МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2025 **№ 1**

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66443 от 14 июля 2016 г.)

Журнал индексируется в Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index и SCOPUS.

The Journal is indexed in the Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index and SCOPUS.

16+

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 94288

Томский государственный университет
2025

Научная статья
УДК 911.9
doi: 10.17223/25421379/34/9

ЦИФРОВОЕ ПОЧВЕННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Алексей Александрович Сазонов[1], Аркадий Леонидович Киндеев[2], Иван Сергеевич Князев[3]

[1, 2, 3] *Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*
[1] *alexey.szonov@gmail.com*
[2] *Akindeev@tut.by*
[3] *ivanknyazev0509@gmail.com*

Аннотация. Предложена методика прогнозного цифрового картографирования почвенного покрова на основе данных воздушного лазерного сканирования и мультиспектрального космического снимка. Методика была апробирована на территории Воложинского района Минской области Республики Беларусь. Для прогнозирования почвенного покрова была использована модель машинного обучения Random Forest. В результате исследования были получены две цифровые почвенные карты (по гидроморфизму и по типам почв).

Ключевые слова: *воздушное лазерное сканирование, лидар, цифровое почвенное картографирование, машинное обучение, автоматизированное дешифрирование, случайный лес, вегетационные индексы*

Для цитирования: Сазонов А.А., Киндеев А.Л., Князев И.С. Цифровое почвенное картографирование по данным воздушного лазерного сканирования // Геосферные исследования. 2025. № 1. С. 124–135. doi: 10.17223/25421379/34/9

Original article
doi: 10.17223/25421379/34/9

DIGITAL SOIL MAPPING USING AIR LASER SCANNING DATA

Alexey A. Sazonov[1], Arkady L. Kindeev[2], Ivan S. Knyazev[3]

[1, 2, 3] *Belarusian state university, Minsk, Republic of Belarus*
[1] *alexey.szonov@gmail.com*
[2] *Akindeev@tut.by*
[3] *ivanknyazev0509@gmail.com*

Abstract. Soil mapping is a critical task for a variety of applications, including agriculture, ecology, and environmental management. Traditionally, soil mapping has been conducted using field surveys, which are time-consuming, labor-intensive, and expensive. In recent years, there has been a growing interest in the use of remote sensing data for digital soil mapping (DSM). DSM methods use data from satellites, aircraft, or drones to generate digital soil maps with high spatial resolution and low cost. Methods: This study proposes a predictive DSM methodology based on airborne laser scanning (ALS) and multispectral satellite imagery. The study was conducted in the Volozhinsky District of the Minsk Region of Belarus. ALS data were used to derive morphometric indicators of relief, while multispectral satellite imagery were used to derive vegetation indices. A Random Forest machine-learning model was used to predict soil types and hydromorphic classes. Results: The results of the study showed that the proposed methodology was able to generate accurate digital soil maps with high spatial resolution. The overall accuracy of the soil type map was 64%, and the overall accuracy of the hydromorphic class map was 60 %. Discussion: The results of this study confirm the effectiveness of the proposed predictive DSM methodology. The methodology is based on a combination of ALS and multispectral satellite imagery, which provides a comprehensive set of data for soil mapping. The use of a Random Forest machine-learning model also contributes to the accuracy of the methodology. Conclusion: The proposed methodology is a promising approach for DSM in a variety of settings. The methodology is relatively easy to implement and can be used to generate digital soil maps at a variety of spatial resolutions.

Keywords: *Airborne laser scanning, lidar, digital soil mapping, machine learning, automated interpretation, random forest, vegetation indices.*

For citation: Sazonov A.A., Kindeev A.L., Knyazev I.S. (2025). Digital soil mapping using air laser scanning data. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 1. pp. 124–135. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/34/9

© Сазонов А.А., Киндеев А.Л., Князев И.С., 2025

Введение

Согласно докладу ФАО «Мониторинг достижения связанных с продовольствием и сельским хозяйством показателей целей устойчивого развития на 2023 год», большинство задач, предусмотренных целями устойчивого развития и связанных с продовольствием и сельским хозяйством, все еще далеки от выполнения [Мониторниг достижений…, 2023].

По данным ООН, 33 % всех почв мира уже деградировали, а для удовлетворения мирового спроса на продовольствие к 2050 г. сельскохозяйственное производство должно увеличиться на 60 %, что требует более пристального внимания к земельным ресурсам и почвенному покрову [ООН, 2023].

Основой введения сельскохозяйственной деятельности, без сомнения, может считаться качественная и количественная информация о состоянии почв. За последние десятилетия картографирование почвенного покрова обзавелось такими методами, как геостатистика [Oliver, 2010], цифровое почвенное картографирование [Савин и др., 2019], и прогнозное картографирование на основе машинного обучения [Heuvelink, Webster, 2022]. К.А. Жичкин, Л.Н. Жичкина утверждают о невозможности получения устойчивых урожаев без внедрения современных технологий и методик [Жичкин, Жичкина, 2016], что косвенно подтверждается урожайностью зерновых культур в тех странах мира (Германия – 74 ц/га, Нидерланды – 74 ц/га, Франция 72 ц/га) [Knoema, 2023], где уже на протяжении полувека активно используют технологии точного земледелия.

В Российской Федерации можно отметить значительные тенденции в апробации современных методов цифровой почвенной картографии, в том числе и на основе методов машинного обучения [Флоринский, 2012; Темботов и др., 2022]. Рядом ученых были установлены основные параметры для прогнозирования почвенного покрова на основе рельефа [McBratney et al., 2003; Флоринский и др. 2009; Флоринский, 2010].

Республика Беларусь также старается соответствовать современным трендам почвенного картографирования [Азарёнок, Матыченков, 2022]. Высокая изученность почвенного покрова сельскохозяйственных земель страны позволила сформировать слой «Почвы» масштаба 1:10 000 в составе земельной информационной системы Республики Беларусь (ЗИС РБ) [Геопортал ЗИС…]. Согласно государственной программе Республики Беларусь «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг., одной из задач является увеличение объемов производства продукции сельского хозяйства в крестьянских (фермерских) хозяйствах [О государственной программе…], при этом за последние несколько лет наблюдается спад сборов зерновых на 1 га [Клебанович и др., 2022]. Внедрение инновационных подходов как в сельскохозяйственном производстве, так и в изучении почвенного покрова должно стимулировать развитие аграрного сектора экономики страны. В последнее десятилетие в рамках решения поставленных задач активно развиваются научные направления в области адаптивно-ландшафтного земледелия [Червань, 2021] и внедрения геостатистического подхода при использовании технологий точного земледелия [Киндеев, 2022]. При этом отсутствуют работы, направленные на использование методов прогнозного почвенного картографирования для составления почвенных карт как страны в целом, так и отдельных хозяйств.

В связи с вышесказанным цель данного исследования заключается в апробировании методики прогнозного почвенного картографирования с помощью методов машинного обучения в условиях Беларуси и создании крупномасштабной цифровой почвенной карты опытного полигона.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

– получить высокоточные данные о рельефе исследуемой территории с помощью воздушного лазерного сканирования;

– получить мультиспектральный космический снимок высокого разрешения на исследуемую территорию;

– на основе детальной модели рельефа и мультиспектрального космического снимка рассчитать ковариаты (морфометрические показатели рельефа и вегетационные индексы) для модели;

– смоделировать пространственную дифференциацию почвенного покрова изучаемой территории на типовом уровне и по степени гидроморфизма;

– провести верификацию полученных цифровых почвенных карт.

Изученность вопроса

Цифровая почвенная картография как отдельное направление была сформирована в 2003 г. Alex McBratney с соавт. в статье «On digital soil mapping» [McBratney et al., 2003], методологические основы которого были еще заложены В.В. Докучаевым [Докучаев, 1883] и С.А. Захаровым [Захаров, 1931] предложившими формулу почвы как функцию от факторов почвообразования.

Заложенные идеи были реализованы в работах Alex McBratny в концептуальной модели SCORPAN (Soil (почва), Climate (климат), Organisms (организмы), Relief (рельеф), Parent material (почвообразующие породы), Age (возраст территории), Spatial position (положение в пространстве)), которая ориентирована на практическое применение для цифрового почвенного картографирования [McBratney et al., 2003].

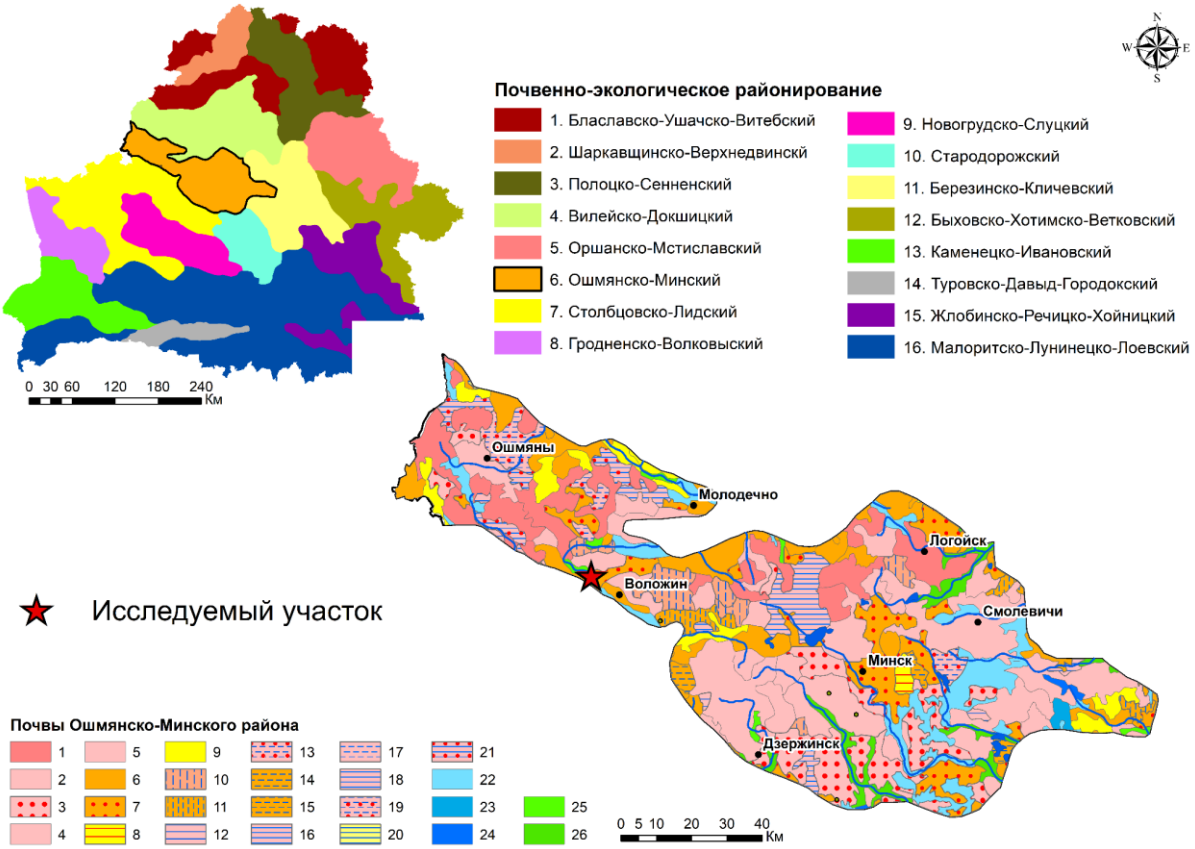

Рис. 1. Ошмянско-Минский почвенно-экологический район

Условные обозначения: 1 – дерново-подзолистые на средних моренных суглинках; 2 – дерново-подзолистые на мощных лёссовидных легких суглинках; 3 – дерново-подзолистые на легких лёссовидных суглинках, подстилаемых песками, 4 – дерново-подзолистые на легких водно-ледниковых суглинках; 5 – дерново-подзолистые на водно-ледниковых легких суглинках, подстилаемых песками; 6 – дерново-подзолистые на водно-ледниковых супесях, подстилаемых моренными суглинками; 7 – дерново-подзолистые на водно-ледниковых супесях, подстилаемых песками; 8 – дерново-подзолистые на песках, подстилаемых моренными суглинками; 9 – дерново-подзолистые на мощных песках; 10 – дерново-подзолистые слабоглееватые на лёгких суглинках; 11 – дерново-подзолистые слабоглееватые на водно-ледниковых супесях; 12 – дерново-подзолисто-глееватые почвы на легких мощных суглинках; 13 – дерново-подзолисто-глееватые, на водно-ледниковых суглинках, подстилаемых песками; 14 – дерново-подзолисто-глееватые, на супесях, подстилаемых суглинками; 15 – дерново-подзолисто-глееватые на рыхлых супесях; 16 – дерново-подзолисто-глеевые на легких суглинках, подстилаемых моренными суглинками; 17 – дерново-глееватые на мощных водно-ледниковых суглинках; 18 – дерново-глеевые на легких мощных моренных суглинках; 19 – дерново-глеевые на легких мощных моренных суглинках, подстилаемых песками; 20 – дерново-глеевые на мощных песках; 21 – дерново-глеевые почвы на легких суглинках, подстилаемых песками; 22 – аллювиальные дерново-глееватые и глеевые почвы на речном аллювии; 23 – аллювиальные торфянисто-глеевые, торфяно-глеевые и торфяно-болотные; 24 – низинные торфяно-глеевые; 25 – переходные торфяно-глеевые; 26 – верховые торфяно-глеевые

Fig 1. Oshmyany-Minsk soil-ecological region

Legend: 1 – sod-podzolic, on medium moraine loams; 2 – sod-podzolic, on thick loesslike light loams; 3 – sod-podzolic, on light loesslike loams underlain by sands, 4 – sod-podzolic, on light fluvioglacial loams; 5 – sod-podzolic on fluvioglacial light loams underlain by sands; 6 – sod-podzolic on fluvioglacial sandy loams underlain by moraine loams; 7 – sod-podzolic on fluvioglacial sandy loams underlain by sands; 8 – sod-podzolic on sands underlain by moraine loams; 9 – sod-podzolic on deep sands; 10 – sod-podzolic slightly gleyic on light loams; 11 – sod-podzolic slightly gleyic on fluvioglacial sandy loams; 12 – sod-podzolic-gleyic soils on light deep loams; 13 – sod-podzolic-gleyic, on fluvioglacial loams underlain by sands; 14 – sod-podzolic-gleyic, on sandy loams underlain by loams; 15 – sod-podzolic-gleyic on loose sandy loams; 16 – sod-podzolic-gley, on light loams underlain by moraine loams, 17 – soddy-gleyic, on thick fluvioglacial loams; 18 – soddy-gley, on light thick moraine loams; 19 – soddy-gley, on light thick moraine loams underlain by sands; 20 – soddy-gley, on thick sands; 21 – soddy-gley soils on light loams underlain by sands; 22 – alluvial soddy-gleyic and gley soils on river alluvium; 23 – alluvial peaty-gley, peat-gley and peat-bog soils; 24 – lowland peat-gley; 25 – transitional peat-gley; 26 – high-moor peat-gley

---

Альтернативой SCORPAN можно назвать модель CLORPT (Climate (климат), Organisms (организмы), Relief (рельеф), Parent material (почвообразующие породы), Time (время)), которая в большей степени соответствует гипотезе В.В. Докучаева.

Ряд исследований последних лет показывает, что из всех факторов почвообразования главенствующую роль в прогнозном почвенном картографировании отводится рельефу [Флоринский, 2009; Fathololoumi et al., 2020; Meng et al., 2022].

Повышение точности моделирования почвенного покрова на основе цифровой модели исследования (ЦМР) может быть достигнуто включением в модель данных ДЗЗ. Так, Xiangtian Meng с соавт. доказали, что увеличение количества разновременных снимков увеличивает точность прогнозной почвенной карты и является существенным дополнением к данным о рельефе местности [Meng et al., 2022].

При этом особую важность представляют собой производные характеристики рельефа, рассчитываемые по ЦМР. И.В. Флоренским было определено, что корреляционные взаимосвязи между почвенным покровом и рельефом местности проявляются через морфометрические показатели третьего порядка [Флоринский и др., 2009], что делает выбор предикторов важным этапом прогнозного почвенного картографирования.

Объекты и методы исследования

Общая характеристика территории. Опытный участок находится в окрестностях географической станции «Западная Березина», д. Калдыки Воложинского района Минской области. Большая часть территории занята поймой р. Березина (Западная Березина), конечными моренными грядами и равнинами, часто перекрытыми водно-ледниковыми, аллювиальными отложениями, также выделяются эоловые гривы и гряды.

Исследуемая территория расположена в Ошмянско-Минском почвенно-экологическом районе (см. рис. 1) суглинистых и супесчаных почв центрального почвенно-климатического округа центральной почвенной провинции [Шибут и др., 2018].

Ошмяно-Минский почвенно-экологический район включает в себя Ошмянские краевые ледниковые гряды и Минскую краевую ледниковую возвышенность которые тесно связаны между собой и образуют единый гигантский амфитеатр краевых образований, прослеживающийся на 250 км. Абсолютные высоты в пределах почвенно-экологического района изменяются от 160–170 м до 300–320 м в пределах Ошмянских краевых ледниковых гряд и от 200–220 м до 345 м на Минской возвышенности. На территории района распространены краевые образования, представленные фронтальными грядами ошмянской стадии сожского оледенения. В большей мере развит холмисто-увалистый и грядово-холмистый рельеф с относительными высотами от 15–20 до 50–60 м. Значительная степень расчлененности рельефа обусловливает подверженность территории Ошмяно-Минского почвенного-экологического района эрозионно-денудационным процессам с образованием оврагов и балок от 3 м на западе до 10–15 м на востоке территории. Важную роль в современном преобразовании рельефа играют техногенные процессы, связанные с добычей стройматериалов, мелиорацией и др. [Матвеев и др., 1988].

Доминирующими почвами являются дерново-подзолистые, развивающиеся на легких суглинках (50,56 %) и супесях (18,56 %), приуроченные к возвышенным участкам рельефа краевых образований [Лапа и др., 2019]. Широко представлены полугидроморфные почвы – дерново-подзолисто-глееватые (около 6 %) и дерново-подзолистые слабоглееватые (около 4,5 %), развивающиеся на легких суглинках. На остальные полугидроморфные почвы приходится около 3 %. Довольно значительна доля торфянисто-глеевых и торфяно-глеевых (13,15 %), формирующихся в долинах рек и денудационных понижениях.

Методика исследования

Получение высокоточных данных о рельефе исследуемой территории производилось с помощью воздушного лазерного сканирования, которое осуществлялось с применением беспилотного летательного аппарата «DJI Matrice 300 RTK», оснащенного лазерным сканером «DJI Zenmuse L1». В результате проведенного обследования и обработки данных была получена ЦМР (рис. 2). Для избежания шумов, вызванных избыточной детальностью модели, полученный растр был генерализован до разрешения в 3 м на пиксель.

Так как данные дистанционного зондирования земли значительно повышают точность классификации почвенного покрова [Флоринский, 2012], то в данном исследовании используется снимок, полученный с созвездия наноспутников «PlanetScope». Снимок имеет пространственное разрешение 3 м и 8 спектральных каналов, в том числе красный (650–680 нм), ближний инфракрасный (845–885 нм) и красный край (697–713 нм), радиометрическое разрешение 12 бит. Снимок датируется 01.07.2022 г. (рис. 3).

Для расчета ковариат были выбраны наиболее часто используемые в отечественных [Флоринский и др., 2009; Докучаев, 2017; Минаев и др., 2018; Минаев, 2020] и зарубежных [McBratney et al., 2003; Minasny, McBratney, 2010; Fathololoumi et al., 2020; Frazier, Hemingway, 2021] исследованиях морфометрические показатели: уклон; общая кривизна поверхности; профильная кривизна поверхности; тангенциальная кривизна поверхности; кривизна Казаратти; Гауссова кривизна поверхности; кривизна контура; геодезическое кручение изолиний; направление потока; топографический позиционный индекс в окрестности 3 и 5 пикселей; топографический индекс влажности; индекс баланса геомассы; индекс сходимости (конвергенции); спектральные индексы MTVI2, RTVICore и SAVI.

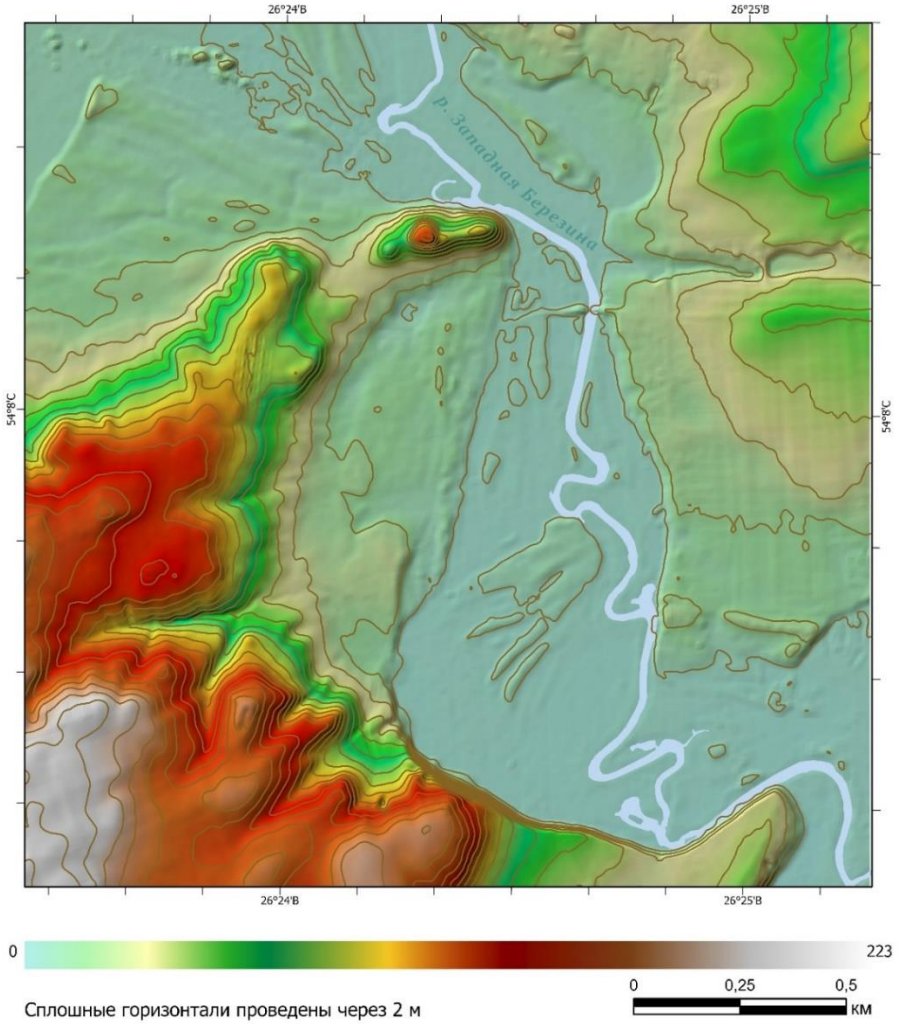

Рис.2. Цифровая модель рельефа на исследуемый участок с разрешением 3 м на пиксель

Fig 2. Digital relief model for the study area with a resolution of 3 meters per pixel

Рис. 3. Космический снимок на исследуемую территорию (комбинация каналов RGB)

Fig 3. Satellite image of the study area (combination of RGB channels)

Обучение модели производилось по эталонным почвенным разрезам (146 шт.), сформированным в базу геоданных, с информацией о гидроморфизме и типовой принадлежности почвы. Информация о разрезах была получена по результатам анализа отчетов об учебной почвенной практике студентов факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета за пятилетний период, дополнена авторами во время полевых выездов. Рассчитанные переменные и фактическая информация о почве классифицировались методом случайных деревьев [Классификатор] с экспертной корректировкой и генерализацией полученных моделей, в результате чего были получены две карты, отражающие распределение почв по гидроморфизму и типовой принадлежности (рис. 4, 5).

Верификация и валидация полученных цифровых почвенных карта проводилась по пропорционально расположенным по площади 495 точкам каждой из групп, содержащих информацию из эталонной почвенной карты, составленной традиционным методом.

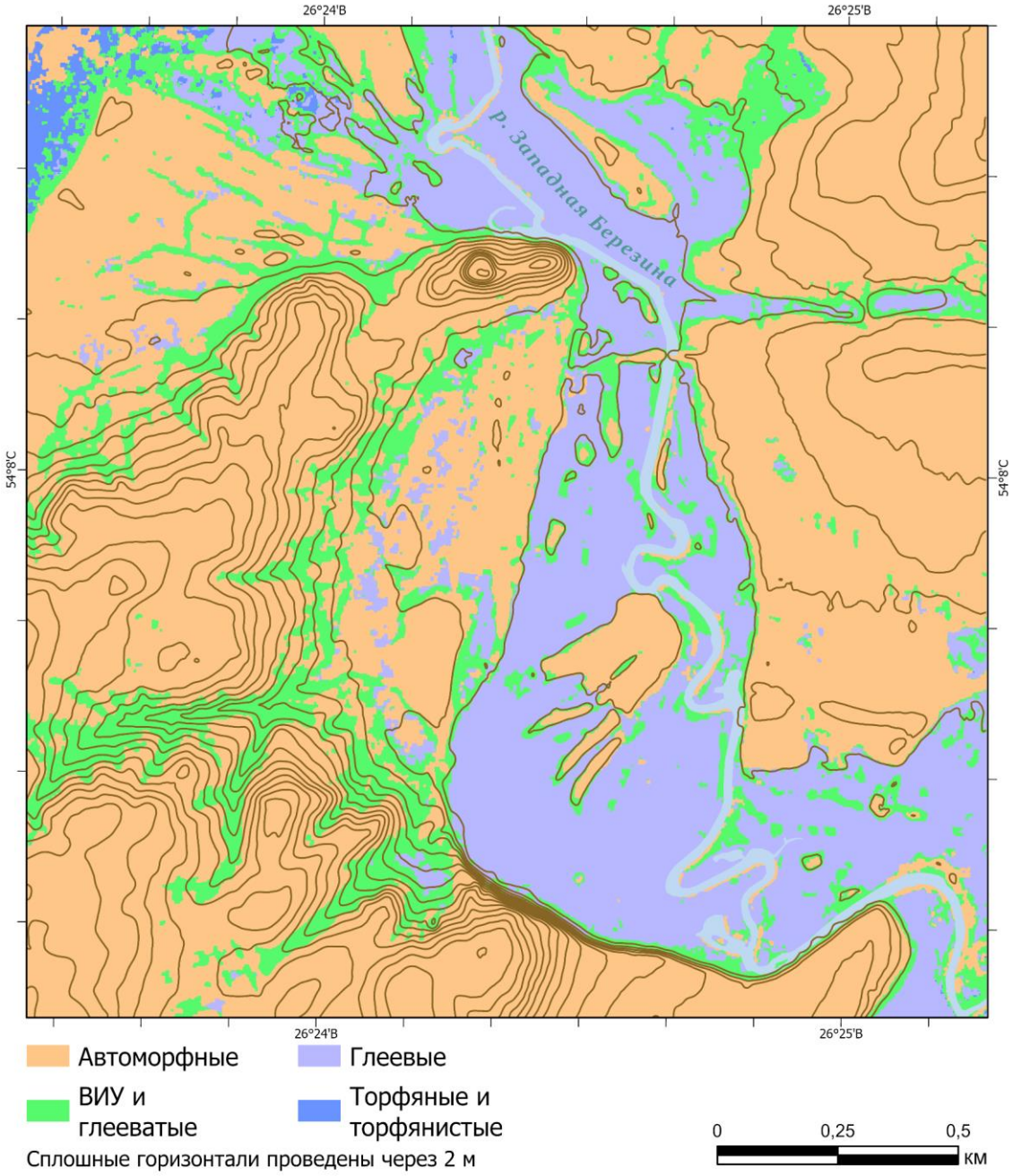

Рис. 4. Результата классификации по гидроморфизму почв

Fig 4. The results of classification by soil hydromorphism

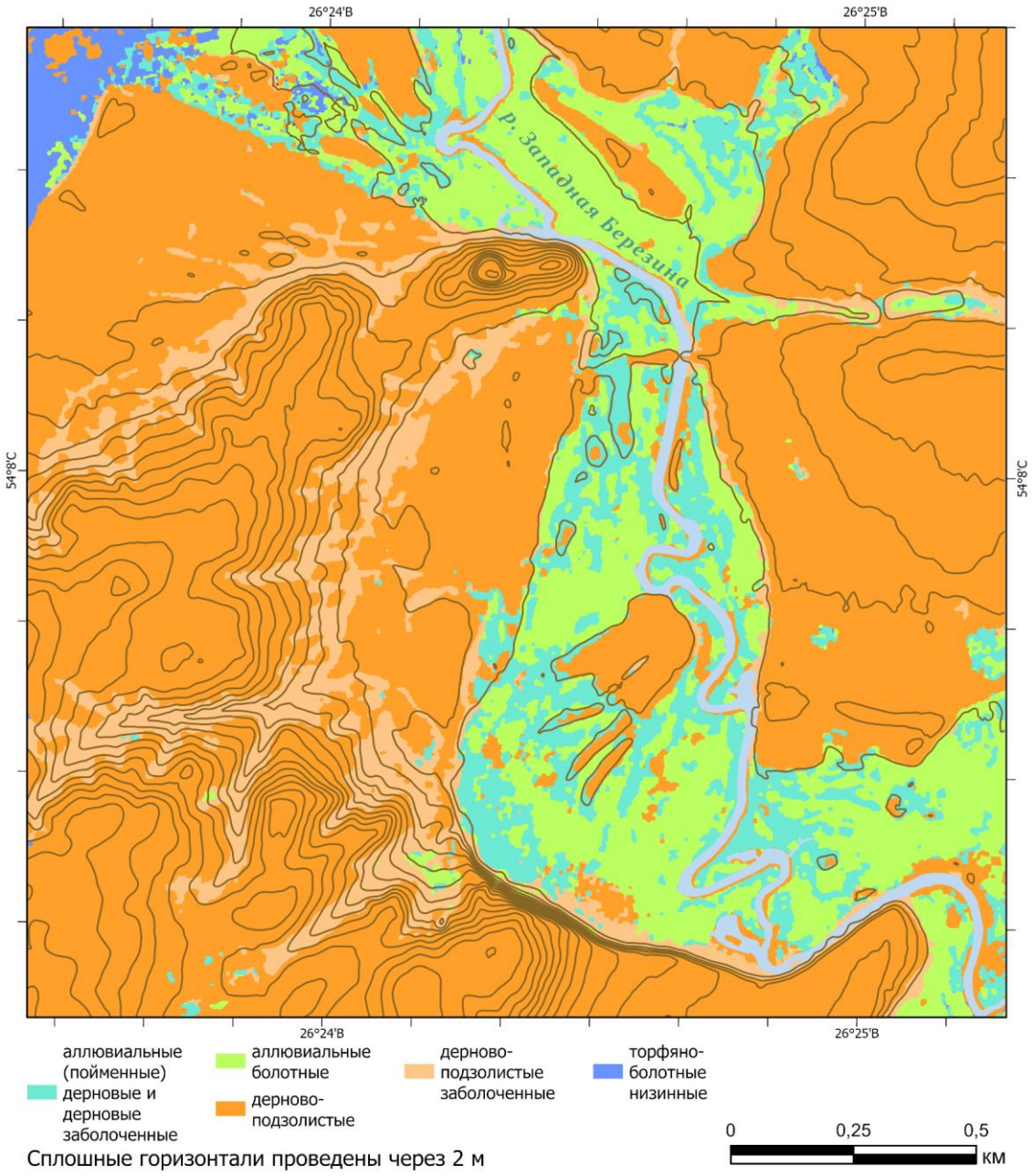

Рис. 5. Результат классификации, полученный по типам почв

Fig 5. Classification result obtained by soil type

Результаты и обсуждение

Полученные карты отображают распределение различных почв на исследуемой территории. Так, распределение почв на местности логично и соответствует особенностям рельефа и растительного покрова исследуемой территории, полевым наблюдениям.

В классификации почв по гидроморфизму автоморфные почвы занимают 60,68 % (258,87 га) от общей площади. Автоморфные почвы в первую очередь приурочены к наиболее возвышенным участкам местности: камовым холмам, вершинам водно-ледниковых холмисто-волнистых равнин. Временно избыточно увлажненные и глееватые почвы приурочены к местам расчленения рельефа ложбинами стока, занимают 16,28 % (69,44 га) от общей площади участка. Группа глеевых почв занимает площадь 22,05 % (94,06 га) и распространена в центральной пойме реки, где степень увлажнения значительно выше, а в период половодья почвен-

ный покров находится под водой. Торфяные и торфянистые почвы занимают всего 1 % (4,25 га) от общей площади и приурочены к притеррасной пойме, где гидрологические связи с рекой выражены менее значительно.

По типовой принадлежности наибольшую площадь, 64,28 % (274,22 га), занимают дерново-подзолистые почвы. Данный тип почв является зональным для территории Республики Беларусь и, соответственно, самым распространенным в стране. Дерново-подзолистые автоморфные почвы приурочены к наиболее возвышенным частям исследуемого участка. На втором месте по площади – аллювиальный болотный тип почв, он занимает площадь 14,94 % (63,75 га). Этот тип почв, как и аллювиальные (пойменные) дерновые заболоченные, которые занимают 9,13 % (38,94 га), приурочен к пойме реки. Данные типы почв по степени гидроморфизма относятся к полугидроморфным. Дерново-подзолистые заболоченные почвы занимают 9,97 % (42,54 га) от общей площади участка, приурочены к расчлененным участкам рельефа, что, скорее всего, является ошибкой классификации. Последние по площади торфяно-болотные низинные почвы – 1,68 % (7,17 га), расположение данного типа почв совпадает с расположением торфяных и торфянистых почв по гидроморфизму.

Эталоном для оценивания точности классификации является почвенная карта территории геостанции «Западная Березина». Был сформирован слой из 495 случайно расположенных точек, значения в которых сравнивалось с эталонной картой, полученной методом прогнозного почвенного картографирования (таблица).

Оценка точности карт

Estimates of the accuracy of maps

Название класса	Количество эталонных точек	Количество правильно классифицированных точек	Точность, %
Гидроморфизм			
Автоморфные	246	228	92,68
Временно избыточно увлажненные (ВИУ) и глееватые	129	44	34,11
Глеевые	39	18	46,15
Торфяные и торфянистые	81	7	8,64
Все классы	*495*	*297*	*60,00*
Тип почв			
Аллювиальные (пойменные) дерновые заболоченные	81	23	28,40
Аллювиальные болотные	58	36	62,07
Дерново-подзолистые	246	229	93,09
Дерново-подзолистые заболоченные	94	24	25,53
Торфяно-болотные низинные	16	6	37,50
Все классы	*495*	*318*	*64,24*

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что модель при определении автоморфных почв позволяет достичь точности в 92,68 %, заметно хуже результаты при определении глеевых почв (точность 46,15 %), и хуже всего удается определить временно избыточно увлажненные и глееватые почвы (точность 34,11 %). Однако следует учитывать, что результаты по торфяным и торфянистым почвам не совсем объективны, так как количество данных по этим почвам было ограничено на исследуемой территории. Если рассматривать пространственное распределение почв, то можно заметить, что торфяные и торфянистые почвы располагаются вблизи друг друга и на модели, и на карте. Почвы с временным избыточным увлажнением и глееватые, в свою очередь, находятся в основном в ложбинах стока и возле поймы и имеют узкие и вытянутые полосы на карте и в модели. Это объясняется тем, что данные почвы располагаются в промежуточном положении между глеевыми и автоморфными почвами, и модель может ошибочно отнести их к одному из этих классов в некоторых случаях. Общая точность классификации по гидроморфизму – 60 %. Результаты классификации по типам почв показывают, что дерново-подзолистые почвы являются наиболее точно классифицируемым типом почв с точностью в 93,04 %. Это можно объяснить тем, что данный тип почв является наиболее распространенным в Беларуси, и было доступно большее количество эталонных точек для обучения модели. Дерново-подзолистые заболоченные почвы оказались самыми трудными для классификации моделью – 25,53 % верно определенных точек. Однако визуальный анализ показывает, что контуры, определенные моделью, соответствуют эталонным контурам на карте. Аллювиально-болотные почвы имеют площадь, которая является второй после дерново-подзолистых, и

достаточно большой показатель точности дешифрования (62,07 %). Аллювиальные (пойменные) дерновые заболоченные, торфяные и торфяно-болотные низинные имеют примерно одинаковую точность дешифрования и площадь.

В целом, результаты классификации по типам почв показали общую точность классификации по типам почв 64,24 %, что говорит об эффективности методики, используемой для автоматической классификации почв.

Заключение

Прогрессивные методы цифрового почвенного картографирования с использованием методов машинного обучения и анализа данных являются трендом современной науки. Они позволяют значительно упростить, ускорить и уточнить работу исследователей, поскольку позволяют обрабатывать большие объемы данных и выявлять скрытые зависимости между различными переменными.

В данном исследовании было показано, что прогнозное почвенное картографирование на основе машинного обучения способно достигать достаточно высокой точности в прогнозировании почвенного покрова как по гидроморфизму почв (общая точность классификации составила 60 %, по классам варьирует от 8,64 % в торфяных и торфянистых почвах до 92,68 % в автоморфных почвах), так и по типам почв (общая точность классификации составила 64,24 %, по классам варьирует от 25,53 % в дерново-подзолистых заболоченных почвах до 93,09 % в дерново-подзолистых почвах). Однако применения метода обучения модели и классификации «случайных деревьев с обучением» в настоящее время не может обеспечить высокой точности, чтобы полностью заменить работу человека. Тем не менее он может быть использован для предварительной обработки данных и для определения наиболее важных показателей, которые могут повысить точность модели.

В исследовании использовались 17 показателей для обучения модели. Для дальнейшего моделирования можно экспериментировать с выбором других показателей и отсеивать наименее значимые, а также произвести дополнительные полевые исследования с учетом особенностей территории.

Таким образом, цифровое почвенное картографирование с использованием методов машинного обучения является мощным инструментом для прогнозирования почвенного покрова и создания почвенных карт. Для достижения наилучших результатов необходимо проводить дополнительные исследования и эксперименты, чтобы уточнить методики и выбрать наиболее важные показатели для обучения модели.

Список источников

Азарёнок Т.Н., Матыченков Д.В. Научные основы почвенного картографирования в Республике Беларусь // Эволюция почв и развитие научных представлений в почвоведении. 2022. С. 46–50.

Геопортал земельно-информационной системы Республики Беларусь // Геопортал ЗИС. Инф. сист. URL: https://gismap.by/next/ (дата обращения: 22.10.2023).

Докучаев В.В. Русский чернозем. Отчет Императорскому вольному экономическому обществу. СПб. : Тип. Деклерона и Евдокимова, 1883. 376 с.

Докучаев П.М. Построение цифровой почвенной карты и картограммы углерода с использованием методов цифрового почвенного картографирования (на примере Вятско-Камской провинции дерновоподзолистых почв южной тайги) : дис. … канд. боиол. наук. М., 2017. 161 с.

Жичкин К.А., Жичкина Л.Н. Оценка современных технологий в сельском хозяйстве // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования. 2016. С. 3830–3838.

Захаров С.А. Курс почвоведения. 2-е изд., испр. и доп. М. ; Л. : Сельколхозгиз, 1931. 550 с.

Киндеев А.Л. Перспективные направления геостатистического анализа и стохастического моделирования с учетом экономических издержек при точном земледелии // Вестник Московского университета. Сер. 17: Почвоведение. 2022. № 2. С. 59–70.

Классификатор произвольных деревьев с обучением (Image Analyst) // Esri. ArcGIS Pro Inf. sist. URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/image-analyst/train-random-trees-classifier.html (дата обращения: 05.01.2023).

Клебанович Н.В., Киндеев А.Л. Сопряженность изменений урожайности зерновых и зернобобовых культур и уровня применения удобрений по районам Республики Беларусь // Вестник БГУ. Сер. 2: Химия. Биология. География. 2022. Т. 1. С. 15–27.

Лапа В.В., Азаренок Т.Н., Шульгина С.В., Шибут Л.И., Матыченков Д.В., Матыченкова О.В., Дыдышко С.В., Цыбулько Н.Н., Устинова А.М., Цырибко В.Б. Почвы Республики Беларусь. Минск : Ивц Минфина, 2019. 632 с.

Матвеев А.В., Гурский Б.Н., Левицкая Р.И. Рельеф Беларусии. Минск : МН. Университетское, 1988. 320 с.

Минаев Н.В. Цифровая модель почвенно-ландшафтных связей владимирского ополья : дис. … канд. боиол. наук. М., 2020. 144 с.

Минаев Н.В., Бузылев А.М., Таллер Е.Б. Разработка крупномасштабной цифровой модели автоматизированного почвенно-агроэкологического картографирования на примере представительных ландшафтов Владимирского Ополья // АгроЭкоИнфо. 2018. № 3. С. 24–42.

Мониторинг достижения связанных с продовольствием и сельским хозяйством показателей ЦУР, 2023 год // Рим: ФАО. Инф. сист. URL: https://www.fao.org/documents/card/ru/c/cc7088ru (дата обращения: 22.10.2023).

О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Инф. сист. URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100059 (дата обращения: 22.10.2023).

ООН // Всемирный день почв. Инф. сист. URL: https://www.un.org/ru/observances/world-soil-day (дата обращения: 22.10.2023).

Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.

Темботов Р.Х., Горобцова О.Н., Гедгафова Ф.В., Улигова Т.С., Хакунова Е.М. Применение дистанционной информации и ГИС-технологий для создания цифровых почвенных карт (на примере равнинно-предгорной части Кабардино-Балкарии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. С. 128–137.

Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дис. … д-ра техн. наук. Пущино, 2010. 267 с.

Флоринский И.В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических gpsсъемок и почвенных наземных съемок) // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 56–65.

Флоринский И.В., Айлерс Р.Дж., Бёртон Д.Л., Мак-Магон Ш.К., Монреал К.М., Фаренхорст А. Прогнозное почвенное картографирование на основе цифрового моделирования рельефа // Геоинформатика. 2009. № 1. С. 22–32.

Флоринский И.В. Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. 2012. № 4. С. 500–506.

Червань А.Н. Типизация структуры почвенного покрова с использованием ГИС для оценки производительного потенциала агроландшафтов (на примере Республики Беларусь) // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31, № 3. С. 280–289.

Шибут Л.И., Азаренок Т.Н. Почвенное районирование территории Беларуси: история, характеристика, использование // Почвоведение и агрохимия. 2018. № 1. С. 9–17.

Fathololoumi S., Vaezi A.R., Alavipanah S.K., Ghorbani A., Saurette D., Biswas A. Improved digital soil mapping with multitemporal remotely sensed satellite data fusion: A case study in Iran // Science of the Total Environment. 2020. V. 721. 14 c.

Frazier A.E., Hemingway B.L. A technical review of planet smallsat data: Practical considerations for processing and using planetscope imagery // Remote Sensing. 2021. V. 13, № 19. 12 p.

Heuvelink G.B.M., Webster R. Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure // Spatial statistics. 2022. V. 50. P. 1–9.

Knoema data hub. URL: https://public.knoema.com/ (date of accessed: 27.03.2023).

McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. 2003. № 1–2. P. 3–52.

Meng X., Bao Y., Liu H., Zhang X., Wang X. A new digital soil mapping method with temporal-spatial-spectral information derived from multi-source satellite images // Geoderma. 2022. V. 425.

Minasny B., McBratney A.B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. V. 2. P. 301–311.

Oliver M.A. An overview of geostatistics and precision agriculture // Geostatistical applications for precision agriculture. 2010. 34 p.

Reference

Azaronok T.N., Matychenkov D.V. *Nauchnyye osnovy pochvennogo kartografirovaniya v Respublike Belarus'* [Scientific foundations of soil mapping in the Republic of Belarus] //Evolyutsiya pochv i razvitiye nauchnykh predstavleniy v pochvovedenii. 2022. pp. 46–50. In Russian

Geoportal zemel'no-informatsionnoy sistemy Respubliki Belarus' [Geoportal of the land information system of the Republic of Belarus] // Geoportal ZIS. Inf. sist. URL: https://gismap.by/next/ (Date of accessed 22.10.2023). . In Russian

Dokuchayev V.V. *Russkiy chernozem. Otchet Imperatorskomu vol'nomu ekonomicheskomu obshchestvu* [Russian Black Earth. Report to the Imperial Free Economic Society]. St.Petersburg: Tip. Deklerona i Yevdokimova, 1883. 376 p. In Russian

Dokuchayev P.M. *Postroyeniye tsifrovoy pochvennoy karty i kartogrammy ugleroda s ispol'zovaniyem metodov tsifrovogo pochvennogo kartografirovaniya (na primere vyatsko-kamskoy provintsii dernovopodzolistykh pochv yuzhnoy taygi)* [Construction of a digital soil map and carbon cartogram using digital soil mapping methods (using the example of the Vyatka-Kama province of sod-podzolic soils of the southern taiga)]: dis. kand. boiol. nauk: 03.02.13. Moscow, 2017. 161 p. In Russian

Zhichkin K.A., Zhichkina L.N. *Otsenka sovremennykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve* [Evaluation of modern technologies in agriculture*]* // Sovremennoye ekologicheskoye sostoyaniye prirodnoy sredy i nauchno-prakticheskiye aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya. 2016. pp. 3830–3838. In Russian

Zakharov S.A. *Kurs pochvovedeniya* [Soil Science Course]. 2-ye izd. ispr. dop. Moscow – Leningrad: Sel'kolkhozgiz. 1931. 550 p. In Russian

Kindeev A.L. *Perspektivnyye napravleniya geostatisticheskogo analiza i stokhasticheskogo modelirovaniya s uchetom ekonomicheskikh izderzhek pri tochnom zemledelii* [Prospective directions of geostatistical analysis and stochastic modeling taking into account economic costs in precision agriculture] // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedeniye* [Lomonosov soil science journal]. 2022. No 2. pp. 59–70. In Russian

Klassifikator proizvol'nykh derev'yev s obucheniyem [Arbitrary Tree Classifier with Supervision] (Image Analyst) // Esri. ArcGIS Pro Inf. sist. URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/image-analyst/train-random-trees-classifier.htm (Date of accessed: 05.01.2023).

Klebanovich N.V., Kindeev A.L. *Sopryazhennost' izmeneniy urozhaynosti zernovykh i zernobobovykh kul'tur i urovnya primeneniya udobreniy po rayonam Respubliki Belarus'* [Correlation of changes in the yield of grain and leguminous crops and the level of fertilizer application in the regions of the Republic of Belarus]// Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya [Bulletin of BSU. Episode 2, Chemistry. Biology. Geography]. 2022. V. 1. pp. 15–27. In Russian

Lapa V.V., Azarenok T.N., Shul'gina S.V., Shibut L.I., Matychenkov D.V., Matychenkova O.V., Dydyshko S.V., Tsybul'ko N.N., Ustinova A.M., Tsyribko V.B. *Pochvy Respubliki Belarus': Monografiya* [Soils of the Republic of Belarus: Monograph]. Minsk: Ivts Minfina, 2019. 632 p. In Russian

Matveyev A.V., Gurskiy B.N., Levitskaya R.I. *Rel'yef Belarusii* [Relief of Belarus]. Minsk: MN. Universitetskoye, 1988. 320 p. In Russian

Minayev N.V. *Tsifrovaya model' pochvenno-landshaftnykh svyazey vladimirskogo opol'ya* [Digital model of soil-landscape connections of Vladimir Opolye]: dis. kand. boiol. nauk: 03.02.13. Moscow, 2020. 144 p. In Russian

Minayev N.V., Buzylev A.M., Taller Ye.B. *Razrabotka krupnomasshtabnoy tsifrovoy modeli avtomatizirovannogo pochvenno-agroekologicheskogo kartografirovaniya na primere predstavitel'nykh landshaftov Vladimirskogo Opol'ya* [Development of a large-scale digital model of automated soil-agroecological mapping using the example of representative landscapes of Vladimir Opolye] // AgroEkoInfo. 2018. No. 3. pp. 24–42. In Russian

Monitoring dostizheniya svyazannykh s prodovol'stviyem i sel'skim khozyaystvom pokazateley TSUR, 2023 god [Tracking progress on food and agriculture-related SDG indicators]// Rim: FAO, Inf. sist. URL : https://www.fao.org/documents/card/ru/c/cc7088ru. (Date of accessed 22.10.2023). In Russian

O Gosudarstvennoy programme «Agrarnyy biznes» na 2021–2025 gody [About the State Program "Agricultural Business" for 2021–2025] // Natsional'nyy pravovoy Internet-portal Respubliki Belarus', Inf. sist. URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100059. (Date of accessed 22.10.2023). In Russian

OON // *Vsemirnyy den' pochv* [World Soil Day,], Inf. sist. URL: https://www.un.org/ru/observances/world-soil-day. (Date of accessed 22.10.2023). In Russian

Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova Ye.Yu. *Sovremennyye trendy i problemy pochvennoy kartografii* [Modern trends and problems of soil mapping] // *Pochvovedeniye* [Eurasian Soil Science]. 2019. No. 5. pp. 517–528. In Russian

Tembotov R.Kh, Gorobtsova O.N., Gedgafova F.V., Uligova T.S., Khakunova Ye.M. *Primeneniye distantsionnoy informatsii i GIS-tekhnologiy dlya sozdaniya tsifrovykh pochvennykh kart (na primere ravninno-predgornoy chasti Kabardino-Balkarii)* [Application of remote information and GIS technologies for creating digital soil maps (using the example of the plain-foothill part of Kabardino-Balkaria)] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. 2022. pp. 128–137. In Russian

Florinskiy I.V. *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'yefa* [Theory and applications of mathematical and cartographic relief modeling]: dis. d-r. tekhn. nauk: 25.00.33. Pushchino, 2010. 267 p. In Russian

Florinskiy I.V. *Kartografirovaniye pochvy na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'yefa (po dannym kinematicheskikh gpss"yemok i pochvennykh nazemnykh s"yemok)* [Soil mapping based on digital terrain modeling (based on kinematic GPS surveys and soil ground surveys)] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa* [Exploring the Earth from Space]. 2009. No. 6. pp. 56–65. In Russian

Florinskiy I.V., Aylers R.Dzh., Borton D.L., Mak-Magon SH.K., Monreal K.M., Farenkhorst A. *Prognoznoye pochvennoye kartografirovaniye na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'yefa* [Predictive soil mapping based on digital terrain modeling] // Geoinformatika. 2009. No.1. pp. 22–32. In Russian

Florinskiy I.V. *Gipoteza Dokuchayeva kak osnova tsifrovogo prognoznogo pochvennogo kartografirovaniya (k 125-letiyu publikatsii)* [Dokuchaev's hypothesis as a basis for digital predictive soil mapping (on the 125th anniversary of publication)] // *Pochvovedeniye* [Eurasian Soil Science]. 2012. No. 4. pp. 500–506. In Russian

Chervan A.N. *Tipizatsiya struktury pochvennogo pokrova s ispol'zovaniyem GIS dlya otsenki proizvoditel'nogo potentsiala agrolandshaftov (na primere Respubliki Belarus')* [Typification of the soil cover structure using GIS for assessing the productive potential of agricultural landscapes (using the Republic of Belarus as an example)] //Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Biologi ya. Nauki o Zemle». 2021. V. 31. No. 3. pp. 280–289. In Russian

Shibut L.I., Azarenok T.N. *Pochvennoye rayonirovaniye territorii Belarusi: istoriya, kharakteristika, ispol'zovaniye* [Soil zoning of the territory of Belarus: history, characteristics, use] // *Pochvovedeniye i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry]. 2018. No. 1. pp. 9–17. In Russian

Fathololoumi S., Vaezi A.R., Alavipanah S.K., Ghorbani A., Saurette D., Biswas A. Improved digital soil mapping with multitemporal remotely sensed satellite data fusion: A case study in Iran //Science of the Total Environment. 2020. V. 721. 14 p.

Frazier A.E., Hemingway B.L. A technical review of planet smallsat data: Practical considerations for processing and using planetscope imagery // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 19. 12 p.

Heuvelink G.B.M., Webster R. Spatial statistics and soil mapping: A blossoming partnership under pressure //Spatial statistics. 2022. V. 50. pp. 1-9.

Knoema data hub URL: https://public.knoema.com/ (Date of accessed: 27.03.2023)

McBratney A. B, Mendonça Santos M. L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. 2003. No.1–2. pp. 3–52

Meng X., Bao Y., Liu H., Zhang X., Wang X. A new digital soil mapping method with temporal-spatial-spectral information derived from multi-source satellite images //Geoderma. 2022. V. 425.

Minasny B., McBratney A.B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons // Geoderma. 2016. V. 2. pp. 301–311.

Oliver M.A. An overview of geostatistics and precision agriculture // Geostatistical applications for precision agriculture. 2010. 34 p.

Информация об авторах:

Сазонов А.А., старший преподаватель, кафедра почвоведения и геоинформационных систем, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

E-mail: alexey.szonov@gmail.com

Киндеев А.Л., преподаватель, кафедра почвоведения и геоинформационных систем, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

E-mail: AKindeev@tut.by

Князев И.С., стажер младшего-научного сотрудника, кафедра почвоведения и геоинформационных систем, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

E-mail: ivanknyazev0509@gmail.com

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Sazonov A.A., Senior Lecturer, Department of Soil Science and Geoinformation Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

E-mail: alexey.szonov@gmail.com

Kindeev A.L., Lecturer, Department of Soil Science and Geoinformation Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.
E-mail: AKindeev@tut.by
Knyazev I.S., trainee junior researcher, Department of Soil Science and Geoinformation Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.
E-mail: ivanknyazev0509@gmail.com

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена после рецензирования 03.05.2024; принята к публикации 03.03.2025

The article was submitted 27.10.2023; approved after reviewing 03.05.2024; accepted for publication 03.03.2025

Научный журнал

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

2025. № 1

Редактор Ю.П. Готфрид
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик С.И. Гертнер
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Для оформления обложки использована проекция Земного шара
из работы: Stampfli G.M., Borel G.D. / Earth and Planetary Science Letters 196 (2002) 17-33.
http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X

Подписано к печати 22.04.2025 г. Формат 60×84$^{1}/_{8}$.
Гарнитура Times. Печ. л. 15,2; усл. печ. л. 14,1.
Тираж 50 экз. Заказ № 6283. Цена свободная.

Дата выхода в свет 28.04.2025 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: http://publish.tsu.ru; E-mail: rio.tsu@mail.ru

View publication stats