Картографирование открытых почв Минской области по данным Sentinel-2 на основе спектральных индексов

Б. Чжао

Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Беларусь
E-mail: geozhao@outlook.com

Открытая почвенная поверхность — важный объект дистанционного зондирования сельскохозяйственных ландшафтов, однако её выделение затрудняется спектральным сходством с сухой растительностью, пожнивными остатками и светлыми антропогенными покрытиями. Для Беларуси методы картографирования открытых почв по данным Sentinel-2 изучены недостаточно. Цель работы — разработать и апробировать пороговый метод картографирования открытой почвенной поверхности Минской области на основе индексов BSI (*англ.* Bare Soil Index), NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и NDBI (*англ.* Normalized Difference Built-up Index). Снимки Sentinel-2 Level-2A за 2024 г. обрабатывались в GEE (*англ.* Google Earth Engine) с маскированием облаков, теней, снега и невалидных наблюдений по слою SCL (*англ.* Scene Classification Layer); для выбора порогов проанализировано 27 их комбинаций. Рабочие условия: BSI > 0,18, NDVI < 0,20, NDBI < 0,20. Оценка, выполненная по 1000 контрольных точек для каждого из кварталов Q2–Q4, показала, что общая точность составила 88,8–89,6 %, F1-мера — 87,7–88,6 %, а коэффициент каппа — 0,775–0,792. Модель RF_index, использующая только BSI, NDVI и NDBI, и модель RF_full, включающая спектральные каналы Sentinel-2 и индексы, повысили общую точность до 90,4–92,0 и 91,9–93,2 % соответственно. Основная доля выявленных открытых поверхностей приходилась на пахотнопригодные земли, однако внутри этого класса их доля не превышала 1,0–1,6 %. Предложенный подход пригоден для регионального картографирования сезонно открытой почвенной поверхности при локальной калибровке порогов, проверке сезонной устойчивости и оценке точности по контрольным точкам.

Ключевые слова: Sentinel-2, открытая почвенная поверхность, дистанционное зондирование Земли, BSI, NDVI, NDBI, пороговая классификация, Random Forest, сельскохозяйственные ландшафты, Минская область

Одобрена к печати: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-324-337

Введение

Открытая почвенная поверхность — важный объект дистанционного зондирования сельскохозяйственных территорий. Информация о её пространственном распределении используется для мониторинга пахотных земель, анализа сезонного состояния угодий и отбора спутниковых наблюдений, пригодных для изучения свойств верхнего горизонта почв (Антонов и др., 2018; Кравцов и др., 2017; Castaldi, 2021). Для этих задач широко применяются данные Sentinel-2, сочетающие пространственное разрешение 10–20 м, высокую повторяемость съёмки и спектральные каналы видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов; обработка многовременных рядов на региональном уровне может выполняться в GEE (*англ.* Google Earth Engine) (Drusch et al., 2012; Gorelick et al., 2017).

Для выявления открытых почв используются индексы BSI (*англ.* Bare Soil Index) (Rikimaru et al., 2002), NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974) и NDBI (*англ.* Normalized Difference Built-up Index) (Zha et al., 2003). Однако открытая почва может быть спектрально сходна с сухой растительностью, пожнивными остатками, дорогами, строительными площадками и смешанными пикселями, а её отклик зависит от влажности, цвета и шероховатости поверхности (Ben-Dor et al., 2009; Demattê et al., 2018; Dvorakova et al., 2023; Liu et al., 2022; Qi et al., 2024). Для уменьшения такого смешения предложены модифицированные почвенные индексы и комбинированные индексные подходы (Deng et al., 2015; Liu et al., 2022; Qiu et al., 2017).

В сельскохозяйственных ландшафтах умеренной зоны результат классификации дополнительно зависит от сезонной смены обработки почвы, развития посевов, уборки урожая, облачности, снежного покрова и числа валидных наблюдений. Многовременные ряды и сезонные композиты Sentinel-2 снижают зависимость от отдельной даты съёмки, но могут сглаживать кратковременные периоды оголения поверхности (Griffiths et al., 2019; Urbina-Salazar et al., 2023; Vaudour et al., 2021; Zepp et al., 2023; Zhu et al., 2024). Поэтому региональное применение пороговой классификации требует оценки чувствительности к порогам, сезонной устойчивости и сопоставления с контролируемыми методами классификации.

В Беларуси данные дистанционного зондирования применяются для мониторинга сельскохозяйственной деятельности, оценки состояния посевов и картографирования почвенных характеристик (Генин, Клебанович, 2018; Кравцов и др., 2017; Червань, Чжао, 2025). Однако исследования, систематически оценивающие сочетания порогов BSI, NDVI и NDBI, их сезонную переносимость, точность по контрольным точкам и связь результатов с типами земель и почвенно-гидрологическими условиями, представлены ограниченно. Цель исследования — разработать и апробировать методику картографирования открытой почвенной поверхности Минской области по данным Sentinel-2 на основе BSI, NDVI и NDBI. Решались задачи выбора порогов, оценки точности в кварталах Q2–Q4 2024 г., сравнения с методом RF (*англ.* Random Forest) и анализа распределения результатов по типам земель и классам увлажнения почв.

Материалы и методы

Исследование выполнено на территории Минской области Республики Беларусь (около 39,9 тыс. км^2), характеризующейся равнинным рельефом, значительной долей сельскохозяйственных земель и разнообразной структурой землепользования (*рис. 1*). Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга сельскохозяйственных земель Беларуси ранее рассматривалось в работах С.Л. Кравцова с соавторами (2017), С.А. Антонова с коллегами (2018), а также применялось для оценки почвенных свойств Минской области. Общая схема обработки данных и оценки точности представлена на *рис. 2.*

В качестве основных данных использовались снимки Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Level-2A за 2024 г., обработанные в GEE (Drusch et al., 2012; Gorelick et al., 2017). В анализ включались сцены, пересекавшие территорию исследования и удовлетворявшие условию CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE < 80 %, где CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE — служебный метаданный показатель Sentinel-2, характеризующий долю облачных пикселей в пределах сцены. Количество обработанных сцен по кварталам приведено в *табл. 1.* Основной анализ выполнялся для Q2–Q4; Q1 рассматривался только диагностически и был исключён из основной оценки из-за снежного покрова и повышенной неопределённости маскирования слоя SCL (*англ.* Scene Classification Layer) в зимних условиях.

Таблица 1. Использованные данные Sentinel-2

Сезон	Период	Количество сцен	Использование в анализе
Q1	Январь – март	173	Диагностически, не включён в основной анализ
Q2	Апрель – июнь	263	Основной анализ
Q3	Июль – сентябрь	356	Основной анализ
Q4	Октябрь – декабрь	113	Основной анализ с учётом снежно-оттепельной неопределённости
Всего	2024 г.	905	Обработанные сцены

Предварительная обработка включала перевод каналов Sentinel-2 в безразмерные значения поверхностной отражательной способности, маскирование невалидных наблюдений

по SCL, расчёт спектральных индексов и формирование квартальных медианных композитов. Валидными считались пиксели, не отнесённые SCL к облакам, теням, водным объектам, снежному покрову и другим неинформативным классам. Для визуализации внутригодовой динамики тем же способом формировались месячные медианные композиты. Они использовались только для визуализации и не входили в квартальную оценку точности.

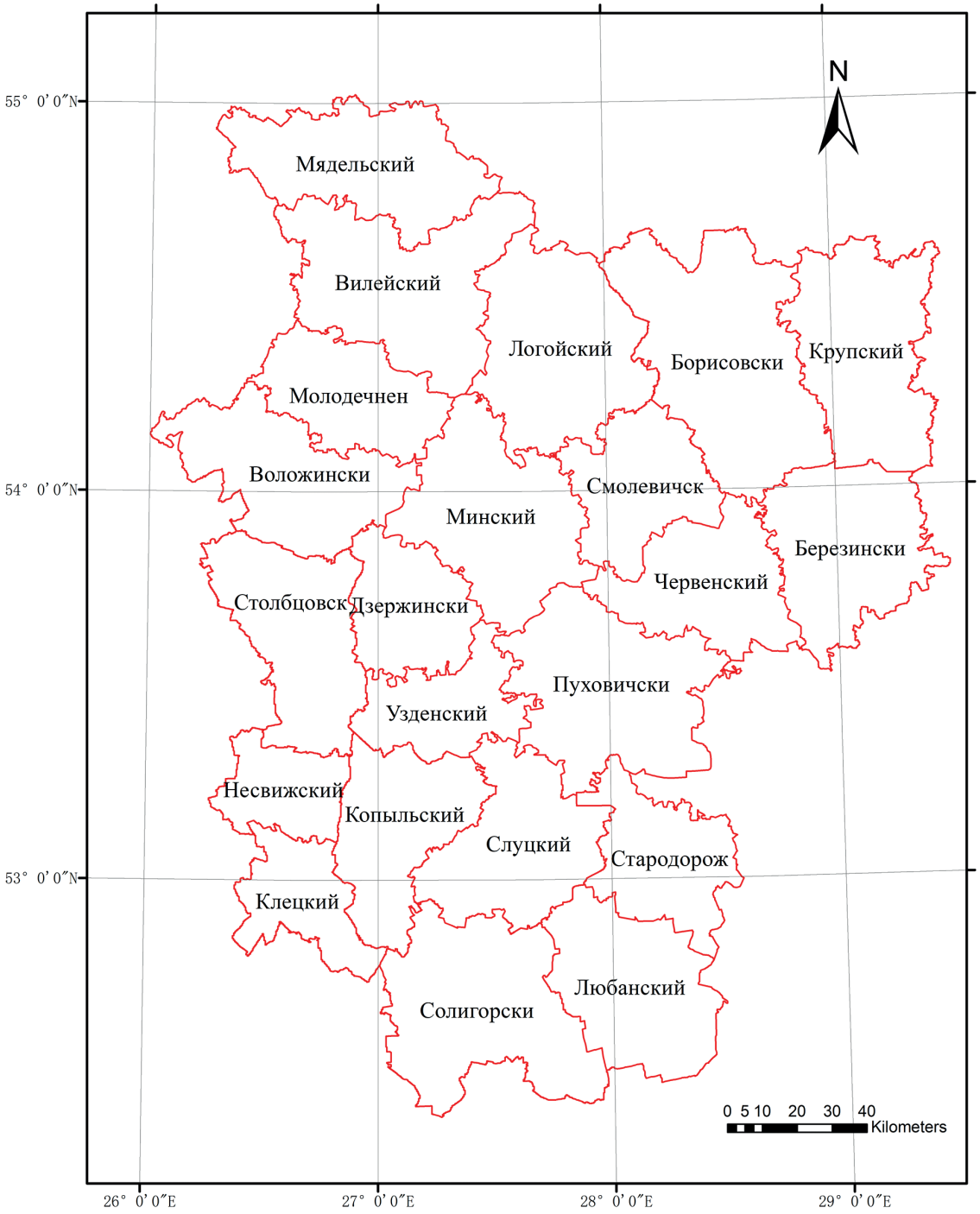


Рис. 1. Географическое положение Минской области
и административное деление территории исследования

Для выделения открытой почвенной поверхности использовались BSI, NDVI и NDBI. Индексы рассчитывались по формулам:

$$NDVI = (B8-B4)/(B8+B4),$$
$$NDBI = (B11-B8)/(B11+B8),$$
$$BSI = ((B11+B4)-(B8+B2))/((B11+B4)+(B8+B2)),$$

где B2, B4, B8 и B11 соответствуют синему, красному, ближнему инфракрасному и коротковолновому инфракрасному каналам Sentinel-2. Формула BSI использовалась в нормированной форме без множителя 100, поскольку каналы Sentinel-2 Level-2A были предварительно переведены в значения поверхностной отражательной способности; умножение индекса на 100 изменяет только численный масштаб, но не относительное положение пикселей в спектральном пространстве.

Пиксель относился к классу открытой почвенной поверхности при одновременном выполнении трёх условий: BSI > 0,18, NDVI < 0,20 и NDBI < 0,20. Порог BSI использовался для выделения пикселей с повышенным вкладом открытой минеральной поверхности, NDVI — для исключения участков с развитым растительным покровом, а NDBI — для дополнительного ограничения смешения с застроенными и светлыми антропогенными объектами. При этом данное правило рассматривалось не как сочетание независимых спектральных признаков, а как локально откалиброванное ограничение области решений в пространстве BSI–NDVI–NDBI.

Для выбора рабочих порогов было протестировано 27 комбинаций значений BSI, NDVI и NDBI. В качестве основного критерия использовалась F1-мера, поскольку она отражает баланс между ложноположительными и ложноотрицательными классификациями. Предварительная калибровка выполнялась по выборке Q2, после чего отобранная комбинация порогов проверялась отдельно для Q2, Q3 и Q4. Поэтому результаты Q2 следует рассматривать как оценку в периоде калибровки, а результаты Q3 и Q4 — как проверку сезонной переносимости выбранного правила в пределах одного года.

Для каждого пикселя дополнительно рассчитывался показатель bare_frac — доля валидных наблюдений соответствующего квартала, в которых пиксель одновременно удовлетворял условиям BSI > 0,18, NDVI < 0,20 и NDBI < 0,20. Значения bare_frac изменялись от 0 до 1. Условие bare_frac $\geqslant$ 0,5 означало, что пиксель классифицировался как открытая почвенная поверхность не менее чем в половине всех валидных наблюдений квартала. Этот показатель использовался в качестве диагностического критерия повторяемости открытого состояния поверхности, а не как самостоятельный спектральный индекс или отдельная классификация.

Для уменьшения влияния застроенных территорий по ESA (*англ.* European Space Agency) WorldCover 2021 исключались пиксели класса 50 (*англ.* Built-up). Этот слой применялся только как вспомогательная маска и не использовался для присвоения эталонных меток при оценке точности. Для анализа типов земель брались в расчёт данные слоя «Виды земель» Минской земельно-информационной карты Геопортала земельно-информационной системы Республики Беларусь (https://gismap.by/next/). Коды и наименования типов земель приведены в соответствии с ТКП 610-2023 (33520) (Земельно-информационная..., 2023). Для анализа почвенно-гидрологических условий использовались данные цифровой почвенной карты, представленные в разделе «Почвы» Национального геопортала Республики Беларусь (https://nipd.by/portal/TNPD_3). Атрибут kod_uvlj представляет собой код условного знака увлажнения почв и использовался для их группировки по характеру увлажнения и степени оглеения, а не по генетическим типам почв (Червань, 2025).

Сопоставление с выявленными открытыми поверхностями выполнялось только как диагностический анализ их пространственного распределения, возможных источников ложноположительных классификаций и связи результатов с почвенно-гидрологическими условиями, а не как независимая оценка точности.

Для оценки точности использовались вручную интерпретированные контрольные точки. Эталонная принадлежность точек к классам «открытая почвенная поверхность» и «неоткрытая поверхность» определялась по квартальным композитам Sentinel-2 с привлечением исторических высокодетальных изображений Google Earth, временно близких к соответствующим кварталам 2024 г. Для каждого квартала формировались тестовая выборка из 1000 контрольных точек и отдельная обучающая выборка из 1000 вручную интерпретированных точек для

обучения моделей Random Forest. Таким образом, пороговый алгоритм и Random Forest сравнивались на одной и той же тестовой выборке, не участвовавшей в обучении моделей.

По матрицам ошибок рассчитывались TP, FP, FN и TN, где TP означает истинно положительные классификации, FP — ложноположительные классификации, FN — ложноотрицательные классификации, а TN — истинно отрицательные классификации. На их основе определялись общая точность (OA), точность пользователя (*англ.* precision), полнота (*англ.* recall), F1-мера и коэффициент каппа в соответствии с общими принципами оценки точности данных дистанционного зондирования (Congalton, Green, 2019).

Классификатор Random Forest был реализован в Google Earth Engine и включал 100 деревьев (Breiman, 2001). Для проверки влияния состава предикторов были построены две модели. Модель RF_index использовала только три индекса BSI, NDVI и NDBI, т.е. тот же набор признаков, что и пороговый алгоритм. Эта модель применялась для наиболее корректного сравнения нелинейного классификатора с фиксированным пороговым правилом при одинаковом составе входных данных. Модель RF_full использовала расширенный набор предикторов: спектральные каналы Sentinel-2 B2, B3, B4, B8, B11 и B12 (где B3 — зелёный канал, а B12 — второй коротковолновый инфракрасный канал), а также индексы NDVI, BSI и NDBI. Поэтому результаты RF_full интерпретировались как эффект не только алгоритма Random Forest, но и более полного спектрального описания поверхности. Для RF_index дополнительно рассчитывалась относительная важность предикторов. Полученные значения нормировались таким образом, чтобы сумма вкладов BSI, NDVI и NDBI составляла 100 %.

Для оценки спектральной избыточности был выполнен корреляционный анализ BSI, NDVI и NDBI, а также дополнительных показателей PVI (*англ.* Perpendicular Vegetation Index) и TCG (*англ.* Tasseled Cap Greenness).

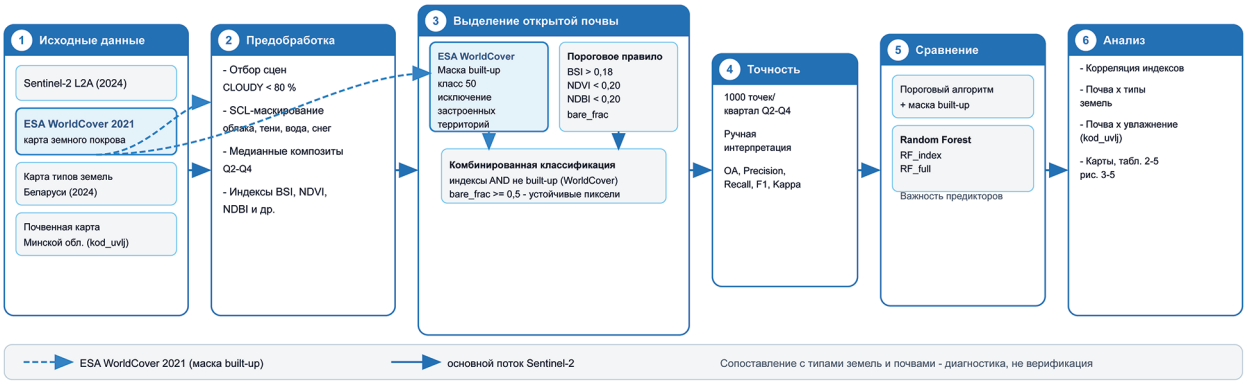


Рис. 2. Схема обработки данных Sentinel-2 и оценки выделения открытой почвенной поверхности в Минской области (Q2–Q4, 2024 г.): предварительная обработка и квартальные композиты; пороговая классификация по BSI, NDVI и NDBI; оценка точности; сравнение с Random Forest и диагностический анализ по типам земель и увлажнению почв

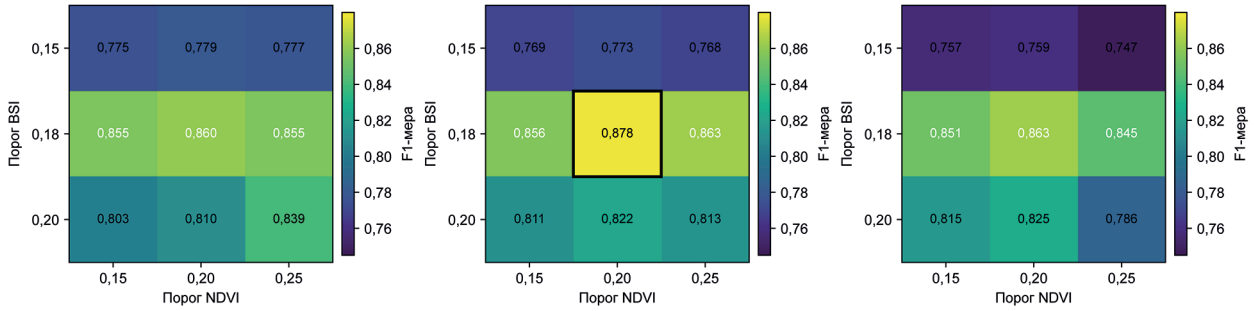
Результаты и обсуждение

Выбор пороговых значений спектральных индексов

Для выбора рабочих порогов протестировано 27 комбинаций BSI, NDVI и NDBI; критерием служила F1-мера. Более низкий BSI повышал полноту, но увеличивал число ложноположительных пикселей; более строгий BSI давал обратный эффект. Индекс NDVI ограничивал участки с растительностью, NDBI — смешение с застроенными и светлыми антропогенными поверхностями.

Изменение F1-меры при различных комбинациях порогов представлено на *рис. 3*. Наиболее сбалансированный результат был получен при сочетании BSI > 0,18, NDVI < 0,20

и NDBI < 0,20. На калибровочной выборке эта комбинация обеспечила значения точности пользователя, полноты и F1-меры 0,889, 0,868 и 0,878 соответственно. Эти пороги откалиброваны для условий Минской области и дополнительно проверены для Q2–Q4 2024 г.



а *б* *в*

Рис. 3. Чувствительность F1-меры к комбинациям порогов BSI, NDVI и NDBI: *а* — NDBI = 0,15; *б* — NDBI = 0,20; *в* — NDBI = 0,25

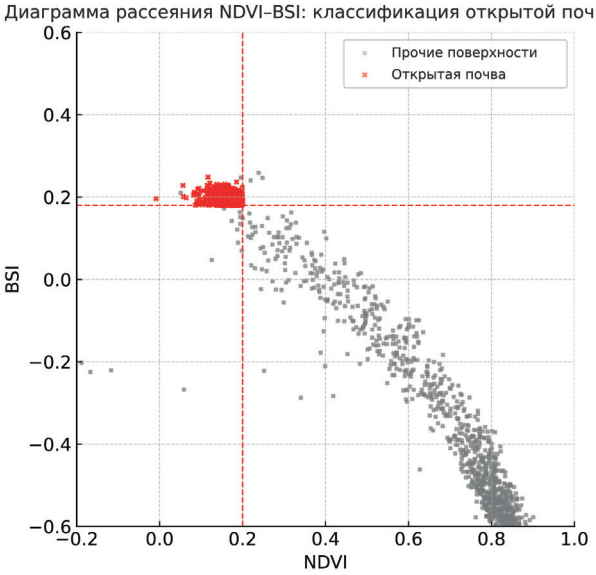


Рис. 4. Распределение выборочных пикселей в пространстве NDVI–BSI и рабочие пороги классификации открытой почвенной поверхности в Q2 2024 г. Красные точки соответствуют пикселям, отнесённым пороговым алгоритмом к открытой почвенной поверхности, серые — остальным пикселям

Двумерная проекция выборочных пикселей в пространстве NDVI–BSI иллюстрирует геометрию используемого порогового решения (*рис. 4*). Пиксели, отнесённые алгоритмом к открытой почвенной поверхности, располагаются в области низких значений NDVI и повышенных значений BSI. Индекс NDVI используется для ограничения влияния растительности, тогда как BSI выделяет пиксели с повышенным вкладом открытой минеральной поверхности. На *рис. 4* показана только двумерная проекция; окончательная классификация дополнительно учитывала условие NDBI < 0,20 и маску застроенных территорий.

Сезонная динамика и условия наблюдения

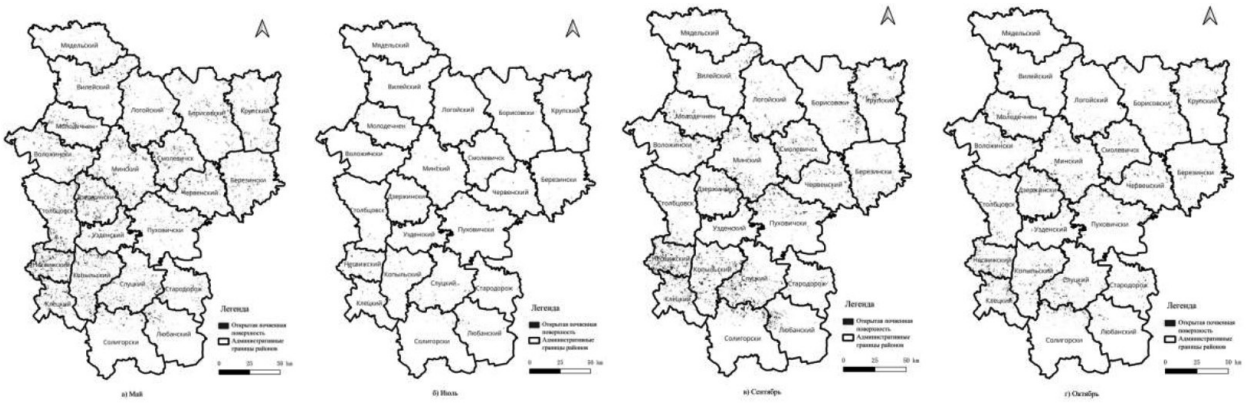
Применение выбранной комбинации порогов к квартальным медианным композитам Sentinel-2 показало выраженную сезонную изменчивость площади открытой почвенной поверхности (*табл. 2*). В Q2 площадь открытых поверхностей составила 232,13 км^2, в Q3

снизилась до 162,98 км^2, а в Q4 увеличилась до 265,89 км^2. Минимум в Q3 соответствует периоду максимального развития растительного покрова, что подтверждается наиболее высоким средним NDVI (0,689). Увеличение площади в Q4 связано с осенним снижением растительности, уборкой урожая и послеуборочным состоянием сельскохозяйственных земель.

Таблица 2. Диагностические показатели выделения открытой почвенной поверхности по кварталам Q2–Q4 2024 г.

Квартал	Среднее число валидных наблюдений	Средний NDVI	Средний BSI	Средний NDBI	Площадь открытой поверхности по медианному композиту, км^2	Площадь пикселей с bare_frac ⩾ 0,5, км^2	Среднее число наблюдений со снегом
Q2	13,30	0,682	–0,201	–0,246	232,13	115,55	0,00007
Q3	22,33	0,689	–0,162	–0,203	162,98	33,39	0,00010
Q4	6,35	0,568	–0,095	–0,143	265,89	73,28	0,16300

Примечание: bare_frac — доля валидных наблюдений соответствующего квартала, в которых пиксель одновременно удовлетворял условиям BSI > 0,18, NDVI < 0,20 и NDBI < 0,20. Значение bare_frac ⩾ 0,5 означает, что открытая почвенная поверхность выявлялась не менее чем в половине валидных наблюдений квартала. Значения в км^2 характеризуют суммарную площадь таких пикселей. Показатель bare_frac позволил отделить более устойчивое повторение открытого состояния поверхности от единичной классификации на медианном композите. Площадь пикселей с bare_frac ⩾ 0,5 составила 115,55 км^2 в Q2, 33,39 км^2 в Q3 и 73,28 км^2 в Q4. Это показывает, что в Q2 открытая поверхность чаще повторялась в течение квартала, тогда как в Q3 она была более локальной и менее устойчивой. Порог 0,5 относится к показателю bare_frac, тогда как значения 115,55; 33,39 и 73,28 км^2 характеризуют суммарную площадь пикселей, удовлетворявших данному условию.



а *б* *в* *г*

Рис. 5. Примеры пространственного распределения открытой почвенной поверхности в ключевые месяцы сельскохозяйственного сезона 2024 г.: *а* — май; *б* — июль; *в* — сентябрь; *г* — октябрь. Чёрным цветом показаны пиксели, классифицированные как открытая почвенная поверхность. Рисунок используется в качестве визуальной иллюстрации сезонной структуры результатов; основная оценка точности выполнена для кварталов Q2–Q4

В Q3 среднее число валидных наблюдений было максимальным и составило 22,33, тогда как в Q4 оно снизилось до 6,35. Среднее число наблюдений, отнесённых SCL к снегу или льду, в Q4 достигло 0,163. Поэтому результаты Q4, несмотря на наибольшую площадь выявленных открытых поверхностей, характеризуются повышенной неопределённостью.

На *рис. 5* представлены бинарные результаты классификации открытой почвенной поверхности для отдельных месяцев. Значения bare_frac на этих картах не отображаются, поскольку данный показатель рассчитывался по совокупности всех валидных наблюдений соответствующего квартала, а не для отдельных месячных изображений.

Точность порогового алгоритма и сравнение с Random Forest

Сравнение выполнялось для модели RF_index с индексами BSI, NDVI и NDBI и модели RF_full с дополнительными спектральными каналами Sentinel-2. Модель RF_index характеризует эффект нелинейного разделения классов при одинаковом с пороговым алгоритмом наборе признаков, тогда как RF_full отражает совместный эффект классификатора и расширенного набора предикторов.

Оценка по 1000 контрольных точек для каждого квартала показала близкую точность порогового алгоритма в Q2–Q4: OA составила 88,8–89,6 %, F1-мера — 87,7–88,6 %, коэффициент каппа — 0,775–0,792 (*табл. 3*). Высокая полнота при более низкой точности пользователя указывает на преобладание ложноположительных ошибок. Наиболее выраженная асимметрия наблюдалась в Q3, когда полнота достигла 99,3 %, а точность пользователя снизилась до 79,7 %.

Таблица 3. Сравнение точности порогового алгоритма, RF_index и RF_full по контрольным точкам

Квартал	Метод	Использованные предикторы	OA, %	Precision, %	Recall, %	F1-мера, %	Коэффициент каппа
Q2	Пороговый алгоритм	BSI, NDVI, NDBI	88,8	83,7	92,2	87,7	0,775
Q2	RF_index	BSI, NDVI, NDBI	90,4	87,3	91,3	89,2	0,806
Q2	RF_full	Спектральные каналы и индексы	91,9	90,0	91,5	90,8	0,836
Q3	Пороговый алгоритм	BSI, NDVI, NDBI	89,6	79,7	99,3	88,4	0,792
Q3	RF_index	BSI, NDVI, NDBI	92,0	85,6	96,3	90,6	0,837
Q3	RF_full	Спектральные каналы и индексы	93,2	89,3	94,3	91,7	0,860
Q4	Пороговый алгоритм	BSI, NDVI, NDBI	88,8	83,3	94,6	88,6	0,777
Q4	RF_index	BSI, NDVI, NDBI	90,8	87,5	93,3	90,3	0,816
Q4	RF_full	Спектральные каналы и индексы	91,9	90,8	91,7	91,2	0,837

Примечание: RF_index использует BSI, NDVI и NDBI; RF_full — каналы Sentinel-2 B2, B3, B4, B8, B11, B12 и те же индексы. Обе модели обучались и оценивались по одной схеме.

Модель RF_index повысила OA до 90,4–92,0 %, главным образом за счёт уменьшения числа ложноположительных классификаций. Модель RF_full показала максимальную OA 91,9–93,2 %, однако её преимущество связано не только с алгоритмом Random Forest, но и с дополнительными спектральными каналами. Поэтому RF_index можно считать более строгим сравнением с пороговым правилом.

Корреляция основных индексов и важность предикторов RF_index

Корреляционный анализ подтвердил сильную спектральную зависимость основных индексов. Для BSI–NDBI коэффициент корреляции r составил 0,994–0,996, для BSI–NDVI — от −0,923 до −0,857, для NDVI–NDBI — от −0,907 до −0,855; во всех случаях вероятность $p < 0{,}001$. Поэтому схема BSI–NDVI–NDBI интерпретировалась не как сочетание независимых переменных, а как функционально заданная область решений: BSI выделяет светлые

минеральные поверхности, NDVI ограничивает влияние растительности, а NDBI снижает смешение с застроенными и другими светлыми антропогенными объектами.

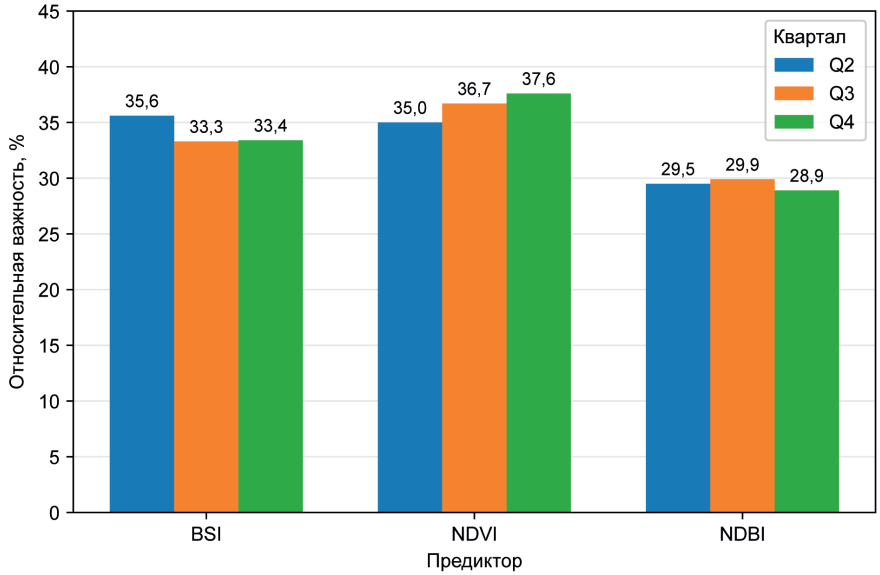


Рис. 6. Относительная важность предикторов RF_index в Q2–Q4

Связь PVI с BSI была слабее, чем связь BSI–NDBI ($r = -0{,}497...-0{,}684$ против 0,994...0,996), что указывает на потенциальную дополнительную информативность PVI. Однако TCG сохранял высокую корреляцию с NDVI ($r = 0{,}867...0{,}902$), а включение альтернативных индексов потребовало бы отдельной калибровки и проверки точности. Поэтому PVI и TCG использовались только для диагностики спектральной избыточности.

В RF_index вклад трёх предикторов был сопоставим (*рис. 6*): в Q2 доминировал BSI (35,6 %), в Q3–Q4 — NDVI (36,7–37,6 %), а вклад NDBI составлял около 29 %.

Распределение открытых поверхностей по официальным типам земель

Сопоставление с данными слоя «Виды земель» Минской земельно-информационной карты использовалось для анализа пространственного распределения результатов, а не как независимая верификация (*табл. 4*).

В Q2–Q4 64,9–73,0 % выявленных открытых поверхностей приходилось на пахотнопригодные земли, однако внутри этого класса их доля составляла лишь 1,0–1,6 % (*табл. 4*), что отражает пространственную связь с сельхозугодьями, а не независимое подтверждение точности.

В лесных, болотных и водных классах доля открытой поверхности не превышала 0,21 %, тогда как в транспортных и застроенных землях достигала 0,39–0,56 % (*табл. 4*), что указывает на возможные ложноположительные срабатывания на дорогах и антропогенных объектах.

Значение 1,27 % для пахотнопригодных земель в Q2 характеризует не площадь весенней вспашки, а долю всей площади данного класса, которая на квартальном медианном композите одновременно удовлетворяла трём пороговым условиям. Поскольку Q2 охватывает апрель – июнь, кратковременное оголение после обработки могло сглаживаться медианным композитом, а к маю – июню значительная часть посевов уже имела растительный покров. Влажные и тёмные почвы, растительные остатки и появившиеся всходы также могли не удовлетворять порогам. При этом 64,9–73,0 % — доля пахотнопригодных земель среди всех выявленных открытых поверхностей, а 1,0–1,6 % — доля открытой поверхности внутри этого класса; показатели имеют разные знаменатели.

Таблица 4. Доля открытой поверхности внутри основных типов земель в Q2–Q4 (в %)

Тип земель	Q2	Q3	Q4
Пахотнопригодные земли (101)	1,27	1,00	1,58
Многолетние насаждения (102)	0,39	0,39	0,69
Луговые земли (103)	0,47	0,19	0,46
Лесные и болотные земли (201–206)	0,21	0,10	0,16
Водные объекты (301–302)	0,16	0,09	0,16
Транспортные и застроенные земли (401–505)	0,49	0,39	0,56
Нарушенные, неиспользуемые и прочие земли (601–705)	0,48	0,33	0,48
Прочие валидные классы	0,24	0,24	0,48

Примечание: В скобках после названий типов земель указаны коды типов земель в соответствии с ТКП 610-2023 (33520). Данные получены из слоя «Виды земель» Минской земельно-информационной карты Геопортала земельно-информационной системы Республики Беларусь (https://gis-map.by/next/). Диапазоны кодов обозначают объединение нескольких исходных типов земель в рамках настоящего анализа.

Влияние почвенно-гидрологических условий

По данным цифровой почвенной карты связь между условиями увлажнения и выделением открытой поверхности не была монотонной (*табл. 5*): наибольшая площадь выявленных открытых поверхностей приходилась на автоморфные почвы, однако доля открытой поверхности внутри этого класса не была максимальной и составляла 0,39–0,60 %.

Таблица 5. Доля открытой поверхности внутри классов увлажнения почв в Q2–Q4 (в %)

Код условного знака увлажнения (kod_uvlj)	Класс увлажнения почв	Q2	Q3	Q4
0	Автоморфные/хорошо дренированные почвы	0,56	0,39	0,60
1	Оглеенные в нижней части профиля	0,83	0,27	0,50
2	Контактно-оглеенные почвы	0,62	0,23	0,39
3	Временно избыточно увлажнённые слабоглееватые почвы	0,88	0,80	1,44
4	Глееватые почвы	0,68	0,29	0,65
5	Глеевые почвы	0,43	0,30	0,65

Примечание: kod_uvlj — код условного знака увлажнения почв в атрибутивной таблице цифровой почвенной карты (Червань, 2025). Значения 1–5 характеризуют различные формы и степени увлажнения и оглеения почв; данный атрибут не является кодом генетического типа почв. Значение 0 в настоящем анализе использовано для группы автоморфных почв.

Наиболее устойчиво повышенные значения доли открытой поверхности внутри класса наблюдались для временно избыточно увлажнённых слабоглееватых почв (kod_uvlj = 3). В этом классе доля открытой поверхности составила 0,88 % в Q2, 0,80 % в Q3 и 1,44 % в Q4 (*табл. 5*). Это указывает на то, что почвенно-гидрологические условия влияют на результаты классификации не напрямую, а во взаимодействии с землепользованием, растительным покровом и сезонным состоянием поверхности.

Для kod_uvlj = 3 в Q3–Q4 были характерны более низкие значения NDVI и более высокие значения BSI; в Q4 дополнительно возрастало среднее число наблюдений, отнесённых SCL к снегу или льду, что снижало надёжность результатов этого квартала. Фиксированный порог BSI > 0,18 не может рассматриваться независимо от условий увлажнения и сезонного состо-

яния поверхности. Влажные, тёмные или покрытые растительными остатками открытые почвы могут иметь более низкие значения BSI и потенциально не попадать в класс открытой поверхности. Поэтому предложенный алгоритм применим для условий Минской области после локальной калибровки порогов.

Ограничения метода

Основными ограничениями метода считаются высокая взаимная корреляция BSI, NDVI и NDBI и сглаживание кратковременных состояний поверхности квартальными медианными композитами. Результаты Q4 требуют осторожной интерпретации из-за меньшего числа валидных наблюдений и влияния снежного покрова.

Эталонные метки определялись по квартальным композитам Sentinel-2 и историческим изображениям Google Earth, поэтому выполненная оценка точности не заменяет полевую валидацию. Метод также чувствителен к влажности почвы, растительным остаткам, светлым антропогенным объектам и смешанным пикселям: влажные и тёмные почвы могут иметь BSI ниже выбранного порога, тогда как дороги, хозяйственные площадки и нарушенные поверхности могут давать ложноположительные результаты. Поэтому карты следует рассматривать как результат локально откалиброванного выделения сезонно открытой почвенной поверхности.

Заключение

Для картографирования открытой почвенной поверхности Минской области по данным Sentinel-2 Level-2A наиболее сбалансированным оказалось правило BSI > 0,18, NDVI < 0,20 и NDBI < 0,20. Поскольку индексы спектрально связаны, это правило следует рассматривать как локально откалиброванную область решений, а не как модель на основе независимых признаков.

По контрольным точкам пороговый алгоритм обеспечил OA 88,8–89,6 %, F1-меру 87,7–88,6 % и коэффициент каппа 0,775–0,792. Модель RF_index с теми же тремя индексами повысила OA до 90,4–92,0 %, а RF_full со спектральными каналами и индексами — до 91,9–93,2 %. Преимущество RF_full связано как с нелинейной классификацией, так и с расширенным набором предикторов.

Большая часть выявленных открытых поверхностей была приурочена к пахотнопригодным землям, хотя их доля внутри этого класса составляла только 1,0–1,6 %. На результаты также влияли условия увлажнения, сезонное состояние поверхности и меньшая надёжность Q4. Метод пригоден для регионального мониторинга сезонно открытых почв, однако его перенос на другие территории требует повторной калибровки порогов, сезонной проверки и по возможности независимой полевой или высокодетальной валидации.

Литература

1. *Антонов С. А.*, *Скрипчинский А. В.*, *Авдеев А. В.* Применение данных дистанционного зондирования Земли для оценки деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей // С.-х. журн. 2018. № 4 (11). С. 6–11. DOI: 10.25930/9ywv-3r76.
2. *Генин В. А.*, *Клебанович Н. В.* Моделирование урожайности кукурузы и сои по данным дистанционного зондирования Земли // Вестн. Белорусской гос. с.-х. акад. 2018. № 4. С. 100–104.
3. Земельно-информационная система Республики Беларусь. Порядок создания, ведения (эксплуатации и обновления): ТКП 610-2023 (33520). Минск: Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь, 2023. 107 с.
4. *Кравцов С. Л.*, *Привалов Ф. И.*, *Голубцов Д. В.*, *Лепесевич Е. В.*, *Холодинский В. В.*, *Булавина Т. М.*, *Лапаник С. А.*, *Гвоздов А. П.* Перспективы применения дистанционного мониторинга в сельском хозяйстве Беларуси // Земледелие и селекция в Беларуси. 2017. Вып. 53. С. 4–12.

5. *Червань А. Н.* Геоинформационная формализация и геостатистический анализ почвенного покрова Беларуси: учебно-метод. пособие. Минск: БГУ, 2025. 175 с.
6. *Червань А. Н.*, *Чжао Б.* Определение содержания органического вещества почвы Минской области Беларуси на основе классификаторов градиентного бустинга спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 121–135. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-121-135.
7. *Ben-Dor E.*, *Chabrillat S.*, *Demattê J. A. M. et al.* Using Imaging Spectroscopy to study soil properties // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. S38–S55. DOI: 10.1016/j.rse.2008.09.019.
8. *Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. No. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
9. *Castaldi F.* Sentinel-2 and Landsat-8 multi-temporal series to estimate topsoil properties on croplands // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 17. Article 3345. DOI: 10.3390/rs13173345.
10. *Congalton R. G.*, *Green K.* Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 346 p. DOI: 10.1201/9780429052729.
11. *Demattê J. A. M.*, *Fongaro C. T.*, *Rizzo R.*, *Safanelli J. L.* Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 212. P. 161–175. DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.047.
12. *Deng Y.*, *Wu C.*, *Li M.*, *Chen R.* RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 39. P. 40–48. DOI: 10.1016/j.jag.2015.02.010.
13. *Drusch M.*, *Del Bello U.*, *Carlier S. et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
14. *Dvorakova K.*, *Heiden U.*, *Pepers K. et al.* Improving soil organic carbon predictions from a Sentinel-2 soil composite by assessing surface conditions and uncertainties // Geoderma. 2023. V. 429. Article 116128. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116128.
15. *Gorelick N.*, *Hancher M.*, *Dixon M. et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
16. *Griffiths P.*, *Nendel C.*, *Hostert P.* Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 220. P. 135–151. DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.031.
17. *Liu Y.*, *Meng Q.*, *Zhang L.*, *Wu C.* NDBSI: A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas // CATENA. 2022. V. 214. Article 106265. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106265.
18. *Qi L.*, *Zhou Y.*, *Van Oost K. et al.* High-resolution soil erosion mapping in croplands via Sentinel-2 bare soil imaging and a two-step classification approach // Geoderma. 2024. V. 446. Article 116905. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116905.
19. *Qiu B.*, *Zhang K.*, *Tang Z. et al.* Developing soil indices based on brightness, darkness, and greenness to improve land surface mapping accuracy // GIScience and Remote Sensing. 2017. V. 54. No. 5. P. 759–777. DOI: 10.1080/15481603.2017.1328758.
20. *Rikimaru A.*, *Roy P. S.*, *Miyatake S.* Tropical forest cover density mapping // Tropical Ecology. 2002. V. 43. No. 1. P. 39–47.
21. *Rouse J. W.*, *Jr.*, *Haas R. H.*, *Schell J. A.*, *Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symp. NASA SP-351. 1974. V. 1. P. 309–317.
22. *Urbina-Salazar D.*, *Vaudour E.*, *Richer-de-Forges A. C. et al.* Sentinel-2 and Sentinel-1 bare soil temporal mosaics of 6-year periods for soil organic carbon content mapping in Central France // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 9. Article 2410. DOI: 10.3390/rs15092410.
23. *Vaudour E.*, *Gomez C.*, *Lagacherie P. et al.* Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. V. 96. Article 102277. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102277.
24. *Zepp S.*, *Heiden U.*, *Bachmann M. et al.* Optimized bare soil compositing for soil organic carbon prediction of topsoil croplands in Bavaria using Landsat // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. V. 202. P. 287–302. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.06.003.
25. *Zha Y.*, *Gao J.*, *Ni S.* Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 3. P. 583–594. DOI: 10.1080/01431160304987.
26. *Zhu Y.*, *Qi L.*, *Wu Z.*, *Shi P.* Spectra-based predictive mapping of soil organic carbon in croplands: Single-date versus multitemporal bare soil compositing approaches // Geoderma. 2024. V. 449. Article 116987. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116987.

Mapping bare soils in Minsk Region using Sentinel-2 spectral indices

B. Zhao

Belarusian State University, Minsk 220030, Belarus
E-mail: geozhao@outlook.com

Bare soil is an important target in agricultural remote sensing, but its identification is complicated by spectral similarity to dry vegetation, crop residues, and bright anthropogenic surfaces. For Belarus, Sentinel-2-based approaches to bare-soil mapping remain insufficiently studied. This study aims to develop and test a threshold-based method for mapping open soil surfaces in Minsk Region using the Bare Soil Index (BSI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Normalized Difference Built-up Index (NDBI). Sentinel-2 Level-2A imagery for 2024 was processed in Google Earth Engine (GEE) with clouds, shadows, snow, and invalid observations masked using the Scene Classification Layer (SCL); 27 threshold combinations were evaluated. The operational rule was defined as BSI > 0.18, NDVI < 0.20, and NDBI < 0.20. Validation using 1000 control points per quarter for Q2–Q4 yielded overall accuracies of 88.8–89.6 %, F1-scores of 87.7–88.6 %, and kappa values of 0.775–0.792. Random Forest models RF_index (using only BSI, NDVI, and NDBI) and RF_full (using Sentinel-2 spectral bands and indices) increased overall accuracy to 90.4–92.0 and 91.9–93.2 %, respectively. Most detected open surfaces were associated with arable-suitable land, but their within-class share did not exceed 1.0–1.6 %. The proposed approach is suitable for regional mapping of seasonally exposed soil surfaces provided that thresholds are locally calibrated, seasonal robustness is checked and accuracy is evaluated using control points.

Keywords: Sentinel-2; bare soil; remote sensing; Bare Soil Index; NDVI; NDBI; threshold classification; Random Forest; agricultural landscapes; Minsk Region

Accepted: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-324-337

References

1. Antonov S.A., Skripchinsky A.V., Avdeev A.V., Application of the Earth remote sounding data to verify the activities of agricultural producers, *Sel'skokhozyaistvennyi zhurnal*, 2018, No. 4 (11), pp. 6–11 (in Russian), DOI: 10.25930/9ywv-3r76.
2. Genin V.A., Klebanovich N.V., Modeling maize and soybean yield using Earth remote sensing data, *Vestnik of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2018, No. 4, pp. 100–104 (in Russian).
3. *Zemel'no-informatsionnaya sistema Respubliki Belarus'. Poryadok sozdaniya*, *vedeniya* (*ehkspluatatsii i obnovleniya*): *TKP 610-2023* (*33520*) (Land information system of the Republic of Belarus: Procedure for creation and maintenance (operation and updating): TKP 610-2023 (33520)), Minsk: State Committee on Property of the Republic of Belarus, 2023, 107 p. (in Russian).
4. Kravtsov S.L., Privalov F.I., Golubtsov D.V., Lepesevich E.V., Kholodinsky V.V., Bulavina T.M., Lapanik S.A., Gvozdov A.P., Possibilities of remote monitoring use in agriculture of Belarus, *Arable Farming and Plant Breeding in Belarus*, 2017, Iss. 53, pp. 4–12 (in Russian).
5. Chervan A.N., *Geoinformatsionnaya formalizatsiya i geostatisticheskii analiz pochvennogo pokrova Belarusi: uchebno-metodicheskoe posobie* (Geoinformation formalization and geostatistical analysis of the soil cover of Belarus: A study guide), 2025, Minsk, Belarusian State University, 175 p. (in Russian).
6. Chervan A.N., Zhao B., Determination of soil organic matter content in Minsk Region of Belarus using gradient boosting classifiers based on satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 3, pp. 121–135 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-121-135.
7. Ben-Dor E., Chabrillat S., Demattê J.A.M. et al., Using Imaging Spectroscopy to study soil properties, *Remote Sensing of Environment*, 2009, V. 113, pp. S38–S55, DOI: 10.1016/j.rse.2008.09.019.
8. Breiman L., Random Forests, *Machine Learning*, 2001, V. 45, No. 1, pp. 5–32, DOI: 10.1023/A:1010933404324.
9. Castaldi F., Sentinel-2 and Landsat-8 multi-temporal series to estimate topsoil properties on croplands, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 17, Article 3345, DOI: 10.3390/rs13173345.
10. Congalton R.G., Green K., *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*, 3rd ed., Boca Raton, CRC Press, 2019, 346 p., DOI: 10.1201/9780429052729.

11. Demattê J.A.M., Fongaro C.T., Rizzo R., Safanelli J.L., Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 212, pp. 161–175, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.047.
12. Deng Y., Wu C., Li M., Chen R., RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, V. 39, pp. 40–48, DOI: 10.1016/j.jag.2015.02.010.
13. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al., Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services, *Remote Sensing of Environment*, 2012, V. 120, pp. 25–36, DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
14. Dvorakova K., Heiden U., Pepers K. et al., Improving soil organic carbon predictions from a Sentinel-2 soil composite by assessing surface conditions and uncertainties, *Geoderma*, 2023, V. 429, Article 116128, DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116128.
15. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
16. Griffiths P., Nendel C., Hostert P., Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 220, pp. 135–151, DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.031.
17. Liu Y., Meng Q., Zhang L., Wu C., NDBSI: A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas, *CATENA*, 2022, V. 214, Article 106265, DOI: 10.1016/j.catena.2022.106265.
18. Qi L., Zhou Y., Van Oost K. et al., High-resolution soil erosion mapping in croplands via Sentinel-2 bare soil imaging and a two-step classification approach, *Geoderma*, 2024, V. 446, Article 116905, DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116905.
19. Qiu B., Zhang K., Tang Z. et al., Developing Soil Indices based on brightness, darkness, and greenness to improve land surface mapping accuracy, *GIScience and Remote Sensing*, 2017, V. 54, No. 5, pp. 759–777, DOI: 10.1080/15481603.2017.1328758.
20. Rikimaru A., Roy P.S., Miyatake S., Tropical forest cover density mapping, *Tropical Ecology*, 2002, V. 43, No. 1, pp. 39–47.
21. Rouse J.W., Jr., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *3rd Earth Resources Technology Satellite-1* (*ERTS-1*) *Symp.*, NASA SP-351, 1974, V. 1, pp. 309–317.
22. Urbina-Salazar D., Vaudour E., Richer-de-Forges A.C. et al., Sentinel-2 and Sentinel-1 bare soil temporal mosaics of 6-year periods for soil organic carbon content mapping in Central France, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 9, Article 2410, DOI: 10.3390/rs15092410.
23. Vaudour E., Gomez C., Lagacherie P. et al., Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, V. 96, Article 102277, DOI: 10.1016/j.jag.2020.102277.
24. Zepp S., Heiden U., Bachmann M. et al., Optimized bare soil compositing for soil organic carbon prediction of topsoil croplands in Bavaria using Landsat, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, V. 202, pp. 287–302, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.06.003.
25. Zha Y., Gao J., Ni S., Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, V. 24, No. 3, pp. 583–594, DOI: 10.1080/01431160304987.
26. Zhu Y., Qi L., Wu Z., Shi P., Spectra-based predictive mapping of soil organic carbon in croplands: Single-date versus multitemporal bare soil compositing approaches, *Geoderma*, 2024, V. 449, Article 116987, DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116987.