С. 131–140.
12. Пришуттов К.А., Астапов А.Ю., Рязанова Ю.А. Применение БПЛА для оценки качества растительности // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. мат. междунар. науч.-практ. конф. Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2018. С. 212–217.
13. 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.

14. Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency // *Remote Sensing of Environment*. 1992. Vol. 41, № 1. P. 35–44. DOI: 2-s2.0-0026451960.
15. Gamon J.A., Serrano L., and Surfus J. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels // *Oecologia*. 1997. Vol. 112, №. 4. P. 492–501. DOI: 10.1007/s004420050337.
16. Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions / Royo C., Aparicio N., Villegas D., Casadesus J., Monneveux P., Araus J. L. // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol 24, № 22. P. 4403–4419. DOI: 10.1080/0143116031000150059.
17. Spectral reflectance to estimate genetic variation for in-season biomass, leaf chlorophyll, and canopy temperature in wheat / Babar M.A., Reynolds M.P., van Ginkel M., Klatt A.R., Raun W.R., Stone M.L. // *Crop Science*. 2006. Vol. 46, № 3. P. 1046–1057. DOI: 10.2135/cropsci2005.0211.
18. Абдушаева Я. М. Оценка продукционного процесса растений озимой пшеницы по вегетационному индексу // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. № 2(119). С. 18-29. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-18-29.
19. Estimating Wheat Yield with Normalized Difference Vegetation Index and Fractional Green Canopy Cover / Goodwin, A.W., Lindsey, L.E., Harrison, S.K. Paul, P.A. // *Crop, Forage & Turfgrass Management*. 2018. Vol. 4. P. 1-6. 180026. DOI: 10.2134/cftm2018.04.0026.
20. 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. // *Sci World J*. 2014 : 725326. DOI: 10.1155/2014/725326.
21. Маркерные участки цифровой мелиорации сельскохозяйственных земель / А.Е. Касьянов // *Экология и строительство*. 2020. № 3. С. 21-24. DOI 10.35688/2413-8452-2020-03-003. EDN KNFJIZ.

22. Применение аэрофотосъемки с применением мультиспектральной камеры в комплексе с нейросетью в сельском хозяйстве / А.С. Сыч, В. Балык, А.И. Поляков, А.В. Карталов // Chronos. 2019. № 9(36). С. 26-28. EDN CYELPR.
23. Оценка коэффициента земельного использования методами дистанционного зондирования на мелиоративной системе Московской области / Брыль С.В., Беденко А.Е. // Экология и строительство. 2024. № 1.
24. Анализ мелиоративного состояния оросительных систем Саратовской области / Мазурова И.С. // Экология и строительство. 2024. № 2.
25. Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images / Peña J.M., Torres-Sánchez J., de Castro A.I., Kelly M., López-Granados F. // PLoS ONE. 2013. Vol. 8(10) : e77151. DOI: 10.1371/journal.pone.0077151.
26. Чикалова Л.С. Эрозия почвы как фактор, оказывающий влияние на урожайность продукции сельского хозяйства // Экология и строительство. 2023. № 3.
27. Сравнительная характеристика различных вегетационных индексов при оценке состояния растительного покрова кормовых трав / А.А. Комаров, А.Д. Кирсанов, С.Н. Малашин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 2(63). С. 18-29. DOI 10.24412/2078-1318-2021-2-18-29. EDN LUKMNC.

References

1. Zadoks, J.C., Chang, T.T. and Konzak, C.F. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals // Weed Research, 1974. Vol. 14. P. 415-421. DOI: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x.
2. Sortovaya differenciaciya ozimoj myagkoj pshenicy po gruppam spelosti v lesostepi Srednego Povolzh'ya / N.N. Zaharova, N.G. Zaharov // Vestnik Ul'yanovskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. 2020. № 2(50). S. 91-97. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-2-91-97. EDN ERKOEN.
3. Kolesnichenko V.T. Ozimaya pshenica Zalarinka v Irkutskoj oblasti (rezul'taty polevyh opytov). M.: Promekobezopasnost', 2003. 306 s.

4. Agroekologicheskaya ocenka effektivnosti fosfogipsa v zvene sevooborota s ozimoy i yarovoj pshenicej / Holom'eva L.N. // dis... kand s.-h. nauk. M.: FGBNU VNII agrohimii im. D.N. Pryanishnikova, 2024. 169 s.
5. Podlesnyh N.V. Osobennosti prohozhdeniya etapov ontogeneza, faz rosta i razvitiya, urozhajnost' i kachestvo ozimoy tverdoj i myagkoj pshenicy v usloviyah lesostepi Voronezhskoj oblasti // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. № 3 (46). S. 11–22.
6. Analiz sostoyaniya oroshaemyh kul'tur po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli s ispol'zovaniem spektral'nogo indeksa NDVI / Zver'kov M.S., Smelova S.S. // Ekologiya i stroitel'stvo. 2024. № 1.
7. Azotnaya podkormka sovremennyh intensivnyh sortov ozimoy pshenicy v usloviyah Central'nogo Nechernozem'ya / Sanduhadze B.I., ZHuravleva E.V. // Pitanie rastenij. 2012. № 2. S. 2–6.
8. Ambika A.K., Wardlow B., Mishra V. Remotely sensed high resolution irrigated area mapping in India for 2000 to 2015 // Sci Data. 2016. Vol. 3. P. 1–14. DOI: 10.1038/sdata.2016.118.
9. Mazengo, T.E.R., Guo, Z., Liu, X. et al. Effects of irrigation and rainfed practices on Normalized Difference Vegetative Index of Wheat (*Triticum aestivum* L.) and its Implications on Grain Yield in Northern China // Environ Syst Res. 2023. Vol. 12, 36. DOI: 10.1186/s40068-023-00303-w.
10. Ispol'zovanie vegetativnogo indeksa NDVI dlya prognoza urozhajnosti zernovyh kul'tur / S.A. Rodimcev, N.E. Pavlovskaya, S.V. Vershinin [i dr.] // Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet). 2022. № 4(65). S. 56-67. DOI: 10.31677/2072-6724-2022-65-4-56-67. EDN IRLXQG.
11. Korotkov A.A., Astapov A.YU. Vegetacionnyj indeks NDVI dlya monitoringa rastitel'nosti // Nauka i obrazovanie. 2020. T. 3, № 3. S. 131–140.
12. Prishutov K.A., Astapov A.YU., Ryazanova YU.A. Primenenie BPLA dlya ocenki kachestva rastitel'nosti // Inzhenernoe obespechenie innovacionnyh

teknologij v APK: sb. mat. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Michurinsk: Michurinskij GAU, 2018. S. 212–217.

13. 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.

14. Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency // Remote Sensing of Environment. 1992. Vol. 41, № 1. P. 35–44. DOI: 2-s2.0-0026451960.

15. Gamon J.A., Serrano L., and Surfus J. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels // Oecologia. 1997. Vol. 112, №. 4. P. 492–501. DOI: 10.1007/s004420050337.

16. Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions / Royo C., Aparicio N., Villegas D., Casadesus J., Monneveux P., Araus J. L. // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol 24, № 22. P. 4403–4419. DOI: 10.1080/0143116031000150059.

17. Spectral reflectance to estimate genetic variation for in-season biomass, leaf chlorophyll, and canopy temperature in wheat / Babar M.A., Reynolds M.P., van Ginkel M., Klatt A.R., Raun W.R., Stone M.L. // Crop Science. 2006. Vol. 46, № 3. P. 1046–1057. DOI: 10.2135/cropsci2005.0211.

18. Abdushaeva YA. M. Ocenka produkcionnogo processa rastenij ozimoj pshenicy po vegetacionnomu indeksu // AgroEkoInzheneriya. 2024. № 2(119). S. 18-29. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-18-29.

19. Estimating Wheat Yield with Normalized Difference Vegetation Index and Fractional Green Canopy Cover / Goodwin, A.W., Lindsey, L.E., Harrison, S.K. Paul, P.A. // Crop, Forage & Turfgrass Management. 2018. Vol. 4. P. 1-6. 180026. DOI: 10.2134/cftm2018.04.0026.

20. 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. // Sci World J. 2014 : 725326. DOI: 10.1155/2014/725326.
21. Markernye uchastki cifrovoj melioracii sel'skohozyajstvennyh zemel' / A.E. Kas'yanov // Ekologiya i stroitel'stvo. 2020. № 3. S. 21-24. DOI 10.35688/2413-8452-2020-03-003. EDN KNFJIZ.
22. Primenenie aerofotos"emki s primeneniem mul'tispektral'noj kamery v komplekse s nejroset'yu v sel'skom hozyajstve / A.S. Sych, V. Balyk, A.I. Polyakov, A.V. Kartalov // Chronos. 2019. № 9(36). S. 26-28. EDN CYELPR.
23. Ocenka koefficienta zemel'nogo ispol'zovaniya metodami distancionnogo zondirovaniya na meliorativnoj sisteme Moskovskoj oblasti / Bryl' S.V., Bedenko A.E. // Ekologiya i stroitel'stvo. 2024. № 1.
24. Analiz meliorativnogo sostoyaniya orositel'nyh sistem Saratovskoj oblasti / Mazurova I.S. // Ekologiya i stroitel'stvo. 2024. № 2.
25. Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images / Peña J.M., Torres-Sánchez J., de Castro A.I., Kelly M., López-Granados F. // PLoS ONE. 2013. Vol. 8(10) : e77151. DOI: 10.1371/journal.pone.0077151.
26. CHikalova L.S. Eroziya pochvy kak faktor, okazyvayushchij vliyanie na urozhajnost' produkcii sel'skogo hozyajstva // Ekologiya i stroitel'stvo. 2023. № 3.
27. Sravnitel'naya harakteristika razlichnyh vegetacionnyh indeksov pri ocenke sostoyaniya rastitel'nogo pokrova kormovyh trav / A.A. Komarov, A.D. Kirsanov, S.N. Malashin // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. № 2(63). S. 18-29. DOI 10.24412/2078-1318-2021-2-18-29. EDN LUKMNC.

© Зверьков М.С., Смелова С.С., 2024. Московский экономический журнал,
2024, № 12.