

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-3-167-183>

УДК 631.559:528.8:551.501.86:551.586

**Метод подекадной оценки
вклада агрометеорологических условий
в ожидаемую продуктивность озимых зерновых культур
на основе спутниковой и наземной информации**

А.Д. Клещенко, О.В. Савицкая

*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной
метеорологии, г. Обнинск, Россия
cxm-dir@obninsk.ru*

В статье представлен разработанный и апробированный метод подекадной диагностики вклада агрометеорологических факторов в продуктивность озимых зерновых культур, основанный на интегральном анализе спутниковых спектральных индексов и наземных метеорологических данных для территории Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного УГМС. В качестве спутниковой информации использованы данные радиометров MODIS (спутник Terra) и VIIRS (спутник SUOMI NPP), на основе которых рассчитывались вегетационные индексы NDVI, VCI и VCNI. Наземная информация включает декадные метеорологические и агрометеорологические показатели, отражающие температурно-влажностные условия. Созданные в рамках исследования алгоритм и программные модули позволяют в автоматизированном режиме отслеживать ежедекадные изменения агрометеорологических условий и количественно ранжировать факторы по их вкладу в формирование ожидаемой урожайности озимых зерновых культур, обеспечивая информационную основу для обоснованного планирования агротехнических мероприятий.

Ключевые слова: агрометеорологические условия, подекадный мониторинг, урожайность, метеорологическая информация, спутниковые индексы (NDVI, VCI, VCNI), MODIS, VIIRS

**Method for ten-day assessment
of the contribution of agrometeorological conditions
to expected winter grain crop productivity
based on satellite and ground-based information**

A.D. Kleshchenko, O.V. Savitskaya

*All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia
cxm-dir@obninsk.ru*

The paper presents a developed and tested method for 10-day assessment of the contribution of agrometeorological factors to winter grain crop productivity. The method is based on an integrated analysis of satellite spectral indices and ground-based meteorological data for the North Caucasus, Volga and Central Black Earth regions. Satellite data from MODIS (Terra satellite) and VIIRS (SUOMI NPP satellite) radiometers were used to calculate the NDVI, VCI, and VCNI vegetation indices. Ground-based information includes meteorological and agrometeorological indicators reflecting temperature and humidity conditions.

The algorithm and software modules developed within the study allow for automated tracking of 10-day changes in agrometeorological conditions and quantitative ranking of factors based on their contribution to the expected winter grain crop yield, providing an information basis for informed planning of agricultural measures.

Keywords: agrometeorological conditions, 10-day monitoring, crop yield, meteorological information, satellite indices (NDVI, VCI, VCNI), MODIS, VIIRS

Введение

Изменчивость агрометеорологических условий остается ключевым фактором риска для устойчивого земледелия в России. Частота и интенсивность засух [2, 8, 9], температурных аномалий, неравномерного распределения осадков существенно влияют на формирование урожайности зерновых культур, что требует разработки современных методов количественной оценки учета агрометеорологических условий при формировании и прогнозировании урожайности зерновых культур. При этом для учета пространственной неоднородности важно получать информацию о складывающихся условиях формирования урожайности не только на уровне субъектов, как это сейчас и происходит, но и для более мелких муниципальных образований. В последние годы в ФГБУ «ВНИИСХМ» ведутся исследования по разработке метода оценки средней районной урожайности колосовых зерновых культур на основе комплексирования спутниковой информации MODIS и данных наземных агрометеорологических наблюдений [1, 3]. Результаты исследований показали достаточно хорошую сходимость между фактическими и расчётными данными оценки средней районной урожайности озимой пшеницы для субъектов Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного УГМС [6]. Полученные результаты позволили приступить к решению следующей достаточно сложной, но важной задачи – подекадной количественной оценке влияния метеорологических факторов на ожидаемую урожайность озимых зерновых культур. Важно также оценить, какую долю вносят метеорологические факторы и спутниковые индексы при ежедекадных расчетах прогнозируемой урожайности озимых зерновых культур.

Целью настоящей работы является разработка и апробация подхода подекадной диагностики вклада агрометеорологических факторов в продуктивность озимых зерновых культур на примере озимой пшеницы на основе интегрального анализа спутниковых спектральных индексов (NDVI, VCI, VCNI) и метеорологических параметров для территории Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного УГМС.

Входная информация, методы её обработки, структурирования и хранения

В рамках настоящего исследования были использованы следующие виды информации: данные дистанционного зондирования Земли, сведения наземных наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета

и данные средней районной урожайности из официальной государственной статистики.

В исследовании были использованы спутниковые данные, полученные со спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Тегга, обеспечивающего пространственное разрешение 250 м. Также применялись данные с радиометра VIIRS спутника SUOMI NPP, обладающего разрешением в 375 метров.

Спутниковые данные MODIS доступны на спутниковом сервисе ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru>), разработанным Институтом космических исследований (ИКИ РАН) [5].

Спутниковые данные VIIRS преобразуются в цифровые композиты в ФГБУ «НИЦ «Планета» и затем раз в десять дней в течение вегетационного сезона передаются в ФГБУ «ВНИИСХМ». Композиты формируются на основе данных из четырёх спектральных каналов (табл. 1) и сохраняются в двоичном формате в файлах с расширением «bin».

Таблица 1. Каналы VIIRS с разрешением 375 м, используемые для формирования композитов

Table 1. VIIRS channels with 375 m resolution used to form composites

Канал	Диапазон спектра	Спектральный диапазон, мкм
I1	Видимый	0,60–0,68
I2	Ближний инфракрасный	0,85–0,88
I4	Средний инфракрасный	3,55–3,93
I5	Длинноволновый инфракрасный	10,50–12,40

Для очистки композитов от облачности применялись данные из первого спектрального канала, который наиболее чувствителен к наличию облачного покрова (табл. 1). По данным MODIS и VIIRS были получены следующие спутниковые индексы: NDVI, VCI, VCNI.

Индекс NDVI представляет собой отношение разности сигналов в ближнем инфракрасном и красном диапазонах к их сумме. Индекс NDVI получил широкое распространение в исследованиях при интерпретации спутниковой информации применительно к оценке состояния растительности [12]. Индекс состояния растительности (VCI) [13] вычисляется на основе NDVI следующим образом:

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $NDVI_j$ – значение NDVI для даты j ; $NDVI_{\max}$ – значения максимальных NDVI внутри всего набора данных; $NDVI_{\min}$ – значение минимальных NDVI внутри всего набора данных; j – дата.

Индекс VCNI позволяет выявлять аномальные изменения в развитии сельскохозяйственных культур [4, 11] и рассчитывается по следующей формуле:

$$VCNI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{avg}}{NDVI_{avg}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $VCNI_j$ – значение индекса для даты j ; $NDVI_j$ – значение NDVI для даты j ; $NDVI_{avg}$ – среднее значение NDVI внутри всего набора данных.

Наземные метеорологические данные были получены на основе наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета и включали в себя следующие показатели: средняя декадная температура воздуха (T), отклонение средней декадной температуры воздуха от среднего многолетнего значения (T_0), сумма осадков за декаду (P), осадки в процентах от среднего (P_0), среднедекадный дефицит влажности воздуха (D), запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см, 0–50 см и 0–100 см. Важно подчеркнуть, что продолжительное воздействие неблагоприятных агрометеорологических условий представляет наибольшую угрозу для устойчивого развития сельскохозяйственных культур в критические фазы развития. В связи с этим, наряду с ежелекадными индикаторами, дополнительно проанализированы интегральные данные за трехдекадный период, обеспечивающие более репрезентативную кумулятивную оценку: средний дефицит влажности воздуха за 3 декады (D_3), а также использовался гидротермический показатель Селянинова ($ГТК$), который отражает баланс между теплом и влагой:

$$ГТК_i = \frac{\sum R_{[i+(i-1)+(i-2)]}}{0,1 \sum T_{10^\circ C [i+(i-1)+(i-2)]}}, \quad (3)$$

где i – номер оцениваемой декады; $i-1$ – номер декады, предшествующей на одну декаду от оцениваемой; $i-2$ – номер декады, предшествующей на две декады от оцениваемой; $\sum R$ – сумма осадков, мм; $\sum T > 10^\circ C$ – сумма температур воздуха $10^\circ C$ и выше.

Расчет значений параметров D_3 и $ГТК$ осуществляется на основе данных трёх предшествующих скользящих декад, а итоговые показатели соответствуют третьей, анализируемой декаде.

Статистическая информация основана на показателях средней урожайности озимой пшеницы по районам начиная с 2012 года, а также на данных о площадях, занятых под этой культурой. Указанная информация представлена в виде временных рядов средних районных значений урожайности, размещённых на официальном ресурсе Федеральной службы госстатистики.

Для структурированной организации и хранения входных данных разработана реляционная база данных на базе СУБД SQLite, обеспечивающая

эффективное управление многолетними рядами пространственно-временных данных. База данных поддерживает ежедекадную загрузку метеорологических и спутниковых параметров на протяжении всего календарного года. Учитывая недельный интервал представления данных MODIS на платформе BEGA-Science, реализован алгоритм пересчета спутниковых индексов путем их сведения к декадному временному масштабу. Спутниковые данные MODIS поступают в базу с учётом маски сельскохозяйственных культур, дифференцирующей три класса посевов: озимые культуры, яровые культуры и пашня. Данные VIIRS загружаются после предварительной композитной обработки. Интерфейс модуля композитной обработки представлен на рис. 1.

Рис. 1. Интерфейс модуля обработки композитов.
Fig. 1. Composite processing module interface.

Обработка композитных изображений выполняется дискретно для каждой декады вегетационного периода. В ходе композитной обработки рассчитываются вегетационные индексы: NDVI, VCI и VCNi. Предварительно задаются декада, минимальный и максимальный порог значений индекса NDVI (рис. 1). Выбор диапазона значений NDVI осуществляется индивидуально для каждого конкретного временного промежутка и региона. Вычисление VCI осуществляется только по значениям NDVI в пределах установленного диапазона. Расчет спутниковых индексов проводится с учетом маски сельскохозяйственных земель, ограничиваясь пикселями,

относящимися к классу пашни по глобальной классификации подстилающей поверхности (Land Cover Classification, International Steering Committee for Global Mapping). Маска сформирована на основе данных радиометра MODIS (<http://globalmaps.github.io>), где подстилающая поверхность детализирована на 20 классов, наименования которых достаточно точно отражают преобладающий тип подстилающей поверхности.

Метеорологические данные заносятся в базу для каждой метеостанции, при этом осуществляется привязка метеостанции к муниципальному району. Поскольку количество районов превышает количество станций в субъекте, для районов, не обеспеченных метеорологическими наблюдениями, данные восстанавливаются с применением метода обратных взвешенных квадратов расстояний [10]. Данный подход позволяет минимизировать влияние более удаленных наблюдений, обеспечивая доминирующее влияние ближайших метеостанций.

Для загрузки в базу данных фактических значений средней районной урожайности исследуемых культур разработан модуль, отвечающий за импорт и визуализацию указанной информации.

Результаты исследования

Исследование проводилось на основе данных, охватывающих временной период с 2012 по 2025 год. Длительность изучаемого периода определялась наличием сведений о средней районной урожайности в базе данных показателей муниципальных образований.

В рамках исследования были выполнены следующие этапы:

1. Построение (разработка, формирование) карт пространственного распределения и аналитических диаграмм динамики спутниковых и наземных агрометеорологических параметров в течение вегетационного периода.

2. Определение междекадных разностей (значения данных за текущую декаду в сравнении с предыдущей) метеорологических и спутниковых параметров с целью количественной оценки их влияния на изменения ожидаемой урожайности.

3. Расчёт междекадных разностей ожидаемой урожайности, обеспечивающий выявление критических фаз формирования урожая и локализацию районов с выраженным снижением продуктивности.

4. Ежедекадная количественная оценка вклада каждого показателя (спутниковые и метеорологические параметры) в ожидаемую урожайность озимой пшеницы.

На первом этапе для оценки состояния посевов и выделения зон с неблагоприятными агрометеорологическими условиями были построены карты пространственного распределения спутниковых индексов и метеорологических параметров по исследуемой территории. Для примера на рис. 2 показаны карты распределения спутниковых индексов NDVI, VCNI и VCI, полученных по спутниковой информации VIIRS по территории

Ставропольского края для третьей декады мая 2025 года. Это картографическое представление сформировано в растровом формате с попиксельной детализацией, при которой значения рассматриваемых показателей вычислялись для каждой отдельной ячейки растра.

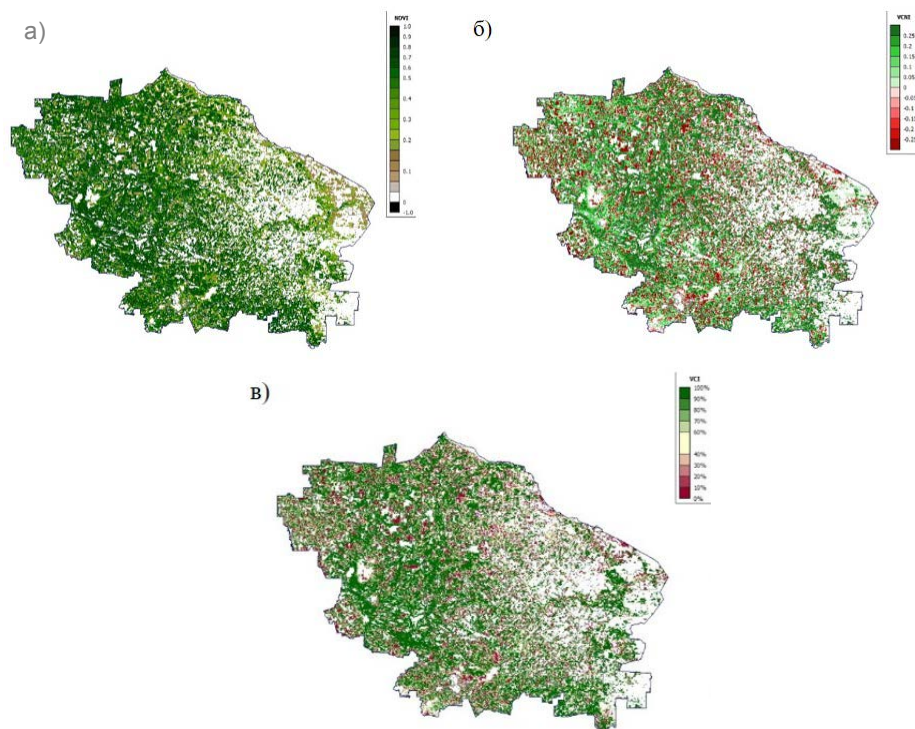


Рис. 2. Распределение спутниковых индексов NDVI (а), VCNI (б) и VCI (в), полученных по спутниковой информации VIIRS по территории Ставропольского края за третью декаду мая 2025 г.

Fig. 2. Distribution of satellite indices NDVI (a), VCNI (б), and VCI (в), obtained from VIIRS satellite information for the territory of Stavropol region for the third decade of May 2025.

На представленных картах выделяются локальные участки с пониженными значениями спутниковых индексов, такие зоны указывают на наличие стрессовых условий для растений (засушливые периоды, дефицит или избыток влаги и другие неблагоприятные факторы). Для интерпретации выявленных аномалий (выявления причин снижения значений) спутниковых вегетационных индексов необходимо провести анализ метеорологических параметров, характеризующих температурные и влажностные условия территории. Для этого разработаны карты распределения агрометеорологических параметров по территории в разрезе районов. Как было сказано ранее, для получения метеорологической информации для каждого района проводилась дополнительно интерполяция с помощью метода обратных взвешенных квадратов расстояний [10].

Была разработана процедура построения карт следующих параметров: средняя декадная температура воздуха, отклонение средней декадной температуры воздуха от среднего многолетнего значения, сумма осадков за декаду, сумма осадков в процентах от среднего, среднедекадный дефицит влажности воздуха, ГТК, запасы продуктивной влаги в слоях почвы 0–20 см, 0–50 см и 0–100 см. Комплексное использование указанных метеорологических параметров обеспечивает достаточно полную характеристику погодных условий, влияющих на развитие сельскохозяйственных культур. В частности, ГТК представляет собой интегральный показатель, учитывающий условия увлажнения и теплообеспеченности [7]. Анализ запасов продуктивной влаги в разных почвенных слоях позволяет оценить доступность влаги для растений на разных глубинах, а показатели температуры и осадков характеризуют условия теплообеспеченности и распределение влаги во времени и пространстве. Для примера рассмотрим карты распределения ГТК и запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см для районов Воронежской области за период со второй декады мая по первую декаду июня 2025 года (рис. 3).

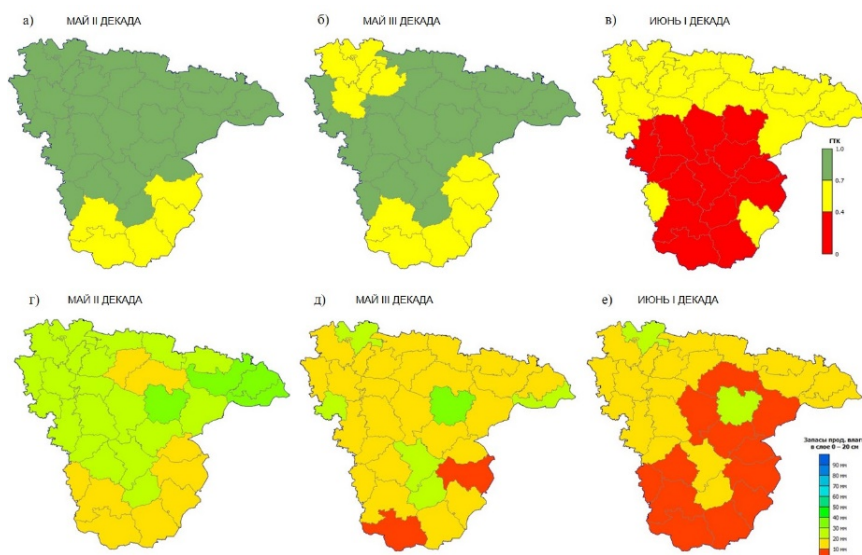


Рис. 3. Распределение ГТК (а–в) и запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см (г–е) для районов Воронежской области за период со второй декады мая по первую декаду июня 2025 г.

Fig. 3. Distribution of hydrothermal coefficient (а–в) and productive moisture reserves in the 0–20 cm soil layer (г–е) for districts of the Voronezh region for the period from the second decade of May to the first decade of June 2025.

Из рисунка видно, что со второй декады мая к первой декаде июня происходит последовательное ухудшение агрометеорологических условий: в начале периода преобладают благоприятные или близкие к нормальным значения ГТК и запасы продуктивной влаги, однако уже к третьей

декаде мая площадь территорий с пониженными значениями влагообеспеченности и ГТК заметно расширяется, а к первой декаде июня значительная часть области оказывается в зоне низких значений ГТК и выраженного дефицита продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см.

Таким образом, разработанные карты пространственного распределения (на районном уровне) спутниковых и агрометеорологических параметров позволяют выявлять аномалии температурно-влажностных условий и обеспечивают оценку погодных условий, важных для роста и развития посевов. Для мониторинга комплексной оценки агрометеорологических условий в течение всего вегетационного периода разработаны аналитические диаграммы в виде временных рядов, визуализирующие динамику декадных спутниковых и наземных агрометеорологических параметров по каждому исследуемому району в различные периоды развития сельскохозяйственных культур. Для примера на рис. 4 представлены аналитические диаграммы для Матвеево-Курганского и Ремонтненского районов Ростовской области за 2025 год.

В качестве спутниковой информации на аналитических диаграммах доступно отображение значений вегетационных индексов (NDVI, VCNi, VCI) для различных типов сельскохозяйственных земель: пахотные земли, посевы озимых и яровых культур. Дифференцированный подход к анализу по типам сельскохозяйственных угодий позволяет отдельно оценивать состояние озимых и яровых культур, а также пашни в целом, повышая информативность агрометеорологического мониторинга. На представленных диаграммах (рис. 4) отражена динамика вегетационных индексов для озимых культур. В Матвеево-Курганском районе зафиксирован негативный тренд: с конца апреля по начало июня отмечается систематическое снижение вегетационных индексов. Данная тенденция свидетельствует о прогрессирующем ухудшении состояния посевов, что может быть связано с неблагоприятными агрометеорологическими условиями. В то же время в Ремонтненском районе подобного снижения индексов не зафиксировано. Это указывает на стабильное состояние посевов и более благоприятные условия вегетационного периода в данном районе. В Матвеево-Курганском районе, согласно данным диаграмм динамики осадков и запасов продуктивной влаги, также отмечается формирование периода с дефицитом влаги, который создает стрессовые условия для роста и развития посевов. В Ремонтненском районе, несмотря на то что он расположен в более аридной зоне юго-востока Ростовской области, агрометеорологические условия 2025 г. оказались более благоприятными по сравнению с Матвеево-Курганским. Ход вегетационных индексов и агрометеорологических параметров в этих районах демонстрируют согласованность с результатами оценок ожидаемой урожайности озимой пшеницы. В Матвеево-Курганском районе по оценкам за первую декаду июня 2025 г. ожидаемая урожайность озимой пшеницы составила на 10,1 ц/га ниже средней многолетней, тогда как в Ремонтненском районе ожидается превышение среднемноголетнего уровня на 3,8 ц/га, что подтверждает ранее выявленные различия в агрометеорологических условиях этих территорий.

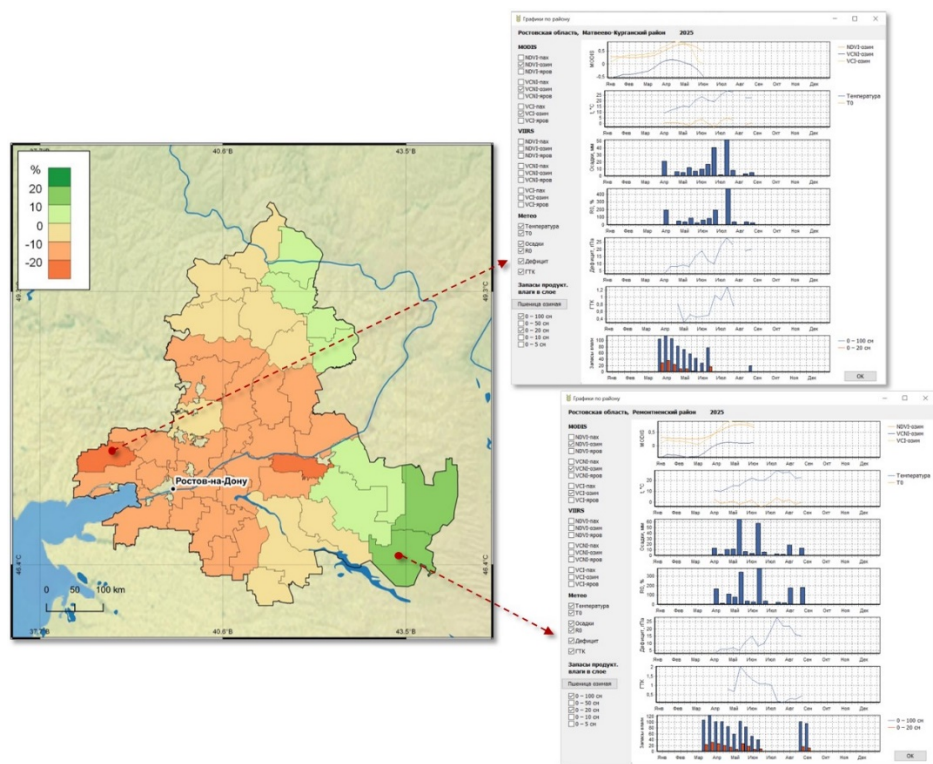


Рис. 4. Ожидаемая урожайность озимой пшеницы за 1 декаду июня 2025 г. (а) и аналитические диаграммы динамики агрометеорологических и спутниковых параметров для Матвеево-Курганского (б) и Ремонтненского (в) районов Ростовской области за 2025 г.

Fig. 4. Expected yield of winter wheat for the first decade of June 2025 (a) and analytical diagrams of the dynamics of agrometeorological and satellite parameters for the Matveevo-Kurgan (б) and Remontnensky (в) districts of the Rostov region for 2025.

На следующем этапе исследований были разработаны процедуры получения оценки изменения метеорологических, спутниковых параметров и ожидаемой урожайности между декадами вегетационного периода. Такой подход позволяет выявить временные изменения в темпах роста и развитии растений, определить периоды воздействия неблагоприятных агрометеорологических условий (дефицита влаги или переувлажнения, температурного стресса и др.), а также локализовать участки с замедленным развитием или снижением продуктивности. На рис. 5 показано изменение ожидаемой урожайности озимой пшеницы между декадами 2025 г. для районов Ростовской области.

Картографический анализ показывает тенденцию последовательного снижения ожидаемой урожайности озимой пшеницы от мая к первой де-

каде июня 2025 года. Наиболее значимая пространственная дифференциация определяется в период перехода от третьей декады мая к первой декаде июня. Данный интервал совпадает с фазами развития цветения и молочной спелости, в которые озимая пшеница очень уязвима к воздействию неблагоприятных агрометеорологических факторов. Выявленные районы с ожидаемой пониженной продуктивностью посевов целесообразно рассматривать в качестве приоритетных зон агрономического мониторинга, результаты которого формируют информационную основу для разработки и реализации корректирующих агротехнологических решений.

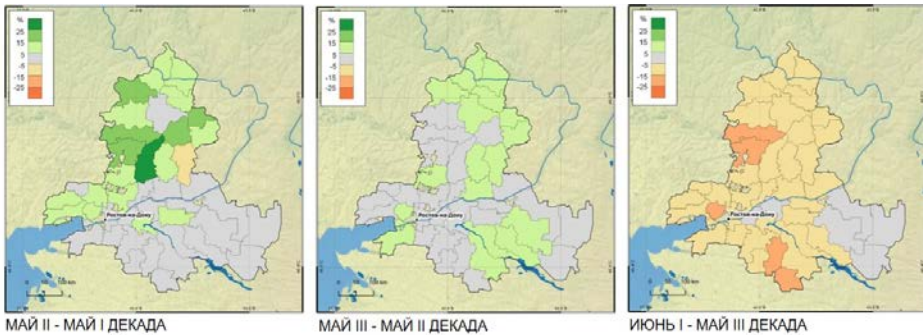


Рис. 5. Изменение ожидаемой урожайности озимой пшеницы по декадам на 2025 г. для районов Ростовской области.

Fig. 5. Change in the expected yield of winter wheat by decades for 2025 for districts of the Rostov region.

Завершающим этапом описываемого метода служит процедура количественной оценки вклада агрометеорологических условий декады в формирование ожидаемой урожайности озимой пшеницы на основе интеграции наземной и спутниковой информации. Как было представлено выше, в рамках разработанного подхода реализованы процедуры количественной оценки междекадных изменений урожайности, метеорологических факторов и спутниковых индексов. Анализ полученных изменений позволяет установить относительный вклад вариаций метеорологических параметров и спутниковых индексов в изменения ожидаемой урожайности. Эта доля или вклад может быть выражена как в процентах, так и в значениях ц/га. Был разработан соответствующий программный модуль и вставлен в общий программный модуль расчетов. На рис. 6 для примера приведена оценка количественного вклада изменений агрометеорологических параметров и спутниковых индексов за декаду в расчётную величину междекадного изменения ожидаемой урожайности озимой пшеницы для Белоглинского района Краснодарского края для третьей декады мая относительно второй декады мая 2025 года.

На рисунке слева показаны оценки изменений агрометеорологических параметров и спутниковых индексов между третьей и второй декадами мая. Для удобства нами приводились средние показатели изменений

для спутниковых индексов, в данном случае для VCNI и VCI, средние показатели для температурно-влажностных параметров, в данном случае дефицит влажности воздуха, ГТК и средние показатели запасов влаги в почве по слоям 0–100 см, 0–50 см, 0–20 см.



Рис. 6. Оценка количественного вклада изменений агрометеорологических параметров и спутниковых индексов за декаду в расчётную величину междекадного изменения ожидаемой урожайности озимой пшеницы для Белоглинского района Краснодарского края для третьей декады мая относительно второй декады мая 2025 г.

Fig. 6. Assessment of the quantitative contribution of changes in agrometeorological parameters and satellite indices over a decade to the calculated value of the interdecadal change in the expected yield of winter wheat for the Beloglinsky district of Krasnodar region for the third decade of May relative to the second decade of May 2025.

Как видно из рисунка, ожидаемая урожайность на третью декаду мая уменьшилась по сравнению с предыдущей на 8,4 ц/га, что составляет 13,8 %. Все три группы факторов (спутниковые индексы, температурно-влажностные параметры и запасы продуктивной влаги в почве) внесли отрицательный вклад в формирование данной тенденции, что свидетельствует о комплексном неблагоприятном характере агрометеорологических условий в Белоглинском районе. Если величину снижения урожайности (8,4 ц/га) принять за 100 %, то вклад спутниковых индексов составил 1,2 ц/га (13,8 %), температурно-влажностных параметров 3,0 ц/га (36,2 %), а запасов влаги 4,2 ц/га (50,0 %). Доминирующим фактором снижения урожайности являлся дефицит почвенной влаги, его вклад составил 50,0 % и свидетельствует о прогрессирующем истощении почвенных влагозапасов.

Наиболее значительное сокращение запасов продуктивной влаги зафиксировано в пахотном слое почвы (0–20 см), что непосредственно ограничивает водоснабжение корневой системы. Это особенно значимо с учетом того, что рассматриваемый период соответствует фазам цветения и молочной спелости, когда потребность озимой пшеницы во влаге очень высока. Полученные результаты для Белоглинского района Краснодарского края свидетельствуют о необходимости проведения первоочередных агротехнических мероприятий, направленных на сохранение почвенной влаги. Таким образом применяемый подход позволяет не только констатировать факт ухудшения агрометеорологических условий, но и количественно ранжировать лимитирующие факторы по степени их негативного воздействия на посевы, что повышает обоснованность принимаемых агрономических решений.

Принципиально иная картина агрометеорологических условий наблюдалась в Самарской области, где к третьей декаде мая зафиксировано улучшение условий вегетации относительно второй декады мая 2025 г. На рис. 7 приведена оценка количественного вклада изменений агрометеорологических параметров и спутниковых индексов за декаду в расчётную величину междекадного изменения ожидаемой урожайности озимой пшеницы для Большечерниговского района Самарской области для третьей декады мая относительно второй декады мая 2025 года.

Как видно из рисунка, ожидаемая урожайность озимой пшеницы на третью декаду мая увеличилась по сравнению с предыдущей декадой на 3,1 %. Все три группы факторов (спутниковые индексы, температурно-влажностные параметры и запасы продуктивной влаги в почве) сформировали положительный вклад в динамику ожидаемой урожайности. Вклад спутниковых индексов составил 0,2 ц/га (22,2 %), температурно-влажностных параметров – 0,4 ц/га (44,4 %), запасов продуктивной влаги в почве – 0,3 ц/га (33,3 %). Позитивным фактором формирования урожайности в рассматриваемый период являлись температурно-влажностные параметры, которые свидетельствуют об улучшении условий увлажнения и снижении атмосферной засухливости. Пополнение запасов продуктивной влаги, наиболее выраженное в слое почвы 0–20 см (+53,3 %), обеспечивает улучшение условий водоснабжения корневой системы в период активной вегетации. Рассматриваемый период соответствует фазам колошения и цветения озимой пшеницы. Положительная динамика спутниковых индексов – рост VCNi на 13,4 % и VCI на 19,3 % – дополнительно подтверждает улучшение общего состояния посевов. Таким образом, агрометеорологическая обстановка в Большечерниговском районе Самарской области к третьей декаде мая 2025 г. оценивается как благоприятная, что контрастирует с одновременно складывающейся неблагоприятной ситуацией в отдельных районах Краснодарского края и наглядно демонстрирует возможности разработанного подхода к выявлению пространственной неоднородности агрометеорологических условий.

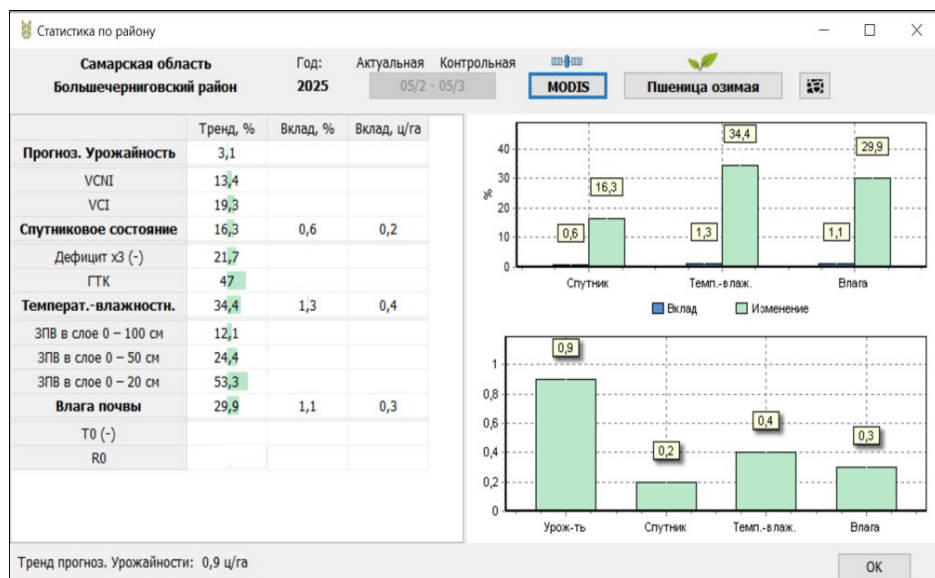


Рис. 7. Оценка количественного вклада изменений агрометеорологических параметров и спутниковых индексов за декаду в расчётную величину междекадного изменения ожидаемой урожайности озимой пшеницы для Большечерниговского района Самарской области для третьей декады мая относительно второй декады мая 2025 г.

Fig. 7. Assessment of the quantitative contribution of changes in agrometeorological parameters and satellite indices over a decade to the calculated value of the interdecadal change in the expected yield of winter wheat for the Bolshechernigovsky district of the Samara region for the third decade of May relative to the second decade of May 2025.

Таким образом, разработан метод подекадной диагностики вклада агрометеорологических факторов в продуктивность озимых зерновых культур (озимая пшеница), основанный на интегральном анализе спутниковых спектральных индексов (NDVI, VCI, VCNI) и наземных агрометеорологических параметров. Разработанный метод состоит из четырех последовательных этапов. На первом этапе строятся аналитические диаграммы, визуализирующие декадную динамику спутниковых и наземных агрометеорологических параметров на протяжении вегетационного периода. Затем вычисляются междекадные разности ожидаемой урожайности, что позволяет выявлять критические фазы формирования урожая и локализовать районы с выраженным снижением продуктивности. Далее рассчитываются междекадные разности метеорологических и спутниковых параметров с целью установления их влияния на динамику ожидаемой урожайности. Завершающим этапом служит ежедекадная количественная оценка вклада каждой группы показателей – спутниковых индексов и агрометеорологических параметров в ожидаемую урожайность озимой пшеницы.

Заключение

В процессе исследования разработан и апробирован метод подекадной количественной оценки вклада агрометеорологических условий в ожидаемую урожайность озимой пшеницы на основе комплексирования наземной и спутниковой информации. Разработанный метод позволяет оценить в количественной форме влияние отдельных факторов (агрометеорологических, спутниковых) на ожидаемую урожайность озимой пшеницы. При анализе ежедекадно проводится оценка прироста либо снижения ожидаемой урожайности в зависимости от изменения погодных условий, что позволяет выявлять лимитирующие факторы роста и развития посевов и более точно оценить ожидаемую урожайность. В рамках исследования созданы алгоритм и программные модули, обеспечивающие автоматизированную обработку, позволяющие получать ежедекадную динамику изменений используемых метеорологических и спутниковых факторов в разрезе районов. Программные средства для визуализации разработаны с использованием геоинформационной системы QGIS. Разработанный подход, в отличие от традиционных качественных оценок состояния посевов, позволяет не только констатировать факт ухудшения или улучшения агрометеорологических условий, но и количественно идентифицировать приоритетные лимитирующие факторы, что может повысить обоснованность принимаемых агрономических и управленческих решений.

Список литературы

1. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 147-161.
2. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка возможности использования спутниковой информации для мониторинга засух на территории южных регионов России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 3 (393). С. 142-157. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-142-157>
3. Клещенко А.Д., Савицкая О.В., Косякин С.А. Оценка средней районной урожайности озимой пшеницы по спутниковой и наземной метеорологической информации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 103-121. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-103-121>
4. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю. С. Возможности использования пространственно-временных вегетационных индексов на примере анализа аномальных условий развития озимых культур на Европейской части России в 2016 году // XIV Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Сборник тезисов докладов. Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2016 г. С. 361.
5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Брилль А.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Миклашевич Т.С., Плотников Д.Е., Радченко М.В., Стыценок Ф.В., Сычуглов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. Система «Вега-Science»: особенности построения, возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 9-31.

6. Развитие методов агрометеорологического прогнозирования и технологий информационного обеспечения сельского хозяйства: отчет о НИР / Клещенко А.Д. Обнинск: ФГБУ «ВНИИСХМ», 2024. 146 с.

7. Селянинов Г.Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата // Мировой агроклиматический справочник. Л.-М.: Гидрометеиздат, 1937. 419 с.

8. Селянинов Г.Т. Происхождение и динамика засух // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л.: Гидрометеиздат, 1958. С. 5-30.

9. Страшина А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 171-188.

10. Ткачева Ю.В. Методика интерполяции кусочно-линейных данных об эмиссиях автотранспорта на регулярную модельную сетку // Труды Гидрометцентра России. 2018. Вып. 368. С. 170-180.

11. Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 581-586.

12. Щербенко Е.В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2, №. 4. С. 408-419.

13. Kogan F.N. NOAA / AVHRR Satellite Data-Based Indices for Monitoring Agricultural Droughts // Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Oxford: University Press, 2005. P. 79-89.

References

1. Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V. Otsenka prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya urozhajnosti zernovykh kul'tur i standartizovannogo indeksa osadkov (SPI) po sputnikovoj i nazemnoj informatsii [Assessment of the spatio-temporal distribution of grain crop yields and the standardized precipitation index (SPI) using satellite and ground-based information]. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory]*, 2014, vip. 571, pp. 147-161 [in Russ.].

2. Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovoj informatsii dlya monitoringa zasukh na territorii yuzhnykh regionov Rossii [Assessment of the possibility of using satellite information for monitoring droughts in the southern regions of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological research and forecasts]*, 2024, no. 3 (393), pp. 142-157. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-142-157> [in Russ.].

3. Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V., Kosyakin S.A. Otsenka srednej rajonnoj urozhajnosti ozimoy pshenitsy po sputnikovoj i nazemnoj meteorologicheskoy informatsii [Estimation of average regional yield of winter wheat based on satellite and ground-based meteorological information]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological research and forecasts]*, 2020, no 3, pp. 103-121. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-103-121> [in Russ.].

4. Lupyan E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Krashennnikova Yu.S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya prostranstvenno-vremennykh vegetatsionnykh indeksov na primere analiza anomal'nykh uslovii razvitiya ozimyykh kul'tur na Evropeiskoi chasti Rossii v 2016 godu [Possibilities of using spatiotemporal vegetation indices on the example of analysis of abnormal conditions for the development of winter crops in the European part of Russia in 2016]. *XIV Vserossiyskaya otkrytaya konferenciya "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*. Sbornik tezisev dokladov. Moscow, IKI PAS, November 14-18, 2016, pp. 361 [in Russ.].

5. Lupyan E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskij A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Bril' A.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Miklashevich T.S., Plotnikov D.E., Radchenko M.V., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Khvostikov S.A., Khovratovich T.S. Sistema «Vega-Science»: osobennosti postroeniya, vozmozhnosti i opyt ispol'zovaniya [Vega-Science system: design

features, main capabilities and usage experience]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2021, vol. 18, no 6, pp. 9-31 [in Russ.].

6. Razvitie metodov agrometeorologicheskogo prognozirovaniya i tekhnologij informatsionnogo obespecheniya sel'skogo khozyajstva: otchet o NIR [Development of methods of agrometeorological forecasting and technologies for information support of agriculture: research report]. *Kleshchenko A.D.* Obninsk: FGBU VNIISKHM, 2024, 146 p. [in Russ.].

7. *Selyaninov G.T.* Metodika sel'skhozajstvennoj harakteristiki klimata [Methodology of agricultural climate characteristics]. *Mirovoj agroklimaticheskij spravochnik*. Leningrad-Moscow: Gidrometeoizdat publ., 1937, 419 p. [in Russ.].

8. *Selyaninov G.T.* Proiskhozhdenie i dinamika zasukh [Origin and dynamics of droughts]. *Zasukhi v SSSR, ikh proiskhozhdenie, povtoryaemost' i vliyanie na urozhaj*. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1958, pp. 5-30 [in Russ.].

9. *Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V.* Agrometeorologicheskie osobennosti zasukhi 2010 goda v Rossii po sravneniyu s zasukhami proshlykh let [Agrometeorological features of a drought of 2010 in Russia in comparison with droughts of last years]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcentre of Russia], 2011, vip. 345, pp. 171-188 [in Russ.].

10. *Tkacheva Yu.V.* Metodika interpolatsii kusochno-lineinykh dannykh ob emissiyakh avto-transporta na regul'yarnuyu model'nyuyu setku [Methodology for interpolating piecewise linear data on vehicle emissions onto a regular model grid]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcentre of Russia], 2018, vip. 368, pp. 170-180 [in Russ.].

11. *Tolpin V.A., Lupyan E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M.* Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa «VEGA» [Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the "VEGA" satellite service]. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 581-586 [in Russ.].

12. *Shcherbenko E.V.* Remote methods for detecting agricultural drought. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2007, vol. 2, no. 4, pp. 408-419 [in Russ.].

13. *Kogan F.N.* NOAA / AVHRR Satellite Data-Based Indices for Monitoring Agricultural Droughts. *Monitoring and Predicting Agricultural Drought*. Oxford: University Press, 2005, pp. 79-89.

Поступила 19.06.2026; принята в печать 22.10.2026.
Submitted 19.06.2026; accepted for publication 22.10.2026.