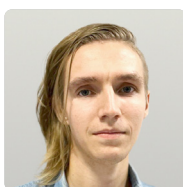


СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ОЗИМОГО РАПСА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ SENTINEL-2 ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ВЕГЕТАЦИИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В УСЛОВИЯХ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

© Прохоров А.А., Бирюков А.Л.,
Ерегин А.В., Зубов А.О.



Артем Анатольевич Прохоров
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
Москва, Российская Федерация
e-mail: artem.prokhorov.2016@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-2988-5055



Александр Леонидович Бирюков
Вологодская государственная молочнохозяйственная академия
имени Н.В. Верещагина
Вологда, Российская Федерация
e-mail: biryukov_alex@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5043-4136 Researcher Q-9241-2017



Александр Владимирович Ерегин
Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация
e-mail: szniirast@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9168-5620



Антон Олегович Зубов
СХПК-колхоз «Передовой»
Кубенское, Российская Федерация

В работе представлены результаты мониторинга посевов озимого рапса в вегетационный период 2025 года (май – сентябрь), выполненного на основе данных мультиспектральной спутниковой системы Sentinel-2 (миссия Copernicus, ESA). Для анализа были использованы сцены уровня L2A (атмосферно скорректированные), прошедшие предварительную обработку: маскирование облачности, мозаичное объединение и обрезку по контуру поля. Рассчитаны значения индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) как интегрального индикатора состояния посевов. Для оценки пространственно-временной динамики применялись статистические метрики (среднее значение, медиана, стандартное отклонение, коэффициент ва-

риации, перцентили), а также визуализация данных через картограммы с фиксированной и контрастной шкалой ($\mu \pm \sigma$). Установлено, что NDVI посевов за сезон изменялся в диапазоне 0,1–0,8, демонстрируя характерные фазы развития: весеннее возобновление вегетации (NDVI 0,3–0,4), бутонизацию и максимальную биомассу (NDVI до 0,7–0,8, минимальная внутривидовая вариативность), фазу цветения (снижение NDVI до 0,5) и последующее созревание с резким падением значений ($<0,2$). Показано, что облачность существенно ограничивает практическую применимость спутникового мониторинга: из 42 сцен за сезон лишь 32 оказались пригодны для анализа. Несмотря на это, данные Sentinel-2 позволили выявить устойчивые пространственные аномалии и зоны потенциального снижения продуктивности. Отмечена необходимость комбинирования спутниковых наблюдений с аэрофотосъемкой и агрохимическими обследованиями для обеспечения оперативного и детализированного контроля за состоянием посевов. Представлена контрастная визуализация для выявления слабых аномалий при неоднородности вегетации внутри одного элементарного ареала агроландшафта. Выполнена адаптация статистических метрик для анализа пространственной неоднородности.

Данные дистанционного зондирования, мониторинг состояния растений, продуктивность агроландшафтов, вегетационные индексы.

Введение

Актуальность исследования связана с растущей ролью точного земледелия и необходимостью оперативного контроля за состоянием сельскохозяйственных культур (Schepers, 2019). Применение данных дистанционного зондирования, в частности миссии Sentinel-2, позволяет оценивать биофизические параметры растений без вмешательства в агроэкосистемы и обеспечивает основу для поддержки управленческих решений в растениеводстве (Mamabolo et al., 2025). Данные по озимому рапсу особенно востребованы в условиях северных широт, где краткий вегетационный период и высокая облачность осложняют полевые наблюдения.

Научная новизна заключается в адаптации статистических метрик к малой выборке сцен и использовании контрастной визуализации для выделения слабых аномалий развития культуры. Выполнена адаптация статистических метрик для анализа пространственной неоднородности.

Цель исследования – оценить динамику развития внутривидовой неоднородности посевов озимого рапса на основе спутни-

ковых данных Sentinel-2 для последующего использования в системах точного земледелия и оптимизации агротехнологических решений. Объект исследования – посевы озимого рапса. Предмет исследования – динамика вегетации и пространственной неоднородности посевов.

Задачи исследования:

- отобрать и подготовить спутниковые данные Sentinel-2 (уровня L2A) для исследуемого участка, включая атмосферную коррекцию, маскирование облачности и пространственную обрезку;
- рассчитать значения индекса NDVI как основного индикатора фотосинтетической активности и провести его статистический анализ, выделив среднее, медиану, стандартное отклонение, коэффициент вариации, перцентили;
- построить временные ряды NDVI с применением статистических метрик (медиана, стандартное отклонение, коэффициент вариации, перцентили) для выявления фаз роста и пространственной неоднородности посевов;
- оценить влияние облачности и фактического временного разрешения 2–5 дней

при работе с данными Sentinel-2 на возможность оперативного мониторинга посевов;

– определить практическую значимость спутникового мониторинга для агропроизводства, обозначив потенциал его интеграции в технологии точного земледелия (дифференцированное внесение, выявление проблемных зон) и необходимость наземной верификации (агрохимические и фитосанитарные обследования, аэрофотосъемка с БПЛА).

Материалы и методика исследований

Представлены результаты мониторинга посевов озимого рапса в течение вегетационного периода (май – сентябрь 2025 года) на основе данных спутников Sentinel-2 (миссия Copernicus, ESA) в условиях агроландшафта, локализованного на территории Вологодской области предприятия «Племзавод-колхоз имени 50-летия СССР» 58.948383, 39.991078. Номинальное временное разрешение спутников Sentinel-2 составляет 5 дней для каждой базы данных, но при совместном использовании аппаратов S2A и S2B для средних широт фактический интервал между последовательными сценами уменьшается до 2–3 дня, что особенно важно для мониторинга быстрых фаз развития посевов¹. Пространственное разрешение – до 10 м по ключевым каналам, что делает данные оптимальными для агрономического анализа на уровне отдельных полей и крупных предприятий (Савин и др., 2015).

Спутниковая система Sentinel-2 (аппараты S2A и S2B) оснащена мультиспектральным сенсором MSI (MultiSpectral Instrument), регистрирующим излучение в 13 спектральных каналах с пространственным разрешением 10, 20 или 60 м². Каналы охватывают видимую часть спек-

тра, ближний инфракрасный (NIR) и коротковолновый инфракрасный (SWIR) диапазоны, что позволяет оценивать фотосинтетическую активность растений, содержание хлорофилла и влаги в покрове. Для мониторинга ключевыми являются каналы Sentinel-2:

– B2 (Blue) – синий канал (490 нм, 10 м), используется для коррекции атмосферных искажений, чувствителен к содержанию пигментов и состоянию воды;

– B3 (Green) – зеленый канал (560 нм, 10 м), чувствителен к содержанию хлорофилла, используется при расчете некоторых индексов (например, GNDVI);

– B4 (Red) – красный канал (665 нм, 10 м), основной канал для оценки фотосинтеза и расчета NDVI (Benedetti, Rossinni, 1993);

– B5–B7 (Red Edge) – красная граница (705, 740, 783 нм, 20 м), чувствительны к стрессам растений и обеспеченности азотом, используются в индексе NDRE и других;

– B8 (NIR) – ближний ИК (842 нм, 10 м), отражает фотосинтетически активную биомассу, входит в расчет NDVI и других индексов;

– B11, B12 (SWIR) – коротковолновой ИК (1610 и 2190 нм, 20 м). Информативны для оценки влаги растений и почвы, диагностики засухи и стрессов.

Данные Sentinel-2 доступны в уровнях обработки L1C (отраженное излучение от верхней границы атмосферы) и L2A (отражательная способность поверхности, после коррекции атмосферы). В рамках данного исследования использованы сцены уровня L2A, предварительно прошедшие атмосферную коррекцию (алгоритм Sen2Cor), что обеспечивает корректные значения открытой поверхности.

Для анализа были отобраны все доступные сцены Sentinel-2 за период с мая по сентябрь 2025 года, покрывающие контур

¹ ESA. Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document. 2015. 64 p.

² Там же.

исследуемого участка с посевами озимого рапса. Всего было отобрано 42 снимка за вегетационный период, 10 из которых были полностью покрыты облаками и отсеяны из последующего анализа. Данные загружены через открытый сервис Copernicus Open Access Hub. Для автоматизации загрузки и первичной обработки привлекались Python-библиотеки (sentinel sat, rasterio). На этапе предварительной обработки применялись следующие шаги:

- атмосферная коррекция – использовались готовые продукты L2A (с коррекцией Sen2Cor), дополнительная коррекция не требовалась;

- маскирование облачности – на основе слоя классификации сцены (SCL) и показателей яркости были исключены пиксели, соответствующие облакам и их теням; пиксели с высоким альбедо в видимых и SWIR-диапазонах классифицированы как облачные и не учитывались в дальнейших расчетах;

- мозаика и обрезка по контуру – при наличии близких по времени частично облачных сцен выполнялось объединение изображений – для каждого участка поля брались пиксели с меньшей облачностью или более высоким NDVI; также все сцены обрезались по границам поля (векторный полигон), чтобы исключить влияние прилегающих территорий и сконцентрироваться только на исследуемом участке.

Из откорректированных мультиспектральных данных рассчитаны значения вегетационного индекса NDVI – базового индекса вегетации, на основании которого, как отмечают многие авторы, возможно осуществлять мониторинг посевов, определять тип культур, оценивать урожайность и воздействие экстремальных факторов, а также состояние почв (Benedetti, Rossinni, 1993; Groten, 1993; Liu, Kogan, 2002; Atzberger, 2013; Omia et al., 2023; Хутуев и др., 2024).

Обработка и анализ данных выполнялись с использованием специализированных ГИС и ДЗЗ-инструментов. Для расчета индексов и визуализации применялся бесплатный пакет ESA SNAP, а также QGIS v. 3.16 с дополнением Semi-Automatic Classification Plugin (для загрузки спутниковых данных и вычисления индексов). В анализ временных рядов NDVI включались возможности языка Python, библиотек NumPy, Pandas, Matplotlib.

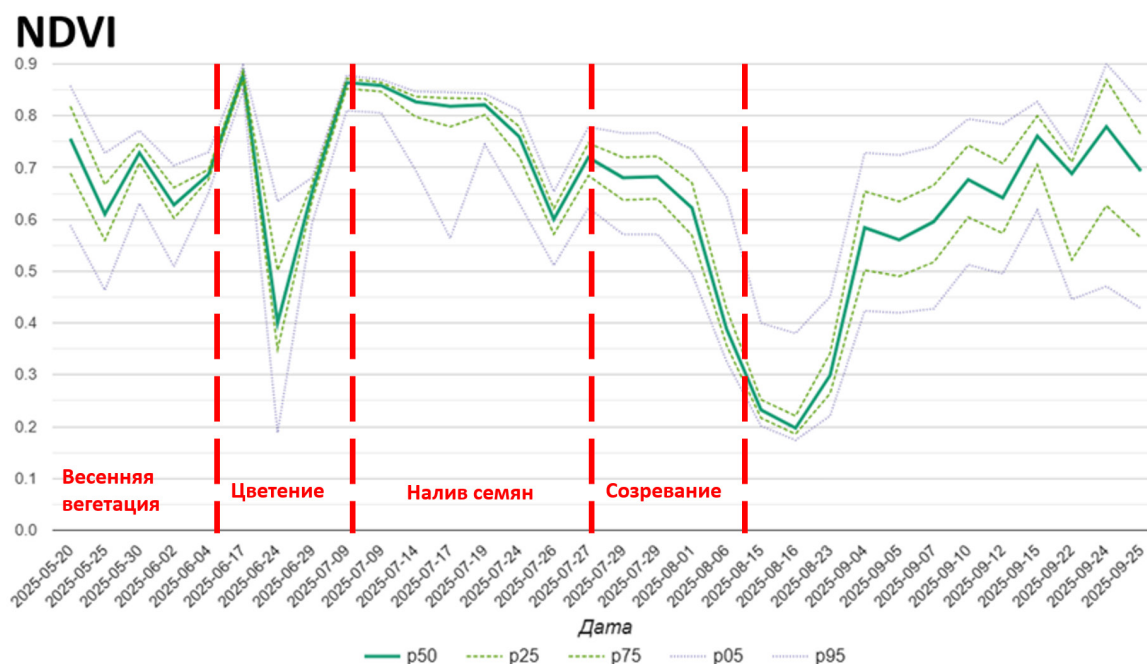
Для каждого снимка строились тематические карты NDVI. Использовались два подхода к шкале отображения:

Фиксированная шкала – значения NDVI от 0 до 1 окрашивались по единой цветовой шкале от коричневых тонов (низкий NDVI) до насыщенно-зеленых (высокий NDVI). Значения ниже 0,2 отображались как темно-коричневые (близко к оголенной почве), выше 0,9 – как ярко-зеленые (насыщенный покров). Такой единый масштаб позволяет напрямую сравнивать карты разных дат по абсолютному уровню NDVI.

Контрастное отображение (относительная шкала): для выявления тонких внутривидовых различий каждая карта также отображалась с индивидуальным контрастированием – в диапазоне $\mu \pm \sigma$ (среднее значение \pm одно стандартное отклонение для данного снимка). При этом пикселям с NDVI равным среднему присваивался средний зеленый тон, значение на одно σ выше среднего – самый яркий зеленый, а на σ ниже – самый темный (бурый) тон. Такой прием усиливает локальные контрасты на каждом конкретном изображении, позволяя заметить слабые аномалии развития, которые могут быть неразличимы на фиксированной шкале (например, небольшие разницы в густоте всходов на фоне общего высокого NDVI).

Результаты исследования

Для количественной оценки состояния посевов рассчитаны статистические по-



Примечание. Кривая – медианное значение NDVI по полю; зеленые зоны – межквартильный размах (25–75 перцентили), светло-зеленая зона – диапазон 5–95 перцентилей. Вертикальными полосами условно отмечены фазы развития культуры: ранняя вегетация (весна), цветение (июнь), налив семян (июль), созревание (конец июля) и период после уборки (осень).

Рис. 1. Динамика показателя NDVI озимого рапса за весенне-летнюю вегетацию

Источник: данные исследований авторов.

казатели NDVI по полю для каждой даты наблюдения: среднее и медианное значение, стандартное отклонение, коэффициент вариации (V), а также перцентили (5-й, 25-й, 75-й, 95-й), характеризующие распределение индекса. На *рис. 1* приведен временной ряд NDVI по датам (май – сентябрь 2025 год) с доверительными областями, отражающими разброс значений по полю.

Начальный этап вегетации

К 20 мая средний NDVI по полю увеличился до 0,6–0,7, что свидетельствует о восстановлении листового аппарата после зимнего периода, хотя и сохранялась существенная неоднородность из-за различий в густоте стояния и появлении сорных растений. На дату начала мониторинга медианное значение NDVI по полю составляло около 0,75, что говорит об оптимальном состоянии культуры после перезимовки. В связи с высокой облачностью в

апреле – мае 2025 года начало временного ряда ограничено 20 мая 2025 года.

Важным дополнением к дистанционным данным служат полевые наблюдения за развитием растений. На *рис. 2* приведено состояние посевов на 24.04.2025. Растения постепенно начали возобновлять вегетацию после зимы, несмотря на частичное выпадение культуры. В целом рост можно оценить как удовлетворительный. Густота стояния растений существенно различается в пределах поля. Присутствуют ареалы, где посевы сильно разрежены – менее 17–19 шт./м², но на большей части массива густота стояния близка к оптимальной – около 28 шт./м². К маю на отдельных участках начали развиваться сорные виды, что также существенно может смещать величины NDVI при их осреднении (Савин и др., 2020). Рост и развитие растений были неравномерными, что отразилось на морфометрических



Рис. 2. Состояние растений на момент 24.04.2025

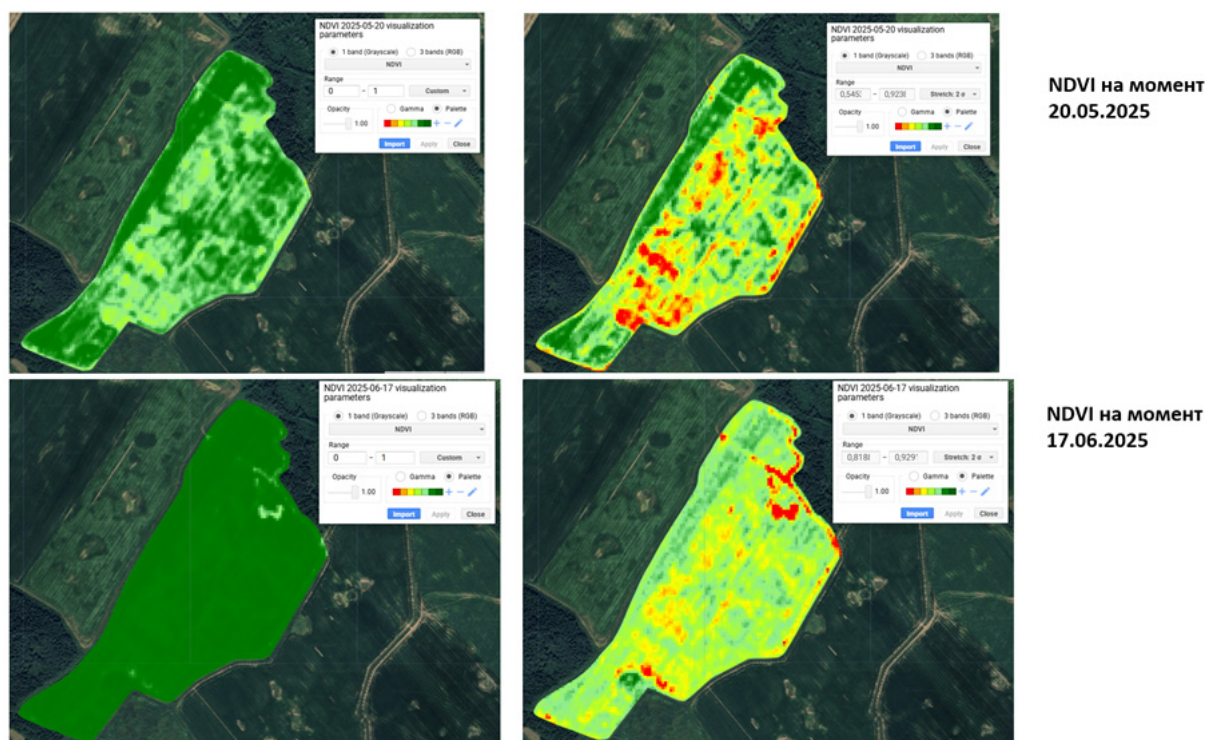
Источник: данные исследований авторов.

показателях. Высота растений в среднем варьировала от 50 до 70 см ($V > 10\%$), однако на ряде участков не превышала 40 см ($K_v < 10\%$). Количество боковых побегов первого и второго порядка, влияющих на урожайность, колебалось от 8 до 19 шт. на растение. В среднем по полю этот показатель близок к оптимальному (9–11 шт.), но встречались участки с более низкими значениями. Наибольшая высота растений наблюдалась в группах, где плотность составляла ~ 20 шт./м², а наименьшая, при оптимальной густоте, ~ 28 шт./м². Вероятно, более низкая плотность способствовала лучшей обеспеченности питательными элементами, что отразилось на росте и ветвлении растений. Участки с меньшей интенсивностью вегетации в виде ареалов частично совпадали с контурами пониженной продуктивности, рассчитанными с использованием индекса NDVI.

Следует также учитывать, что в разреженных посевах индекс NDVI может быть завышен. При формировании подроста и

наличии сорных растений проективное покрытие листовой поверхностью создают как растения озимого рапса, находящиеся в фазе цветения, так и поздние или сорные виды.

К концу мая – началу июня наблюдался рост показателя NDVI по мере активного отрастания листьев (фаза интенсивной вегетации перед бутонизацией). Распределение показателя NDVI сместилось в область более высоких значений 0,7–0,8. В первой половине июня (фаза бутонизации) NDVI достиг своего максимума, при этом на ряде снимков высокая облачность (более 70%) существенно препятствовала проведению дистанционной оценки состояния посевов. К 20 июня среднее значение NDVI составило 0,67, медианное – 0,63. В этот период распределение NDVI было однородным. Величина среднеквадратического отклонения не превышала 0,05, а коэффициент вариации в среднем снизился до 3–7% по отдельным сценам, анализируемым в июне, что указывает на



Примечание. Левая часть изображения – контрастирование на 0–1, правая часть – контрастирование $\mu \pm \sigma$.

Рис. 3. Картограммы NDVI на отдельных сценах Sentinel-2

Источник: данные исследований авторов.

более однородное состояние большинства растений, однако не учитывает уровень засоренности, что может искажать оценки.

Для июня межквартильный диапазон (25–75%) был порядка 0,55–0,63, а экстремальные перцентили (5-й и 95-й) находились в пределах 0,52 и 0,67. Таким образом, к началу цветения посевы рапса по всему полю выравнивались по биомассе, на что косвенно указывало более однородное распределение пикселей по показателю NDVI. На *рис. 3* представлены картограммы NDVI на отдельных сценах Sentinel-2.

Фаза цветения

По данным ряда снимков, медианный NDVI снижался до 0,42–0,59. Ярко-желтые лепестки во время цветения частично прикрывают зеленую листву, что снижает суммарное отражение в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) и, соответственно, величину NDVI. Медианный

NDVI опускался до 0,45, стандартное отклонение увеличивалось до 0,05–0,08, коэффициент вариации – до 10–15%, отражая возросшую мозаичность растений на этом этапе.

Визуальные обследования подтверждали, что растения, несмотря на снижение NDVI, не выглядели угнетенными – явных болезней не выявлено, степень засоренности низкая. Однако встречались достаточно большие площади растений, еще не достигших перехода к фазе цветения. Такие пятна совпадали с областями повышенной интенсивности вегетации по NDVI. В целом проведенные агротехнические мероприятия обеспечили нормальное развитие, но уровень выровненности растений в посеве оставался средним (50–70 см: коэффициент вариации по высоте превышал 10%), хотя на отдельных участках низкий (до 40 см, при $V\% < 10\%$). На *рис. 4* представлено состояние растений на период июня 2025 года.

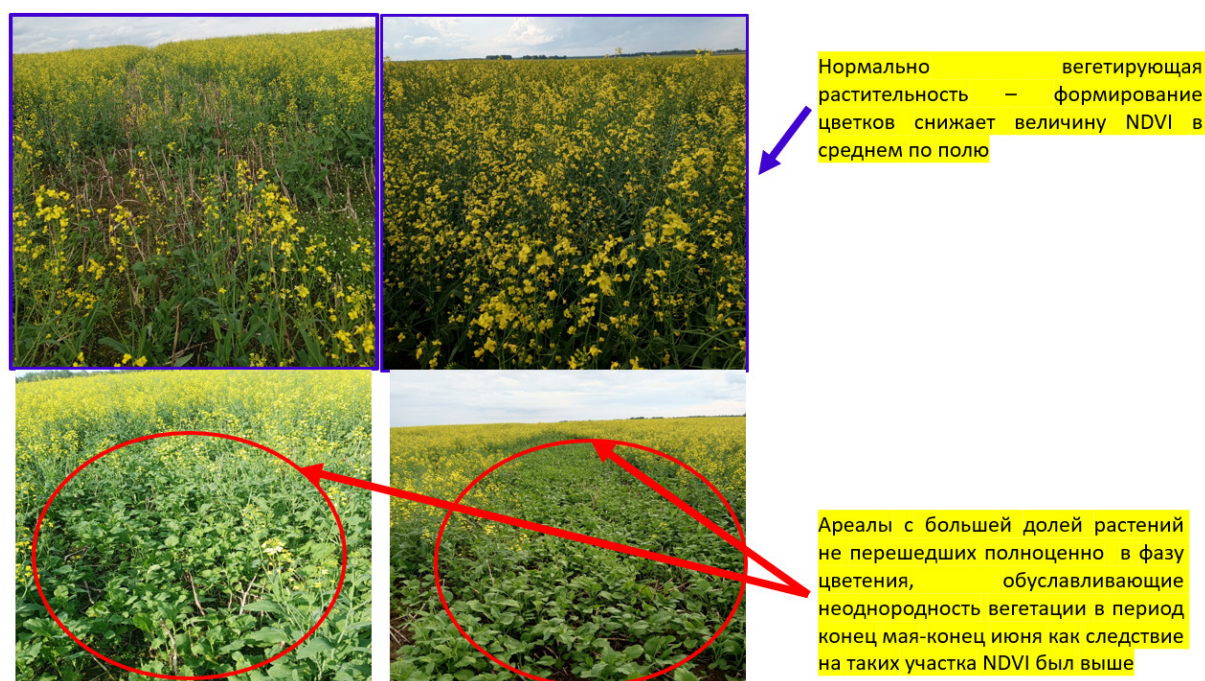


Рис. 4. Состояние растений на период июня 2025 года

Источник: данные исследований авторов.

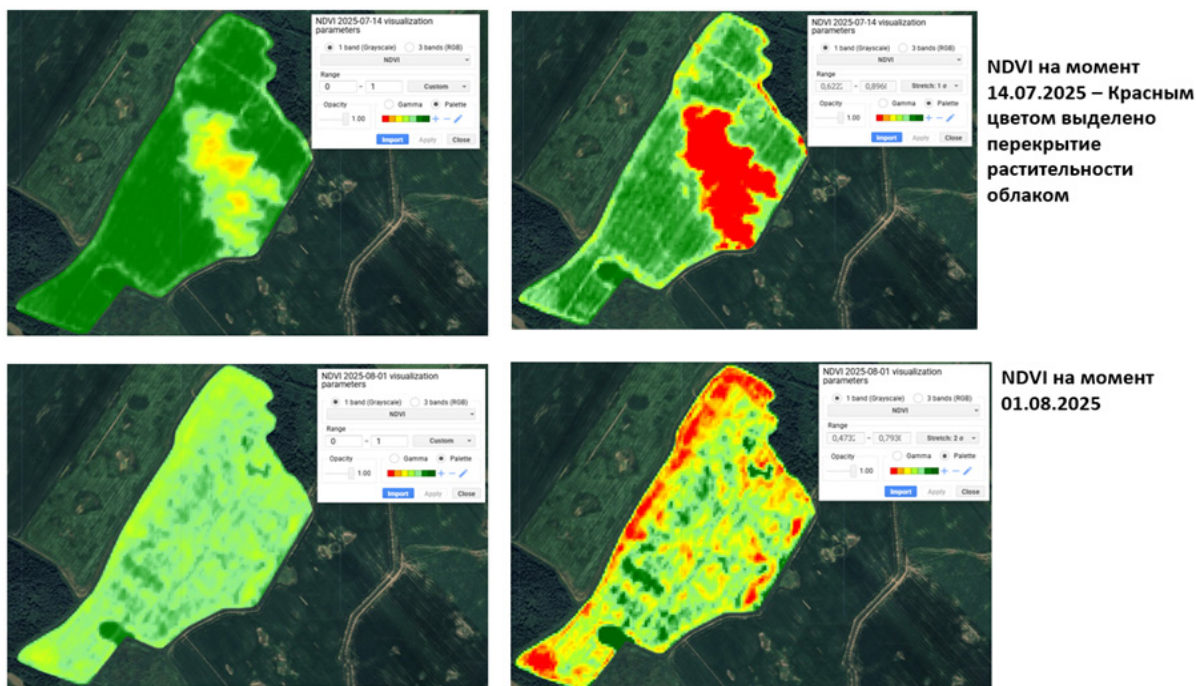
По данным ряда снимков, средний показатель NDVI принимал более низкие значения 0,42–0,59 (в разных сценах из коллекции снимков в первой половине июня). Ярко-желтые лепестки при цветении частично прикрывают зеленую листву, что снижает суммарное отражение в ближнем ИК-диапазоне (NIR) и, соответственно, величину NDVI. В среднем в июле медианный NDVI снижался до 0,45, а разброс значений несколько увеличивался по сравнению с пиковым состоянием: стандартное отклонение могло достигать 0,05–0,08, V соответствовал 10–15%. Появились более выраженные участки, характеризующие пестроту развития растений. В распределении пикселей присутствовали участки со значениями NDVI < 0,25 и > 0,75. Стоит отметить, что в данном случае индекс NDVI вполне мог быть завышенным для разреженных посевов и где формируется подрост, поскольку степень покрытия листовой поверхностью почвы определялась не только растениями в фазе цветения, но и прочими растениями, которые в своем

развитии либо отстали от основной массы, либо являются сорными растениями в посевах озимого рапса.

Налив семян

Во второй половине июля показатель NDVI выходил на плато: на 19 июля медианный показатель составлял около 0,53, межквартильный размах – 0,45–0,60, крайние перцентили (5–95%) – 0,30–0,65. Коэффициент вариации возрастал до 20–30%, что показывает рост внутривариабельности мозаичности – часть растений еще наливает семена, часть уже начала подсыхать. Такое смешение высоких и низких значений свидетельствует о неодновременности созревания и различии в обеспеченности влагой и питанием. К этому моменту стандартное отклонение достигло 0,10, коэффициент вариации – 20–30%.

К концу июля – началу августа показатель NDVI более активно снизился. На 6 августа средний NDVI по полю составлял 0,24 и снизился почти до нулевых значений, характерных для предуборочного состояния, когда растения полностью



Примечание. Левая часть изображения – контрастирование на 0–1, правая часть – контрастирование $\mu \pm \sigma$.

Рис. 5. Картограммы NDVI на отдельных сценах Sentinel-2

Источник: данные исследований авторов.

потеряли зеленую массу. На спутниковом снимке от 15 августа NDVI снизился до 0,17. Распределение NDVI в этот период сместилось к нулю: медиана 0,15, большинство значений близки к 0,1. Лишь в отдельных точках отмечались чуть более высокие значения (до 0,2–0,3), что может указывать на небольшие участки с сохранившимся сорняком или побегам (падалицей рапса, начавшей прорастать сразу после уборки). В целом же коэффициент вариации в августе снова вырос (до 50–60%), но это уже во многом объясняется эффектом близости средних значений к нулю. На *рис. 5* представлены картограммы NDVI на отдельных сценах Sentinel-2.

Фаза созревания и уборка

К началу августа NDVI снижался более активно: на 6 августа медианный показатель составлял 0,24, а на 15 августа – около 0,20. После уборки значения не превышали 0,2, а распределение пикселей было однородным при среднеквадратичном отклонении, принимающим значения, близкие к нулю.

NDVI для исследуемого участка в 2025 году изменялся в диапазоне от 0,1–0,2 до 0,8, отражая ход развития культуры. Средний по полю NDVI за сезон составил 0,5–0,6. Медианные значения и перцентили NDVI показали характерные фазы: весной – умеренный NDVI 0,3–0,4 с большим разбросом (гетерогенность вследствие перезимовки), в период бутонизации – пик NDVI 0,7–0,8 и наивысшая однородность (минимальный разброс), при цветении – снижение NDVI до 0,5–0,6 и рост неоднородности, в фазе созревания – резкое падение NDVI < 0,2 и очень широкое распределение, после уборки – второй минимум. Для наглядного анализа были построены картограммы NDVI на каждую дату съемки. На *рис. 6, 7* приведены примеры таких карт в ключевые фенологические фазы развития озимого рапса. Использована единая цветовая шкала NDVI = 0,2–0,9 (см. *рис. 6*). Отдельно для каждой даты строились контрастированные карты NDVI с индивидуальной настройкой диапазона ($\mu \pm \sigma$; см. *рис. 7*).

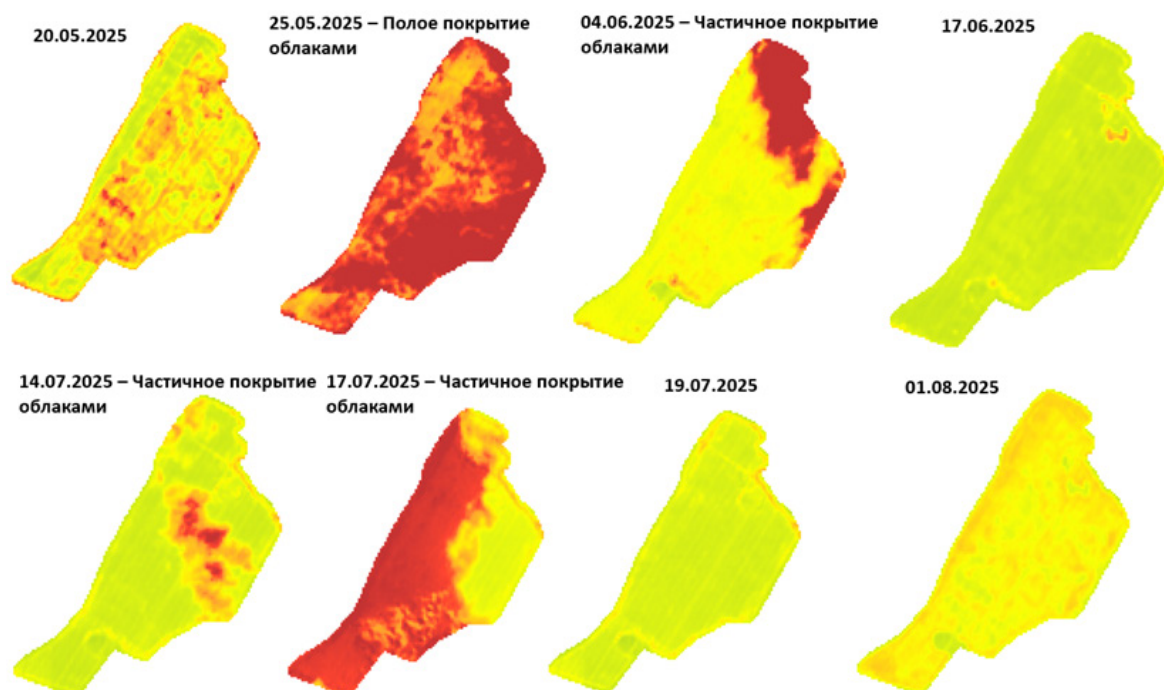


Рис. 6. Картограммы NDVI на отдельных сценах Sentinel-2, 1-верх цветовая шкала NDVI = 0,2–0,9

Источник: данные исследований авторов.

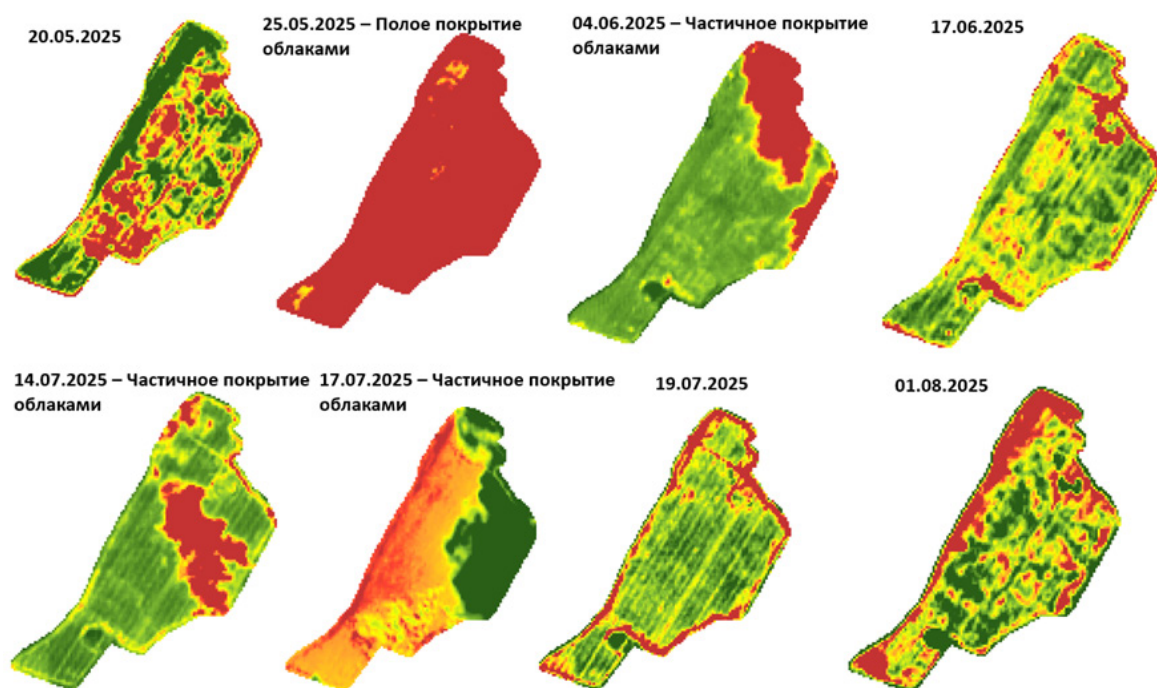


Рис. 7. Картограммы NDVI на отдельных сценах Sentinel-2, 1-верх цветовая шкала $\mu \pm \sigma$

Источник: данные исследований авторов.

Так, на контрастной карте 17 июня стали различимы участки с несколько пониженным NDVI (0,55) среди общего плотного фона 0,60 – такие отклонения могли быть вызваны локальным дефицитом питания

или влиянием рельефа. На общей картограмме без контрастирования (с общей шкалой 0,2–0,9) эти зоны практически не отличались по цвету. В период цветения, наоборот, контрастная визуализация под-

Таблица. Сводная информация о медианных значениях и диапазонах NDVI по фенологическим этапам

Период наблюдений (2025 год)	Фенологическая фаза	Медианный NDVI (p50)	Диапазон 5–95% p05–p95
20–31 мая	Весенняя вегетация	0,60–0,75	0,55–0,85
1–10 июня	Активное отрастание перед бутонизацией	0,70–0,80	0,60–0,90
10–28 июня	Цветение	0,30–0,60	0,15–0,85
28 июня – 20 июля	Налив семян	0,75–0,85	0,55–0,90
24 июля – 6 августа	Созревание	0,20–0,30	0,10–0,45
15 августа и позднее	Предуборочный период	0,15–0,20	0,05–0,30
Источник: данные исследований авторов.			

черкнула участки, где происходил переход к цветению на фоне общего снижения индекса. Таким образом, фиксированная шкала давала возможность сравнить абсолютный уровень NDVI по сезонам, а динамически-контрастированная – обнаружить отклонения и аномалии развития внутри поля в каждый конкретный момент.

В табл. приведены медианные значения и диапазоны NDVI (5–95%) для ключевых фенологических этапов.

Полученная информация имеет прямую практическую ценность для планирования дифференцированных операций и наземной верификации агроэкологических ограничений при возделывании сельскохозяйственных культур, а также оптимизации процесса отбора проб почв для проведения агрохимических анализов, фитосанитарного мониторинга и аэрофотосъемки с использованием БПЛА. Для корректировки агротехники в ходе сезона по картам неоднородности и кластерам NDVI возможно планирование дифференцированных операций в рамках агротехнологий. Также неоднородность NDVI частично позволяет идентифицировать причины неоднородности развития растений: например, выявление переувлажненных мест позволит предпринять меры в будущем – от мелиорации (дрена-

жа) до изменения схемы применения удобрений. В перспективе интеграция таких данных в систему точного земледелия (например, создание карт заданий для тракторов с дифференцированным внесением) поможет еще больше увеличить рентабельность при возделывании полевых культур.

Выводы и предложения

Использование спутниковых данных Sentinel-2 при мониторинге посевов представляет собой инструмент предварительной оценки пространственной неоднородности агроландшафтов. Пригодные к анализу сцены, несмотря на ограниченное количество вследствие облачности и сниженного пространственного разрешения, позволяют установить общие тенденции и выделить зоны с отклонениями в росте и развитии культуры. Получаемая информация обеспечивает хороший уровень детализации неоднородности развития растений внутри одного ареала агроландшафта, но, тем не менее, требует привлечения наземных обследований или более детальной съемки. В этих условиях спутниковый мониторинг следует рассматривать в качестве вспомогательного источника данных, дополняющего последующие этапы агроэкологического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

- Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С. (2015). Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. № 77. С. 51–65.
- Савин И.Ю., Шишконокова Е.А., Прудникова Е.Ю. [и др.] (2020). О влиянии засоренности посевов озимой пшеницы на их спектральную отражательную способность // Сельскохозяйственная биология. Т. 55. № 1. С. 53–65.
- Хутуев А.М., Занилов А.Х., Тутукова Д.А. [и др.] (2024). NDVI посевов как дистанционный индикатор качества пахотных почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. № 121. С. 70–85. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-70-85
- Atzberger C. (2013). Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949–981. DOI: 10.3390/rs5020949
- Benedetti R., Rossinni P. (1993). On the Use of NDVI Profiles as a Tool for Agricultural Statistics: The Case Study of Wheat Yield Estimate and Forecast in Emilia Romagna. *Remote Sensing of Environment*, 45, 311–326.
- Groten S.M.E. (1993). NDVI Crop Monitoring and Early Yield Assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 14(8), 1495–1515.
- Liu W.T., Kogan F. (2002). Monitoring Brazilian Soybean Production Using NOAA/AVHRR Based Vegetation Condition Indices. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1161–1179.
- Mamabolo E., Mashala M.J., Mugari E. [et al.] (2025). Application of precision agriculture technologies for crop protection and soil health. *Smart Agricultural Technology*, 12, article 101270. DOI: 10.1016/j.atech.2025.101270
- Omia E., Bae H., Park E. [et al.] (2023). Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sensing*, 15(2), 354. DOI: 10.3390/rs15020354
- Schepers J. (2019). Precision agriculture for sustainability. *Precision Agriculture*, 20, 1–3. DOI: 10.1007/s11119-018-09627-5

Сведения об авторах

Артем Анатольевич Прохоров – ассистент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (Российская Федерация, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; e-mail: artem.prokhorov.2016@inbox.ru)

Александр Леонидович Бирюков – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина (Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, д. 2; e-mail: biryukov_alex@mail.ru)

Александр Владимирович Ерегин – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Ленина, д. 14; e-mail: szniirast@mail.ru)

Антон Олегович Зубов – главный агроном, Сельскохозяйственный потребительский кооператив – колхоз «Передовой» (Российская Федерация, 160533, Вологодская область, Вологодский район, с. Кубенское, ул. Ильюшина, д. 8)

SATELLITE MONITORING OF WINTER RAPESEED CROPS BASED ON SENTINEL-2 DATA TO ASSESS VEGETATION DYNAMICS AND SPATIAL HETEROGENEITY IN THE VOLOGDA REGION

Prokhorov A.A., Biryukov A.L., Eregerin A.V., Zubov A.O.

The paper presents the results of monitoring winter rapeseed crops in the growing season of 2025 (May – September), based on data from the Sentinel-2 multispectral satellite system (ESA Copernicus mission). For the analysis, L2A level scenes (atmospherically adjusted) were used, which were pre-processed: cloud masking, mosaic merging, and cropping along the contour of the field. The values of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) index as an integral indicator of the state of crops have been calculated. Statistical metrics (mean, median, standard deviation, coefficient of variation, percentiles), as well as visualization of data through cartograms with a fixed and contrasting scale ($\mu \pm \sigma$) were used to assess the spatiotemporal dynamics. We found that the NDVI of crops per season varied in the range of 0.1–0.8, demonstrating characteristic phases of development: spring resumption of vegetation (NDVI 0.3–0.4), budding and maximum biomass (NDVI up to 0.7–0.8, minimum in-field variability), flowering phase (decrease in NDVI to 0.5) and subsequent maturation with a sharp drop in values (<0.2). It is shown that cloud cover significantly limits the practical applicability of satellite monitoring: out of 42 scenes per season, only 32 were suitable for analysis. Despite this, Sentinel-2 data revealed persistent spatial anomalies and areas of potential productivity decline. We noted that it is necessary to combine satellite observations with aerial photography and agrochemical surveys to ensure prompt and detailed monitoring of the condition of crops. Contrast visualization is presented to identify weak anomalies in case of heterogeneity of vegetation within one elementary area of the agricultural landscape. The adaptation of statistical metrics for the analysis of spatial heterogeneity has been performed.

Remote sensing data, monitoring of plant condition, productivity of agricultural landscapes, vegetation indices.

REFERENCES

- Atzberger C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949–981. DOI: 10.3390/rs5020949
- Benedetti R., Rossinni P. (1993). On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. *Remote Sensing of Environment*, 45, 311–326.
- Groten S.M.E. (1993). NDVI crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 14(8), 1495–1515.
- Khutuev A.M., Zanirov A.Kh., Tutukova D.A. et al. (2024). NDVI of crops as a remote indicator of arable soil quality. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 121, 70–85. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-70-85 (in Russian).
- Liu W.T., Kogan F. (2002). Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1161–1179.

- Mamabolo E., Mashala M.J., Mugari E. et al. (2025). Application of precision agriculture technologies for crop protection and soil health. *Smart Agricultural Technology*, 12, article 101270. DOI: 10.1016/j.atech.2025.101270
- Omia E., Bae H., Park E. et al. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*, 15(2), 354. DOI: 10.3390/rs15020354
- Savin I.Yu., Shishkonakova E.A., Prudnikova E.Yu. et al. (2020). On the effect of contamination of winter wheat crops on their spectral reflectivity. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 55(1), 53–65 (in Russian).
- Savin I.Yu., Tanov E.R., Kharzinov S. (2015). The use of the NDVI vegetation index to assess the quality of arable soils using the example of the Baksan region of Kabardino-Balkaria. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 77, 51–65 (in Russian).
- Schepers J. (2019). Precision agriculture for sustainability. *Precision Agriculture*, 20, 1–3. DOI: 10.1007/s11119-018-09627-5

Information about the authors

Artem A. Prokhorov – assistant, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazeva Street, Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: artem.prokhorov.2016@inbox.ru)

Aleksandr L. Biryukov – Candidate of Sciences (Technology), Associate Professor, head of department, Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin (2, Shmidt Street, Molochnoe Rural Settlement, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: biryukov_alex@mail.ru)

Aleksandr V. Eregin – Candidate of Sciences (Agriculture), Leading Researcher, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (14, Lenin Street, Molochnoe Rural Settlement, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: szniirast@mail.ru)

Anton O. Zubov – chief agronomist, Integrated Agricultural Production Centre-Kolkhoz “Peredovoi” (8, Ilyushina Steet, Kubenskoe Village Settlement, Vologodsky District, Vologda Region, 160533, Russian Federation)