

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGIES



УДК 528.85:631.459:004.8

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2587-8999-2026-10-3-49-57>


Индексный алгоритм детекции признаков водной эрозии почв по мультиспектральным данным *Sentinel-2* и его верификация на натурных данных территорий Ростовской области и Краснодарского края

В.А. Благин^{ID}, В.А. Берая^{ID}

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ blagin.inbox@gmail.com

Аннотация

Введение. Работа посвящена разработке и валидации индексного алгоритма выявления признаков водной эрозии почв по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) *Sentinel-2*, рассматриваемого как первый практический этап построения гибридной физико-математической модели переноса массы с нейросетевой параметрической идентификацией.

Материалы и методы. Алгоритм основан на совместном анализе временных рядов вегетационного индекса *NDVI* и индекса оголенности почвы *BSI* с последующей детекцией пространственных изменений (ΔBSI) с пороговой фильтрацией по 90-му процентиллю. Работоспособность алгоритма проверена на модельных (синтетических) данных, после чего проведена верификация на натурных данных — реальных снимках *Sentinel-2* для двух тестовых территорий — Каменского района Ростовской области и окрестностей с. Молдаванское Крымского района Краснодарского края — с временным охватом 10 дат за 2024 год.

Результаты исследования. Авторами установлено, что алгоритм устойчиво выделяет пространственно-локализованные зоны роста оголенности почвы.

Обсуждение. Определено ограничение метода, связанное с неразличимостью эрозионного и агротехнического происхождения оголения, а также намечены пути его устранения (привязка к цифровой модели рельефа, многолетний анализ).

Заключение. Разработан и валидирован индексный алгоритм детекции признаков водной эрозии почв по временным рядам мультиспектральных снимков *Sentinel-2*, основанный на совместном анализе индексов *NDVI* и *BSI* с пространственной детекцией изменений. Алгоритм верифицирован на модельных данных и применен к реальным снимкам для двух тестовых территорий юга России, что подтвердило его работоспособность при одновременном выявлении принципиального ограничения — неразличимости эрозионного и агротехнического происхождения оголения почвы в пределах одного сезона наблюдений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, *Sentinel-2*, водная эрозия почв, вегетационный индекс *NDVI*, индекс оголенности почвы *BSI*, детекция изменений, математическое моделирование, нейросетевая идентификация параметров

Для цитирования. Благин В.А., Берая В.А. Индексный алгоритм детекции признаков водной эрозии почв по мультиспектральным данным *Sentinel-2* и его верификация на натурных данных территорий Ростовской области и Краснодарского края. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2026;10(3):49–57. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2026-10-3-49-57>

An Index-Based Algorithm for Detecting Water Soil Erosion Indicators from *Sentinel-2* Multispectral Data and Its Verification on Field Data of Rostov Oblast and Krasnodar Krai

Vyacheslav A. Blagin^{ID}, Vladimir A. Beraia^{ID}

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ blagin.inbox@gmail.com

Abstract

Introduction. The paper presents the development and testing of an index-based algorithm for detecting indicators of soil erosion by water from *Sentinel-2* remote sensing data, considered as the first practical stage in constructing a hybrid physics-based mass-transport model with neural-network parameter identification.

Materials and Methods. The algorithm relies on joint analysis of time series of the Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) and the Bare Soil Index (*BSI*), followed by spatial change detection (ΔBSI) with threshold filtering at the 90th percentile. The algorithm was first validated on synthetic data and then applied to real *Sentinel-2* imagery for two test sites — the Kamensky District of Rostov Oblast and the vicinity of Moldovanskoye village, Krymsky District, Krasnodar Krai — covering 10 dates within 2024.

Results. The algorithm is shown to consistently identify spatially localised zones of increasing bare-soil exposure.

Discussion. A key limitation – the inability to distinguish erosion-related exposure from ordinary agrotechnical bare soil — is discussed, along with directions for resolving it (digital elevation model overlay, multi-year analysis).

Conclusion. An index-based algorithm for detecting indicators of water-induced soil erosion from *Sentinel-2* multispectral time series was developed and validated. Verification on synthetic data and application to two real test areas in southern Russia confirmed its operability while demonstrating the need to separate erosion-related changes from agricultural soil exposure in subsequent model development.

Keywords: remote sensing, *Sentinel-2*, water soil erosion, *NDVI* vegetation index, *BSI* bare soil index, change detection, mathematical modelling, neural network parameter identification

For Citation. Blagin V.A., Beraia V.A. An Index-Based Algorithm for Detecting Water Soil Erosion Indicators from *Sentinel-2* Multispectral Data and Its Verification on Field Data of Rostov Oblast and Krasnodar Krai. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2026;10(3);49–57. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2026-10-3-49-57>

Введение. Водная эрозия почв (плоскостная и овражная) остается одной из наиболее значимых угроз сельскохозяйственному потенциалу черноземных территорий юга России. Традиционные методы почвенно-эрозийного картографирования (крупномасштабные полевые обследования, картосхемы генерализованного масштаба) не обеспечивают оперативности, необходимой для мониторинга динамики процесса, тогда как данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников *Sentinel-2* позволяют получать регулярные (раз в 5 дней) мультиспектральные снимки территории с пространственным разрешением 10 м/пиксель на бесплатной основе.

Задача настоящего исследования формулируется как построение гибридной модели, сочетающей физико-математическое описание переноса массы и нейросетевую идентификацию параметров этой модели по данным ДЗЗ. Настоящая работа представляет результаты первого этапа: разработку и валидацию индексного алгоритма извлечения признаков эрозии из снимков *Sentinel-2*, который в дальнейшем послужит источником входных данных для нейросетевого идентификатора параметров физической модели.

Анализ публикаций в области компьютерных наук показал, что исследований, в которых были бы одновременно объединены физико-математическая модель переноса массы, нейросетевая идентификация параметров и данные ДЗЗ применительно к водной эрозии почв, ранее не проводилось. Близкие по методологии работы ведутся в трех направлениях, не перекрывающих друг друга:

- модели транспорта наносов в прибрежных системах на основе схем расщепления и экономичных параллельных алгоритмов [1–3];
- нейросетевые методы обработки спутниковых снимков для мониторинга водоемов и прибрежных систем [4];
- применение *RUSLE/USLE* и их модификаций совместно с ДЗЗ и машинным обучением для оценки эрозийного риска [5–8].

Спектральные индексы (в первую очередь *NDVI* и *BSI*) являются стандартным входным слоем для моделей класса *RUSLE*+ДЗЗ [5, 6] и для гибридных *physics-informed* моделей, где нейросеть выступает идентификатором физических параметров по уже подготовленным, физически интерпретируемым полям наблюдений [9–12]. Отсюда следует, что построение и верификация временного ряда индексов *NDVI/BSI* с алгоритмом детекции изменений является необходимым предварительным этапом, предшествующим встраиванию нейросети в физико-математическую модель переноса массы. Соответствующая модель, ориентировочно основанная на уравнении диффузии-конвекции-реакции для концентрации взвешенного вещества $c(x, y, z, t)$ и уравнении неразрывности твердой фазы для динамики поверхности (аналогично [1, 2], адаптированному на склоновый сток через уравнения мелкой воды), рассматривается как объект дальнейших этапов исследования.

Материалы и методы.

1. Используемые данные. В работе используются мультиспектральные снимки *Sentinel-2* уровня обработки *L2A*, получаемые через сервис *Copernicus Data Space Ecosystem*. Для расчета индексов используются 5 спектральных каналов с разрешением 10 м/пиксель:

Таблица 1

Спектральные каналы *Sentinel-2*, используемые для расчёта индексов

Канал	Название	Длина волны
<i>B02</i>	Синий (<i>Blue</i>)	~490 нм
<i>B03</i>	Зеленый (<i>Green</i>)	~560 нм
<i>B04</i>	Красный (<i>Red</i>)	~665 нм
<i>B08</i>	Ближний ИК (<i>NIR</i>)	~842 нм
<i>B11</i>	Коротковолновый ИК (<i>SWIR</i>)	~1610 нм

2. Спектральные индексы. Индекс вегетации *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) вычисляется как

$$NDVI = (B08 - B04) / (B08 + B04). \quad (1)$$

Индекс *NDVI* принимает значения от -1 до $+1$; высокие значения соответствуют здоровой растительности за счет резкого возрастания отражения в ближнем ИК-диапазоне относительно красного, обусловленного клеточной структурой листа.

Индекс оголенности почвы *BSI* (*Bare Soil Index*) вычисляется как

$$BSI = ((B11 + B04) - (B08 + B02)) / (B11 + B04) + (B08 + B02). \quad (2)$$

Положительные значения *BSI* характерны для открытой почвы (повышенное отражение в *SWIR* и красном диапазоне), отрицательные — для растительности и водных объектов.

3. Временной анализ и детекция изменений. Для разделения устойчивого эрозионного сигнала от сезонной агротехнической динамики (пар, жнивьё, вспашка) индексы (1)–(2) рассчитываются для временного ряда из N дат в пределах одного вегетационного сезона (в настоящей работе $N = 10$, шаг ~5 недель). Признаком вероятной эрозии считается не единичное низкое значение *NDVI*, а его стабильность на протяжении всего сезона на фоне сезонной динамики окружающих участков.

Пространственное изменение оголенности оценивается разностью ΔBSI между конечной и начальной датами наблюдения:

$$\Delta BSI = BSI(t_N) - BSI(t_1). \quad (3)$$

Перед вычислением разности (3) каждая карта *BSI* подвергается пространственному сглаживанию фильтром Гаусса для устранения пиксельного шума сенсора, не связанного с реальными пространственными структурами поверхности. Пиксели, для которых сглаженное значение ΔBSI превышает 90-й процентиль распределения по всей сцене, классифицируются как зоны вероятного активного расширения эрозии.

4. Обобщенный алгоритм.

1. Формирование временного ряда из N снимков *Sentinel-2* одного участка за вегетационный сезон.
2. Расчет индексов *NDVI* (1) и *BSI* (2) для каждой даты по всем пикселям сцены.
3. Анализ сезонной динамики *NDVI* для отделения устойчиво низких значений (потенциальная эрозия) от временного снижения, обусловленного агротехникой.
4. Расчет разности ΔBSI (3) между конечной и начальной датами.
5. Пространственное сглаживание карты ΔBSI фильтром Гаусса.
6. Пороговая классификация: выделение пикселей с ΔBSI выше 90-го процентиля как зон вероятной эрозии.

Результаты исследования.

1. Верификация алгоритма на модельных данных. Перед применением к реальным снимкам алгоритм был верифицирован на синтетически сгенерированной сцене, воспроизводящей поле с извилистой балкой: задавались сезонная динамика вегетации на поле и контролируемое расширение оголенной зоны по краям балки в течение года. Результаты (рис. 1) показывают, что итоговая маска детекции (шаг 6 алгоритма) корректно локализуется вдоль краев балки — именно там, где было задано расширение оголенности, что подтверждает корректность реализации алгоритма независимо от качества входных данных.

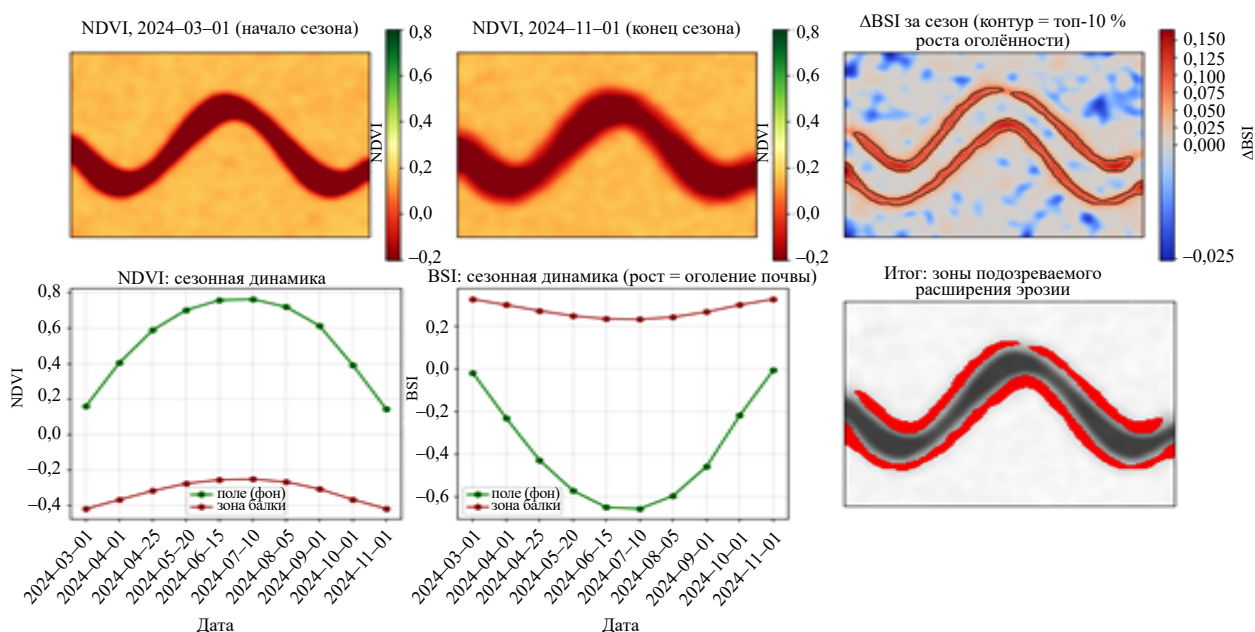


Рис. 1. Верификация алгоритма на модельных данных: *NDVI* на начало и конец сезона, карта ΔBSI с детекцией, временные ряды *NDVI/BSI* для зоны балки и фона, итоговая маска зон роста эрозии

2. Верификация на натуральных данных: Каменский район Ростовской области. Тестовый полигон площадью $\sim 10 \times 8$ км расположен в зоне Донецкого кряжа (48.28° с. ш., 40.20° в. д.) — типичный эрозионно-опасный участок с выраженной балочно-овражной сетью. По результатам расчета (рис. 2) средний *NDVI* по кадру демонстрирует характерный для озимых культур профиль: рост с 0,10 в марте до пика 0,59 в конце апреля с последующим снижением к 0,13 в ноябре (уборка и последующая обработка почвы). Карта ΔBSI выделяет компактные кластеры роста оголенности, пространственно совпадающие с отдельными сельскохозяйственными полями.

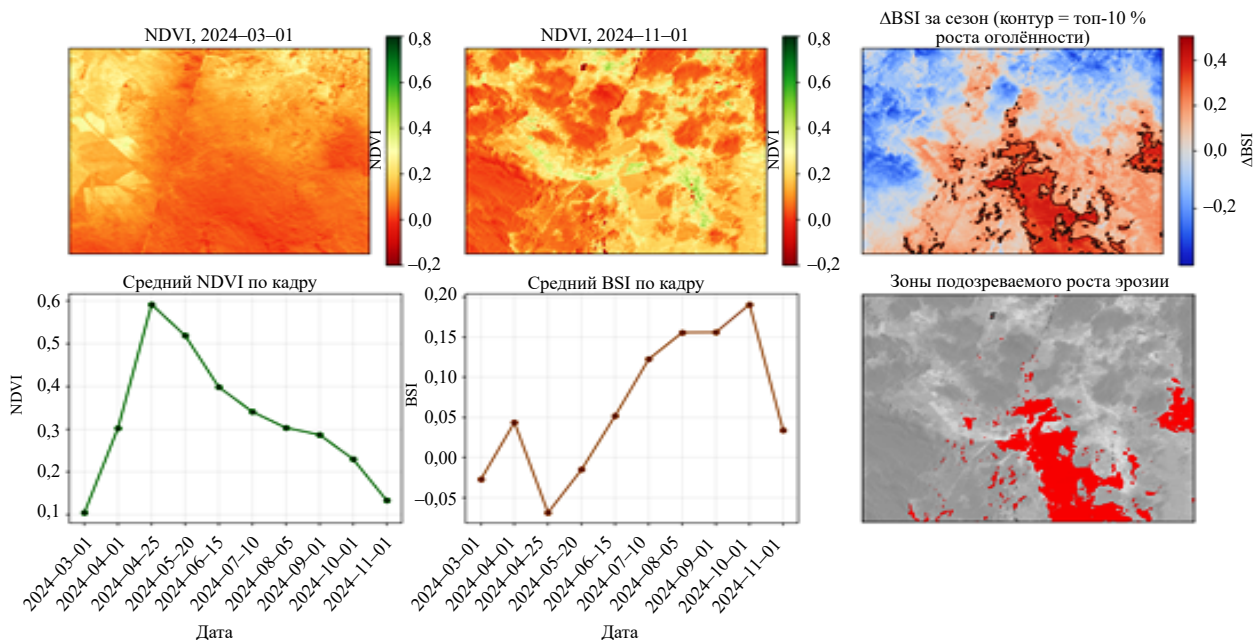


Рис. 2. Результаты применения алгоритма к данным *Sentinel-2* для Каменского района Ростовской области (2024 г.)

Форма выделенных зон (компактные пятна в пределах контуров полей, а не вытянутые вдоль элементов рельефа структуры) указывает на вероятную агротехническую природу большей части обнаруженных изменений (уборка урожая, вспашка) наряду с возможным вкладом активной эрозии — различие этих двух причин по данным одного сезона ограничено.

3. Верификация на натуральных данных: с. Молдаванское, Крымский район, Краснодарский край. Второй тестовый полигон ($44,9458^\circ$ с. ш., $37,8703^\circ$ в. д., площадь $\sim 10 \times 8$ км) выбран для сопоставления результатов ал-

горитма на территории с иной структурой землепользования. Средний $NDVI$ здесь выше и стабильнее в течение сезона (пик 0,70, снижение к ноябрю лишь до 0,47), что указывает на присутствие многолетних насаждений наряду с пашней. Карта ΔBSI (рис. 3) показывает несколько крупных прямоугольных зон роста оголенности, по форме точно совпадающих с границами отдельных полей — это еще более явно, чем для первого полигона, указывает на агротехническую природу изменений.

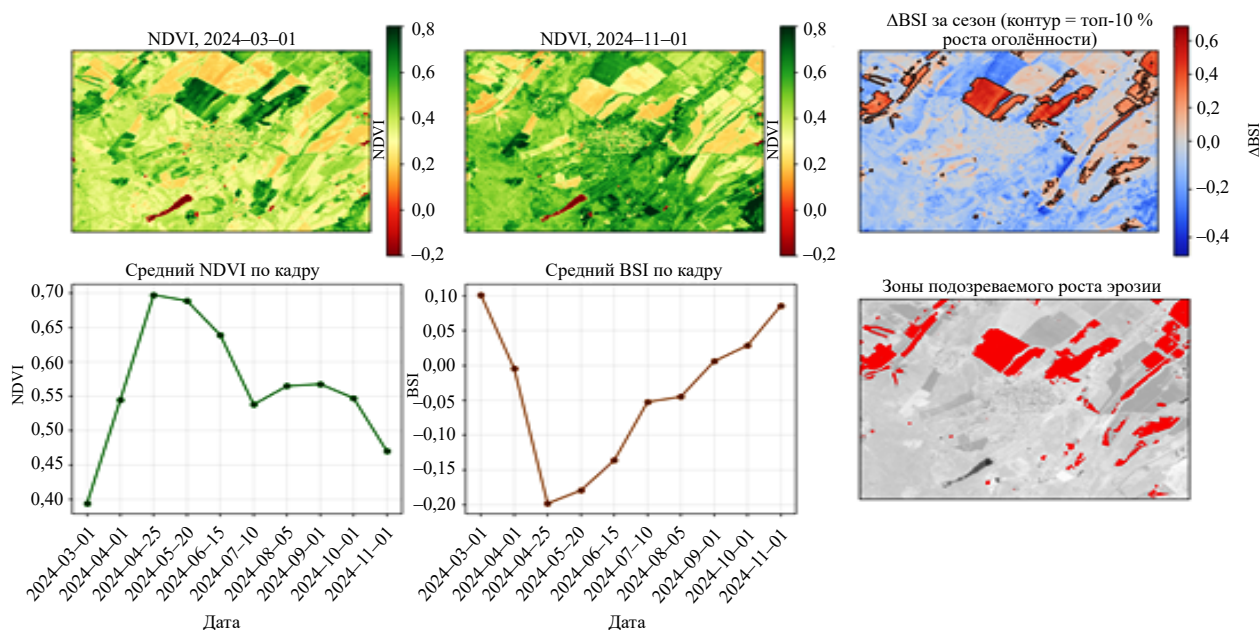


Рис. 3. Результаты применения алгоритма к данным *Sentinel-2* для окрестностей с. Молдаванское (2024 г.)

4. Иллюстрации данных дистанционного зондирования. На рис. 4, 5 приведена полная серия из 10 использованных снимков *Sentinel-2* за 2024 год для тестового полигона в Каменском районе в двух цветовых представлениях — натуральном (*True Color*, $R = B04$, $G = B03$, $B = B02$) и цветном инфракрасном (*False Color NIR*, $R = B08$, $G = B04$, $B = B03$), в котором растительность отображается красным, а оголенная почва — темными или голубоватыми тонами. Аналогичный набор данных получен и для тестового полигона у с. Молдаванское (использован при построении рис. 3).



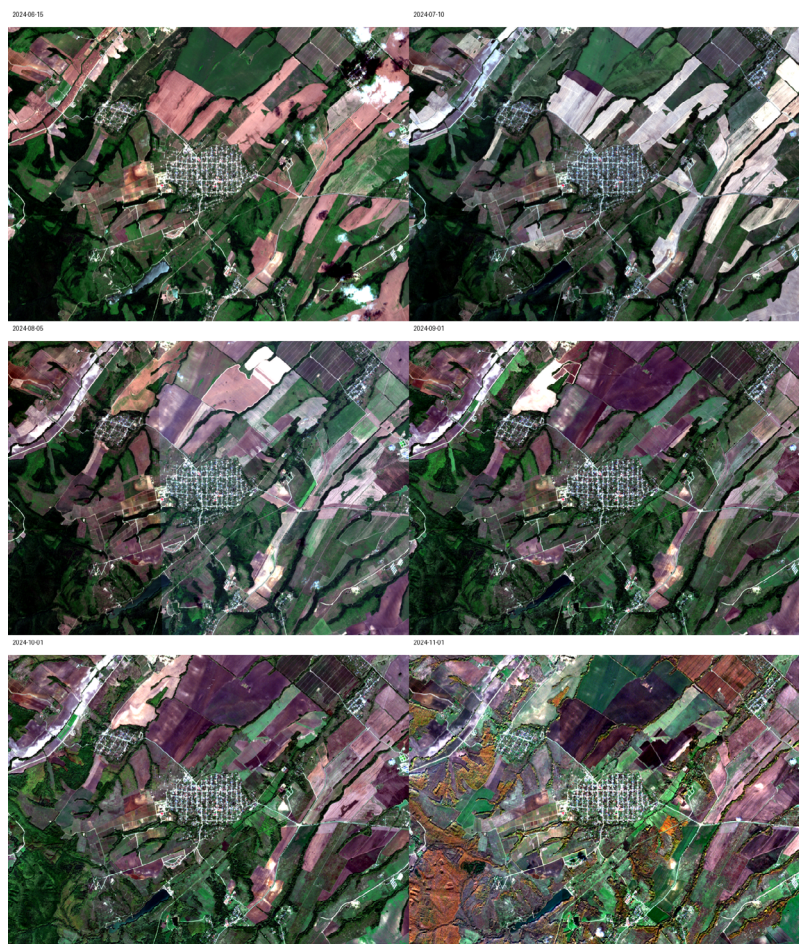
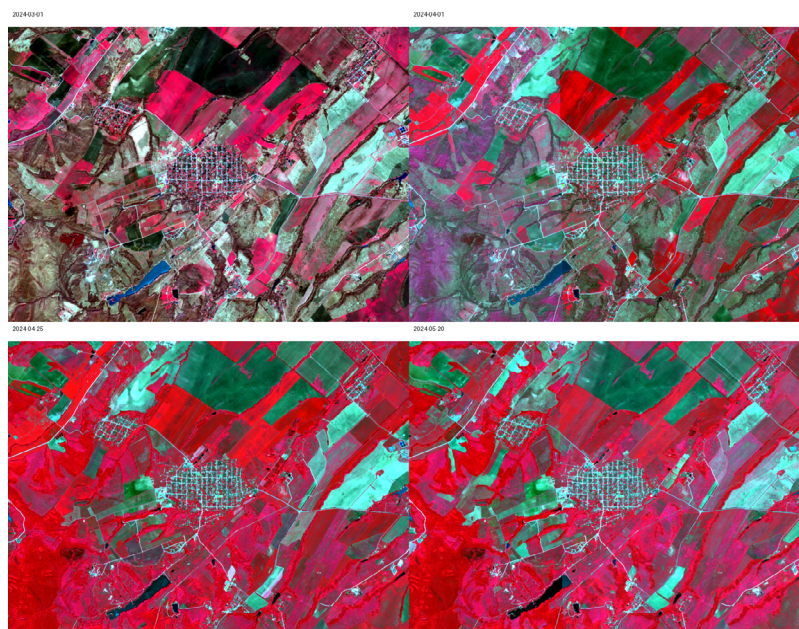


Рис. 4. Временной ряд снимков *Sentinel-2* для Каменского района, 2024 г.
(натуральный цвет, 10 дат)



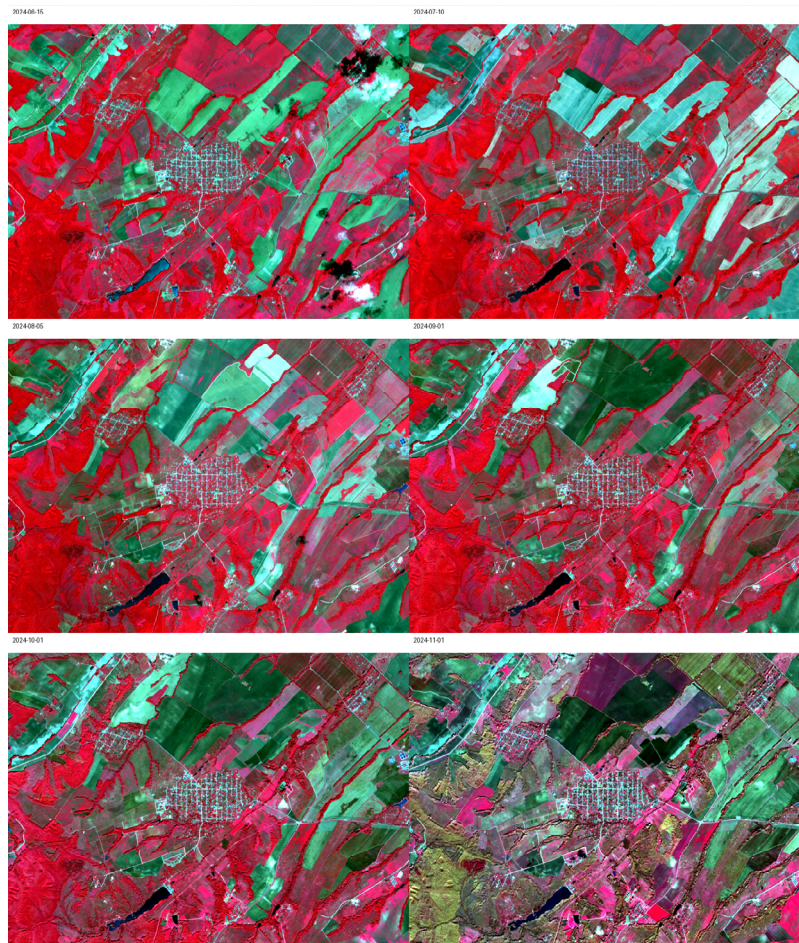


Рис. 5. Временной ряд снимков *Sentinel-2* для Каменского района, 2024 г.
(цветной инфракрасный композит, 10 дат)

Обсуждение. Верификация на натурных данных для двух территорий подтвердила работоспособность алгоритма: во всех случаях детекция дает пространственно локализованные, интерпретируемые структуры, а не случайный шум. Одновременно выявлено принципиальное ограничение используемого индексного подхода — невозможность различить оголение почвы, вызванное эрозией, и оголение вследствие обычной агротехники (уборка, вспашка, пар) в пределах одного вегетационного сезона, поскольку оба случая дают одинаковый рост *BSI*. Устранение этого ограничения предполагается за счет:

- перехода от одного сезона к многолетнему ряду наблюдений (устойчивый межгодовой рост *BSI* — более сильный признак эрозии, чем разовое сезонное изменение);
- совместного анализа с цифровой моделью рельефа (эрозия географически привязана к склонам и днищам балок, в отличие от регулярной агротехники);
- наложения границ сельскохозяйственных полей для исключения плановой агротехнической обработки из детекции.

Заключение. В работе разработан и валидирован индексный алгоритм детекции признаков водной эрозии почв по временным рядам мультиспектральных снимков *Sentinel-2*, основанный на совместном анализе индексов *NDVI* и *BSI* с пространственной детекцией изменений. Алгоритм верифицирован на модельных данных и применен к реальным снимкам для двух тестовых территорий юга России, что подтвердило его работоспособность при одновременном выявлении принципиального ограничения — неразличимости эрозионного и агротехнического происхождения оголения почвы в пределах одного сезона наблюдений.

Результаты настоящего этапа рассматриваются как источник входных данных для последующей идентификации параметров физико-математической модели переноса массы (в частности, коэффициента эродированности почвы или источников члена уравнения диффузии-конвекции-реакции) посредством нейросетевого *physics-informed* компонента — что составляет предмет дальнейших исследований.

Список литературы / References

1. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов. *Математическое моделирование*. 2013;25(12):65–82. <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs. *Mathematical Modelling*. 2013;25(12):65–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
2. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А., Сидорякина В.В., Проценко С.В. Комплекс объединенных моделей транспорта наносов и взвесей с учетом трехмерных гидродинамических процессов в прибрежной зоне. *Математическое моделирование*. 2020;32(2):3–23. <https://doi.org/10.20948/mm-2020-02-01>
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A., Sidoryakina V.V., Protsenko S.V. A complex of combined models for sediment and suspension transport considering three-dimensional hydrodynamic processes in the coastal zone. *Mathematical Modelling*. 2020;32(2):3–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.20948/mm-2020-02-01>
3. Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Адаптивный модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором. *Математическое моделирование*. 2012;24(1):3–20. <https://doi.org/10.1134/S2070048212040084>
- Sukhinov A.I., Chistyakov A.E. Adaptive modified alternating triangular iterative method for solving grid equations with a non-self-adjoint operator. *Mathematical Modelling*. 2012;24(1):3–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2070048212040084>
4. Сухинов А.И., Соломаха Д.А. Усовершенствованный метод распознавания объектов морских и прибрежных систем на основе комбинации метода локальных бинарных шаблонов и нейросетевых технологий. *Вычислительные методы и программирование*. 2025;26(3):366–379. <https://doi.org/10.26089/NumMet.v26r324>
- Sukhinov A.I., Solomakha D.A. An improved method for recognizing objects of marine and coastal systems based on a combination of the local binary patterns method and neural network technologies. *Computational Methods and Programming*. 2025;26(3):366–379. (In Russ.) <https://doi.org/10.26089/NumMet.v26r324>
5. Ларионов Г.А. *Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки*. М.: Изд-во МГУ; 1993. 198 с.
- Larionov G.A. *Soil erosion and deflation: main regularities and quantitative assessments*. Moscow: Moscow University Press; 1993. 198 p. (In Russ.)
6. Lanorte A., Cillis G., Calamita G., Nolè G., Pilogallo A., Tucci B. et al. Integrated approach of RUSLE, GIS and ESA Sentinel-2 satellite data for post-fire soil erosion assessment in Basilicata region (Southern Italy). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2019;10(1):1563–1595. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1578271>
7. Samarinas N., Tsakiridis N.L., Kalopesa E., Zalidis G.C. Soil Loss Estimation by Water Erosion in Agricultural Areas Introducing Artificial Intelligence Geospatial Layers into the RUSLE Model. *Land*. 2024;13(2):174. <https://doi.org/10.3390/land13020174>
8. Senanayake S., Pradhan B., Alamri A., Park H.-J. A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction. *Science of the Total Environment*. 2022;845:157220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157220>
9. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. 2019;378:686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
10. Tartakovsky A.M., Marrero C.O., Perdikaris P., Tartakovsky G.D., Barajas-Solano D. Physics-informed deep neural networks for learning parameters and constitutive relationships in subsurface flow problems. *Water Resources Research*. 2020;56(5):e2019WR026731. <https://doi.org/10.1029/2019WR026731>
11. Delcey M., Cheny Y., Keck J.-B., Gans A., Kiesgen de Richter S. Identification of settling velocity with physics informed neural networks for sediment laden flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2024;432:117389. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117389>
12. Dahal A., Lombardo L. Towards physics-informed neural networks for landslide prediction. *Engineering Geology*. 2025;344:107852. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107852>

Об авторах:

Вячеслав Анатолевич Благин, аспирант кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1010), blagin.inbox@gmail.com

Владимир Александрович Берая, аспирант кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1010), vberia@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В.А. Благин: постановка задачи; разработка алгоритма; проведение расчётов.

В.А. Берая: подготовка данных; верификация; формулировка результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vyacheslav A. Blagin, Postgraduate Student of the Department of Mathematics and Informatics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), blagin.inbox@gmail.com

Vladimir A. Beraia, Postgraduate Student of the Department of Mathematics and Informatics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), vberia@yandex.ru

Contributions of the authors:

V.A. Blagin: problem statement; algorithm development; conducting calculations.

V.A. Beraia: data preparation; verification; formulation of results.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 06.06.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 06.07.2026

Принята к публикации / Accepted 25.08.2026