

Использование данных Landsat-8 для классификации и выделения отвалов вскрышных пород

© 2026. А. А. Перевощикова^{1,2}, м. н. с.,

Н. А. Кобелев², инженер, Т. С. Бачурин², лаборант,

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4,
e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

С помощью материалов дистанционного зондирования Земли (спутник Landsat-8) произведена классификация землепользования с выделением отвалов вскрышных пород на закрытом месторождении угля и на разрабатываемом месторождении калийно-магниевых солей. Классификация землепользования на основе снимков дистанционного зондирования – сложная задача, однако точная классификация пикселей в соответствии с классом землепользования представляет собой значительную проблему, которую может решить интерактивная контролируемая классификация. Настоящее исследование было сосредоточено на двух крупных месторождениях полезных ископаемых Пермского края: Кизеловский угольный бассейн – территории посёлков Углеуральский и Шахтный, город Кизел и его микрорайон Рудничный, а также посёлок Шахта; Верхнекамское месторождение солей – окрестности городов Соликамск и Березники. Исследуемые территории были разделены на семь классов землепользования: отвалы территории, водные объекты, сельскохозяйственные участки, пустоши, хвойные леса, смешанные леса, урбанизированные территории. Результаты показали, что площадь шахтных отвалов, выделенных методом интерактивной контролируемой классификации, составила 162,8 га, а площадь эталона – 153,3 га. Площадь солевых отвалов, выделенных методом интерактивной контролируемой классификации, составила 927,9 га, а площадь эталона – 891,4 га. Исследование подчёркивает важность использования изображений дистанционного зондирования для решения проблем, связанных с классификацией землепользования на основе обработки пикселей, являясь одним из этапов экодиагностики, которая позволяет получать объективную информацию о состоянии окружающей среды в местах разработки месторождений полезных ископаемых для прогнозных целей. Применение интерактивной контролируемой классификации даёт возможность более точно определять площади отвалов и анализировать пространственное распределение классов землепользования в горнодобывающих районах Пермского края, что способствует развитию методов точного анализа землепользования с потенциальным применением в различных областях, таких как городское планирование, экологический мониторинг и управление ресурсами.

Ключевые слова: угольное месторождение, месторождение солей, дистанционное зондирование, интерактивная контролируемая классификация, землепользование.

Using Landsat-8 data for classification and delineation of overburden dumps

© 2026. A. A. Perevoshchikova^{1,2} ORCID: 0000-0003-1769-7740²

N. A. Kobelev² ORCID: 0009-0007-3129-5568²

T. S. Bachurin² ORCID: 0009-0008-1825-5091¹

¹Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy Ave., Perm, Russia, 614990,

²Perm State National Research University,
4, Genkel St., Perm, Russia, 614990,
e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

Earth remote sensing materials (Landsat-8 satellite) were used to conduct a land use classification within both a closed coal deposit and an operating potassium-magnesium salts deposit, focusing on the identification of waste rock dumps. Classifying land use through remote sensing imagery presents a formidable challenge; however, the accurate classification of pixels based on their respective land use characteristics poses a notable difficulty that can be mitigated by employing interactive supervised classification. This research focused on two large reserves located in Perm Krai: the Kizel

Coal Basin (encompassing the areas of Ugleurskiy and Shakhtnyy villages, Kizel with its Rudnichnyy microdistrict, and Shakhta village) and the Verkhnekamskoe Potash Deposit (near Solikamsk and Berezniki). The study areas were divided into seven distinct land use categories: waste dumps, water bodies, agricultural lands, bare lands, coniferous forests, mixed forests, and urban areas. The findings showed that the extent of mine dumps, as identified through the interactive supervised classification, covered 162.8 hectares, with a reference area of 153.3 hectares. The salt dump area, as determined by the interactive supervised classification, covered a total of 927.9 hectares, with a reference area of 891.4 hectares. This study emphasizes the significance of employing remote sensing data for addressing challenges related to pixel-oriented land use classification. This represents one of the phases in environmental diagnostics that facilitates the acquisition of objective data regarding the environmental conditions in areas undergoing the extraction of mineral resources for forecasting. The application of interactive supervised classification offers significant insights regarding the extent of waste areas and the category distribution within the studied mining areas of Perm Krai. It promotes the advancement of precise land use analysis techniques that may be applied across diverse fields, including urban development, ecological surveillance, and resource management.

Keywords: coal deposit, salt deposit, remote sensing, interactive supervised classification, land use.

Большое количество спутниковых изображений с открытым исходным кодом широко используется в современных технологиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что открывает новые возможности для получения информации о добыче полезных ископаемых и о воздействии горнодобывающей промышленности на окружающую среду (ОС). Экологическое картографирование, являясь одним из этапов экодиагностики, позволяет получить объективную, достоверную и наглядную информацию о состоянии ОС [4]. Однако пространственные особенности ландшафта, наблюдаемые с помощью спутниковых снимков, многогранны. Они объединяют различные поверхности (урбанизированные территории, сельскохозяйственные участки и т.д.) в единый комплекс. Из-за разнообразия и сложности пространственных особенностей, классификация территорий является важной задачей при решении проблем в области землепользования и охраны ОС.

Проблема поиска и идентификации земель, нарушенных в результате горнодобывающей деятельности, актуальна для промышленных регионов, поскольку большая часть данных земель приходится на горнопромышленные отвальные ландшафты (места размещения отходов). Путём выбора и применения надёжного метода классификации, который станет инструментом для решения природоохранных задач в горном деле, возможно точное определение пространственных закономерностей на основе данных спутникового наблюдения.

В настоящее время существуют различные методы классификации цифровых изображений, в частности для добывающей отрасли промышленности, которые имеют свои преимущества и ограничения. При выборе метода классификации необходимо учитывать основные условия и характер решаемой про-

блемы [2]. Например, в работе [3] использована компьютерная обработка спутниковых снимков Landsat. Авторы исследовали пять округов (7500 км²) в восточном Огайо, земли которых были нарушены в ходе открытой добычи угля. Составленные в результате исследования карты горных выработок имели точность классификации в диапазоне от 95,5 до 100 %. Компьютерная обработка данных применима и для определения эффективности мелиоративных работ. В угледобывающем регионе Центральной Пенсильвании [4] она помогла выявить различные виды растительности, возрастные классы и плотность растительного покрова с точностью до 92 %.

Однако при обработке данных (с применением статистических методов) обнаружены некоторые ограничения. К примеру, в работе [5] заключено, что ограничения использования статистических методов в большей степени связаны с допущениями о распределении и лимитом на ввод данных. Многие исследователи утверждают, что алгоритмы машинного обучения, такие как метод опорных векторов (SVM), в большинстве случаев могут классифицировать набор данных с более высокой точностью, нежели обычные классификаторы [6, 7]. Учёными были поставлены эксперименты с двумя эталонными наборами данных изображений ДЗЗ, где точность тестирования, повторяемость и оценка превышают 93 %. Метод SVM также был применён в работе [8] для выявления площадей шахт, отвалов и лесов. Классификация SVM использовалась для обнаружения изменений, связанных с открытой разработкой месторождений. Алгоритм классификации SVM позволил выяснить, что площадь шахт и отвалов сократилась, а площадь лесов увеличилась.

Имеются исследования по использованию данных ДЗЗ для оценки геоэкологической ситуации на объектах добывающей про-

мышленности [9–12]. Благодаря обработке данных спутникового мониторинга, можно дать количественную оценку комплексного уровня техногенного подавления фитоценозов естественной биоты за границами земельного отвода горных предприятий. Метод иерархической классификации растительности на основе лидарной технологии, дерева решений и классификатора случайного леса был опробован на полигоне отходов горнодобывающего района Хайдайгоу [12] и эффективно выявил различия между деревьями и видами трав с точностью классификации до 87,5 % и коэффициентом Каппа 0,79, что было почти на 43 % выше, чем при неконтролируемой классификации, и на 10,7–22,7 % выше, чем при других контролируемых методах классификации.

Методы ДЗЗ также применимы при мониторинге [13] и инвентаризации нарушенных земель в районах добычи угля [14–16] и районах отработки техногенных россыпей [17]. Полученные данные с разновременных многозональных спутниковых снимков в районах добычи угля [14, 15] позволяют установить точные границы терриконов, определить их характеристики, оценить временные изменения и пространственные отношения с другими территориальными объектами, а также сделать вывод о показателях биомассы и покрытия растительным покровом горнопромышленных ландшафтов. В том числе метод классификации применим для обнаружения разновозрастных залежей

эрозионно-опасных территорий [18] и незаконных свалок [19].

На территории Пермского края расположены два крупных месторождения – закрытое месторождение угля Кизеловский угольный бассейн (КУБ) и действующее Верхнекамское месторождение солей (ВКМС), на которых размещено большое количество отвалов вскрышных пород [20–22], негативно воздействующих на ОС [23–25].

Таким образом, целью исследования является выявление и картографирование отвалов вскрышных пород на территории Кизеловского угольного бассейна и Верхнекамского месторождения солей, а также идентификация этих территорий для организации мониторинга и прогнозирования дальнейших изменений в окружающей среде.

Объекты и методы исследования

Исзуемыми территориями для выделения шахтных отвалов на КУБе выбраны посёлки Углеуральский и Шахтный, город Кизел и его микрорайон Рудничный, а также посёлок Шахта в северном участке (рис. 1). Изучаемыми территориями для выделения солеотвалов на ВКМС являются окрестности городов Соликамск и Березники (рис. 1).

Предварительным и ключевым этапом для успешной классификации и выделения шахтных отвалов является получение данных ДЗЗ. Сервис USGS EarthExplorer [26]

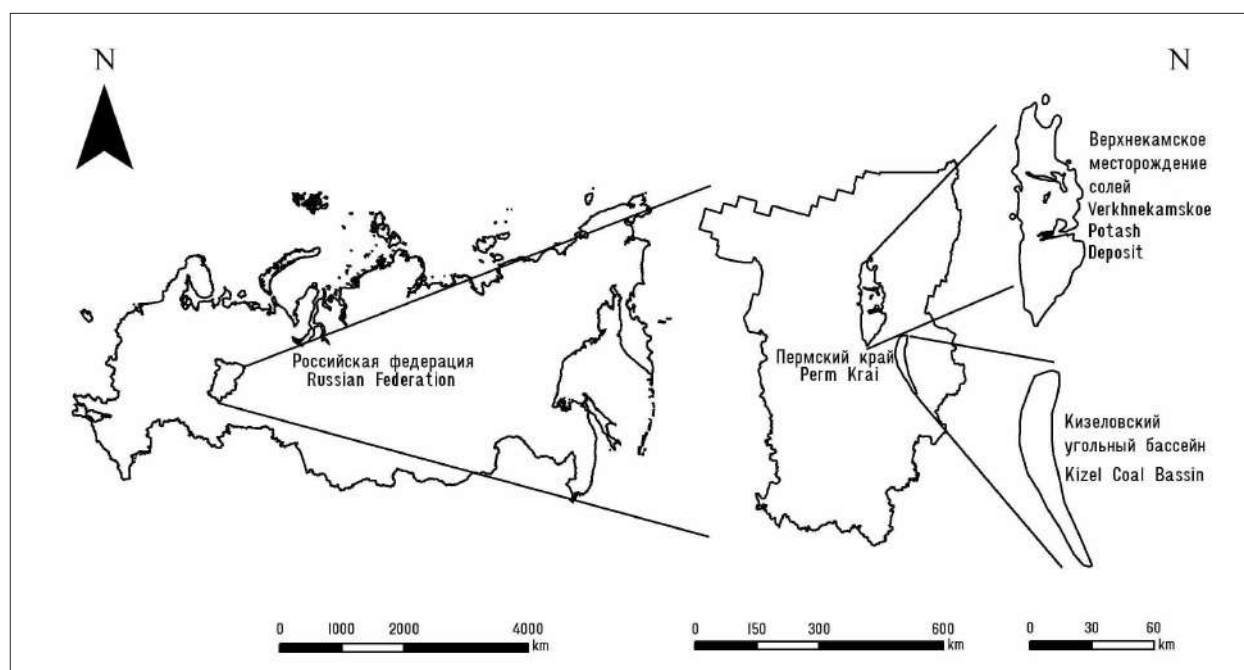


Рис. 1. Территория исследования – Кизеловский угольный бассейн и Верхнекамское месторождение солей / Fig. 1. Study area – Kizel Coal Basin (KCB) and Verkhnekamsk Potash Deposit (VPD)

предоставляет данные со спутников группировки Landsat, включая все спектральные каналы.

В данном исследовании использовался снимок Landsat-8 от 13.06.2023 с пространственным разрешением 30 м/пикс в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне для классификации шахтных отвалов и снимок Landsat-8 от 15.08.2023 с соответствующими спектральными характеристиками для классификации солеотвалов (табл. 1).

Ключевым аспектом исследования являлся анализ средней яркости изображений после их фильтрации через красный (Red), зелёный (Green), синий (Blue) и ближние инфракрасные каналы (NIR, SWIR). Несмотря на обилие имеющихся данных, выделение основных природных и антропогенных объектов обычно выполняется с использованием именно этих каналов [24]. Значения пикселей изображения сохранялись в виде 8-битных целых чисел, а их спектральные каналы объединялись для создания единого композита, который использовался для выполнения классификации. В таблице 1 представлено подробное описание свойств и характеристик данных.

Финальный композит был обработан путём передискретизации при отображении методом кубической свёртки в программе ArcMap и включал в себя 5 спектральных каналов.

Интерактивная контролируемая классификация – это метод анализа данных в программном обеспечении ArcMap от ESRI, позволяющий пользователю активно участвовать в процессе классификации и контролировать его результаты. В рамках использования этого инструмента пользователь предоставляет программе обучающие образцы для каждого класса объектов на изображении. Эти образцы служат основой для определения критериев классификации. Однако, в отличие от традиционной контролируемой классификации, где пользователь выбирает все образцы заранее, в данном инструменте пользователь может

вносить изменения и корректировать процесс классификации в реальном времени на основе предварительных результатов [16].

На рисунке 2 (см. цв. вкладку I) представлены эталонные образцы, используемые для интерактивной контролируемой классификации исследуемых территорий.

Дешифрирование специфических участков горнодобывающих территорий – шахтных отвалов и солеотвалов – прежде всего, связано с такими дешифровочными признаками как форма и цвет объекта в синтезе SWIR-NIR-Red. В данном синтезе отвалы, как и другие нарушенные земельные участки, отображаются различными оттенками, близкими к ярко-розовому цвету, что зависит от разрабатываемой породы. Важным признаком, который помогает в дешифрировании, является наличие подъездных путей и других производственных сооружений. Иные объекты дешифрирования изучались с использованием синтеза каналов NIR-Red-Green. В этой комбинации выделяется растительность по оттенкам красного цвета, городская застройка – зелёно-голубого, а открытая почва по коричневому цвету [24].

Наибольшую сложность на этапе выделения эталонов представляло отделение шахтных отвалов от городской застройки и открытой почвы. Для решения данной проблемы использовался инструмент Arc Toolbox «Фильтр большинства», увеличение числа эталонов для каждого класса (7 эталонов для отвалов, 15 – для других классов). Путём фильтрации изображения и увеличения количества и площади эталонов удалось получить достаточно точное выделение отвалов и других классов.

Инструмент «фильтр большинства» использовался 4 раза со следующими параметрами: число соседних ячеек – EIGHT; порог замещения – MAJORITY. Полученные итоговые карты классификации землепользования составлены с помощью программного обеспечения ArcMap от ESRI.

Таблица 1 / Table 1

Характеристика спектральных каналов Landsat-8
Characteristics of Landsat-8 spectral channels

Landsat-8 OLI		
Номер канала Channel No.	Длина волны, мкм Wavelength, mkm	Пространственное разрешение (м/пикс) Spatial resolution (m/pixels)
2 (Blue)	0,45–0,515	30
3 (Green)	0,525–0,60	30
4 (Red)	0,63–0,68	30
5 (NIR)	0,845–0,885	30
6 (SWIR)	1,56–1,66	30

А. А. Перевощикова, Н. А. Кобелев, Т. С. Бачурин
«Использование данных Landsat-8 для классификации
и выделения отвалов вскрышных пород». С. 31.

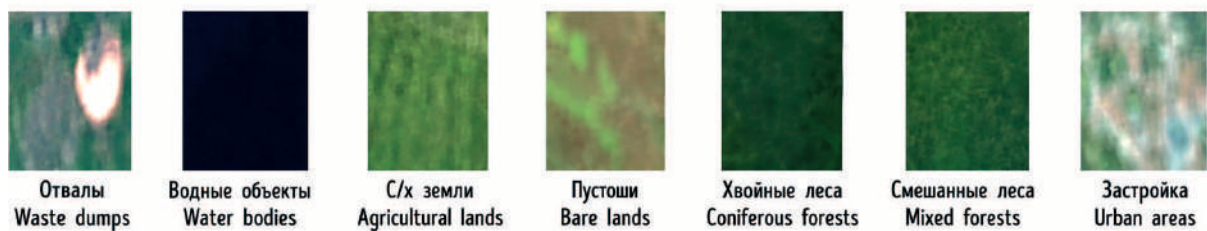


Рис. 2. Образцы классов в синтезе натуральных цветов, используемые для проведения классификации землепользования
Fig. 2. Class samples in natural color synthesis for conducting the land use classification

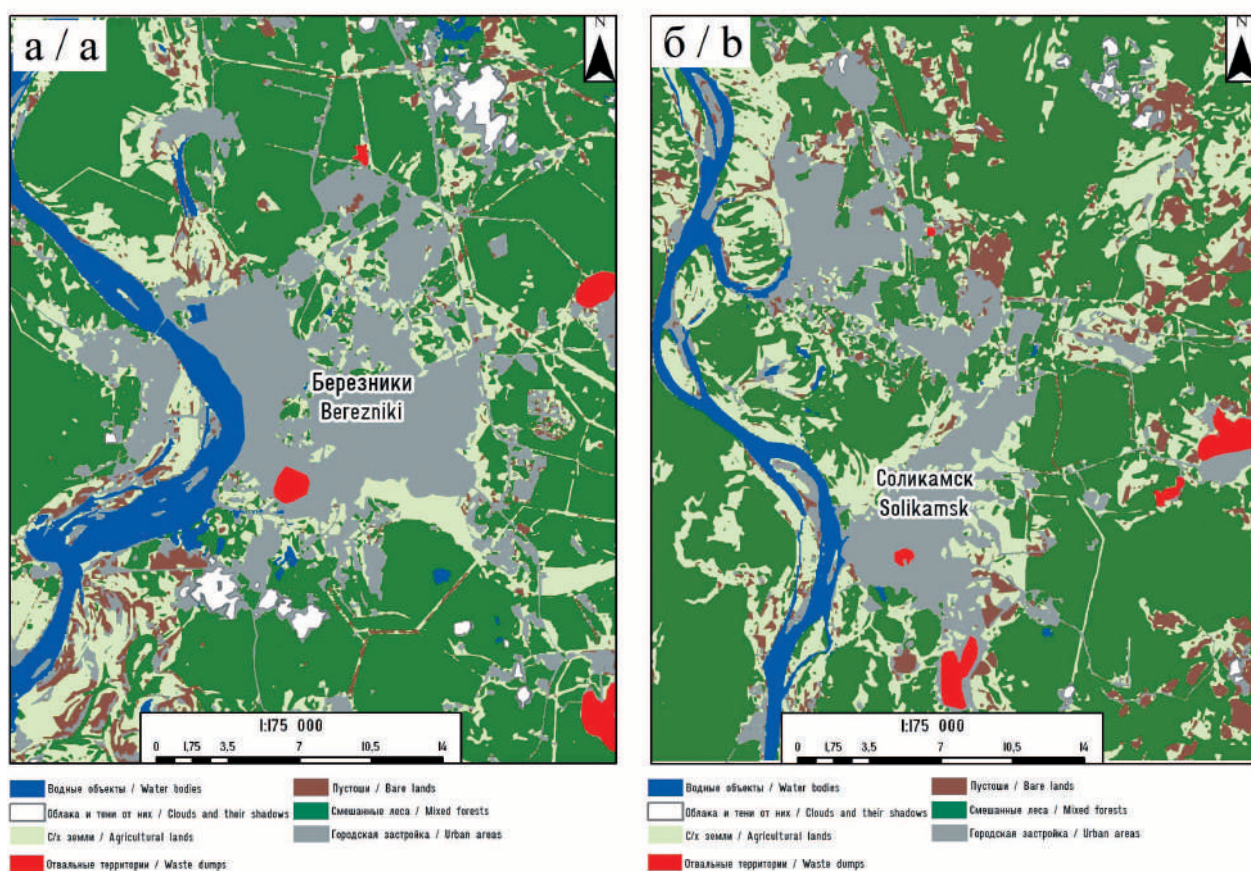


Рис. 3. Итоговая карта классификации землепользования для Верхнекамского месторождения солей в окрестностях г. Березники (а) и г. Соликамска (б)
Fig. 3. The final classification map of the land use for the Verkhnekamskoe Potash Deposit in the vicinity of Berezniki (a) and Solikamsk (b)

А. А. Перевощикова, Н. А. Кобелев, Т. С. Бачурин
«Использование данных Landsat-8 для классификации
и выделения отвалов вскрышных пород». С. 31.

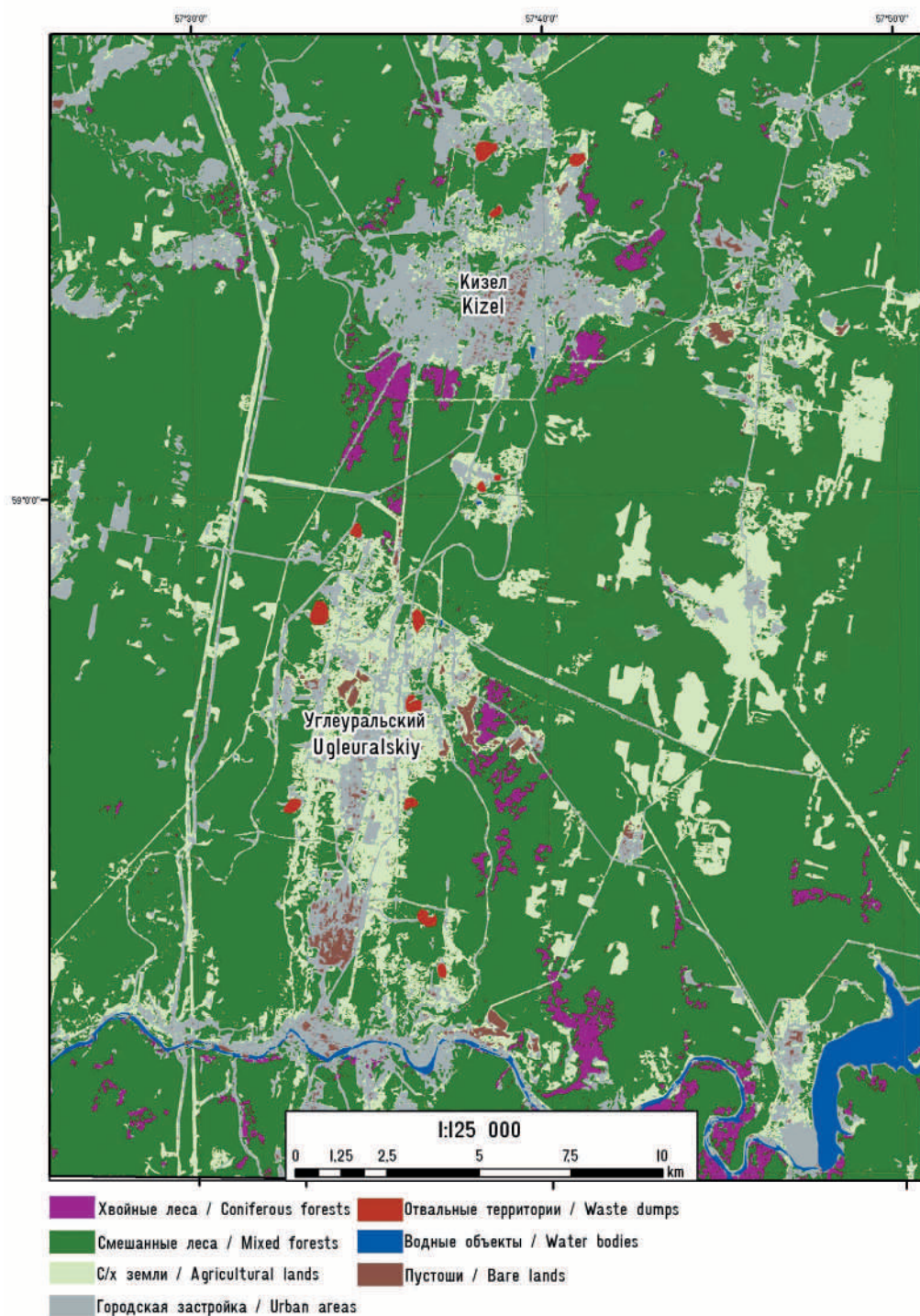


Рис. 4. Итоговая карта классификации землепользования Кизеловского угольного бассейна
Fig. 4. The final classification map of the land use for the Kizel coal basin

Результаты и обсуждение

В результате работы была проведена точная классификация землепользования на изучаемых территориях с выделением шахтных отвалов и солеотвалов как отдельных классов. Оценить её точность позволило выделение отвалов путём ручного дешифрирования и сверки с данными проведённых ранее полевых исследований. Набор данных, полученный в результате этого, принят за эталон отвалов на изучаемой территории. Таким образом, площадь шахтных отвалов, выделенных предложенным методом, составила 162,8 га, а площадь эталона – 153,3 га; площадь солеотвалов составила 927,9 га, а площадь эталона – 891,4 га.

В таблице 2 представлено сравнение статистических показателей двух наборов данных для шахтных отвалов.

Инструментом выделено 106,2 % от площади шахтных отвалов в валидном наборе данных. Это связано с тем, что интерактивной контролируемой классификацией был выделен объект, не являющийся шахтным отвалом.

В случае с солеотвалами было выделено 104,1 % от эталона. Выделение шахтных отвалов подобными инструментами является довольно сложной задачей ввиду малой площади отвалов относительно всей территории исследования. Кроме того, проведённая рекультивация может вызвать отнесение территории отвала к классу пустоши или урбанизированной территории.

Итоговая классификация для территории КУБа включает в себя 7 классов, среди них: 63,9% – смешанные леса; 11,7% – земли сельскохозяйственного использования; 9,5% – хвойные леса; 3,4% – водные объекты; 1,8% – пустоши; 8,8% – застройка; 0,9% – шахтные отвалы.

Итоговая классификация для территории ВКМС также включает в себя 7 классов: 57,1% – смешанные леса; 17,4% – луга и зем-

ли сельскохозяйственного использования; 15% – городская и дачная застройка вместе с иными антропогенными объектами; 4,7% – пустоши, 3,8% – водные объекты; 1,3% – облака и тени от них; 0,7% – солеотвалы.

Итоговым результатом применения инструмента являются карты землепользования с выделением солеотвалов (рис. 3, см. цв. вкладку I) и шахтных отвалов (рис. 4, цв. вкладку II). Для наглядности изображения территория исследования ВКМС разбита на две карты, отдельно для окрестностей г. Березники (рис. 3а) и г. Соликамск (рис. 3б).

Карты классификации землепользования ВКМС в окрестностях г. Березники и г. Соликамска, а также КУБа служат многоцелевой геоинформационной основой, интегрирующей данные ДЗЗ и почвенно-геохимических съёмок. Их целевыми потребителями могут выступать региональные органы исполнительной власти в сфере недропользования и экологического надзора, отраслевые научно-исследовательские институты, а также горнопромышленные компании, реализующие долгосрочные программы освоения и восстановления территорий. Для КУБа они важны для мониторинга и ликвидации экологических последствий (загрязнение вод и почв кислыми шахтными водами), рекультивации нарушенных земель и планирования безопасного хозяйственного использования территорий. Для ВКМС такие карты служат основой для рационального недропользования (планирование добычи калийно-магниевых солей) и оценки геодинамических рисков (проседания, карстообразование).

Заключение

В данном исследовании применялись методы анализа изображений ДЗЗ для клас-

Таблица 2 / Table 2
Сравнительная характеристика двух наборов данных для шахтных отвалов
Comparative characteristic of two datasets for mine dumps

Показатель Indicator	Эталонный набор данных Valid dataset	Тренировочный набор данных Training dataset
Количество / Count	13,00	13,00
Минимум / Minimum	2,99	2,69
Максимум / Maximum	46,75	29,32
Сумма / Sum	153,30	162,80
Среднее / Mean	11,79	12,52
Среднее квадратичное отклонение Standard deviation	11,59	6,56

сификации регионов горнодобывающей промышленности с выделением более семи классов землепользования, а именно: отвальные территории, водные объекты, земли сельскохозяйственного использования, пустоши, хвойные леса, смешанные леса, урбанизированные территории. Использование точной контролируемой классификации позволило выделить и зафиксировать нарушенные (отвальные) территории, что показало возможность использования данного подхода для составления карт землепользования в регионах, где ведётся добыча полезных ископаемых с учётом быстрых изменений в ОС. Результаты, полученные в ходе исследования, показали, что площадь шахтных отвалов, выделенных методом интерактивной контролируемой классификации, составила 162,8 га, а площадь эталона – 153,3 га. Площадь солеотвалов, выделенных предложенным нами методом, составила 927,9 га при площади эталона – 891,4 га. Итоговым результатом применения инструмента являются карты землепользования с выделением шахтных отвалов и солеотвалов для горнодобывающих районов Пермского края. Сравнение полученных карт с эталонными образцами позволило установить, что точность идентификации отвалов методом интерактивной контролируемой классификации отличается всего на 4–6 %, однако данный метод обладает рядом преимуществ перед ручной классификацией. Среди них можно выделить:

- интерактивная контролируемая классификация использует алгоритмы машинного обучения, что позволяет минимизировать субъективность, характерную для ручной классификации;
- данный метод позволяет обрабатывать большие объёмы данных гораздо быстрее и с меньшими трудозатратами по сравнению с ручной классификацией;
- присутствует возможность адаптивной настройки. Это позволяет контролировать процесс обучения алгоритма, что невозможно при полностью ручной классификации, где каждый процесс нужно начинать заново для внесения изменений.

Отмеченные преимущества показывают целесообразность применения метода интерактивной контролируемой классификации для прогнозных целей в условиях быстрых изменений при использовании земельных ресурсов на горнодобывающих территориях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00324).

Литература

1. Ашихмина Т.Я., Менялин С.А., Мамаева Ю.И., Новикова Е.А., Кантор Г.Я. Экологический контроль и мониторинг окружающей природной среды в районе объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 1. С. 57–64. doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-057-064
2. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // Int. J. Remote Sens. 2007. V. 28. No. 5. P. 823–870. doi: 10.1080/01431160600746456
3. Tilton III E.L. Marine resources // Third Earth Resources Technology Satellite symposium: proceedings. V. III. Greenbelt, Maryland: Goddard space flight centre, 1974. P. 83–104.
4. Parks N.F., Petersen G.W., Baumer G.M. High resolution remote sensing of spatially and spectrally complex coal surface mines of central Pennsylvania: a comparison between simulated SPOT MSS and Landsat-5 Thematic Mapper // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1987. V. 53. No. 4. P. 415–420.
5. Shafri H.Z.M., Ramle F.S.H. A comparison of support vector machine and decision tree classifications using satellite data of Langkawi Island // Information Technology Journal. 2009. V. 8. No. 1. P. 64–70. doi: 10.3923/itj.2009.64.70
6. Foody G.M., Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. V. 42. No. 6. P. 1335–1343. doi: 10.1109/TGRS.2004.827257
7. Zhang X., Wang Y., Zhang N., Xu D., Chen B. Research on scene classification method of high-resolution remote sensing images based on RFPNet // Appl. Sci. 2019. V. 9. No. 10. Article No. 2028. doi: 10.3390/app9102028
8. Demirel N., Emil M.K., Duzgun H.S. Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery // Int. J. Coal Geol. 2011. V. 86. No. 1. P. 3–11. doi: 10.1016/j.coal.2010.11.010
9. Usikov V.I., Lipina L.N. Geoecological assessment of the Malyi Khingan ridge area using land surface remote sensing data // Journal of Mining Science. 2018. V. 54. No. 2. P. 323–328. doi: 10.1134/S1062739118023690
10. Чащин А.Н., Кондратьева М.А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна // Географический вестник. 2019. № 2 (49). С. 135–147. doi: 10.17072/2079-7877-2019-2-135-147
11. Галченко Ю.П., Калабин Г.В., Озарян Ю.А. Методика геоинформационного мониторинга природно-технических систем на основе данных дистанционного

зондирования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 68–78. doi: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-68-78

12. Tang J., Liang J., Yang Y., Zhang S., Hou H., Zhu X. Revealing the structure and composition of the restored vegetation cover in semi-arid mine dumps based on LiDAR and hyperspectral images // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 4. Article No. 978. doi: 10.3390/rs14040978

13. Torres R.N., Fraternali P. Learning to identify illegal landfills through scene classification in aerial images // Remote Sens. 2021. V. 13. No. 22. Article No 4520. doi: 10.3390/rs13224520

14. Петкова Н.В., Корниенко Б.Я. Методы ГИС в мониторинге техногенной нарушенности земель Свердловского угольного района (Луганская область) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 43–49. doi: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-43-49

15. Зеньков И.В., Нефедов Н.Б., Морин А.С., Кирюшина Е.В., Вокин В.Н., Веретенова Т.А., Кондрашов П.М., Павлова П.Л., Брежнев Р.В. Технология рекультивации земель при разработке угольных месторождений в северных регионах России // Уголь. 2020. № 4. С. 62–67. doi: 10.18796/0041-5790-2020-4-62-67

16. Kumar A. A Promising automatic system for studying of coal mine surfaces using Sentinel-2 data to assess a classification on a pixel-based pattern // J. Min. Environ. 2024. V. 15. No. 1. P. 41–54. doi: 10.22044/jme.2023.13064.2380

17. Литвинцев В.С., Усиков В.И., Озарян Ю.А., Алексеев В.С. Метод дистанционного зондирования Земли в составе работ по оценке объемов техногенного сырья и экологической обстановки при эксплуатации россыпей // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 4. С. 116–123. doi: 10.18599/grs.2021.4.13

18. Сайб Е.А., Безбородова А.Н., Соловьёв С.В., Миллер Г.Ф., Филимонова Д.А. Выявление разновозрастных залежей на эрозионно-опасных территориях юга Западной Сибири с применением геоинформационных технологий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 129–136. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-129-136

19. Aslam B., Maqsoom A., Tahir M.D., Ullah F., Rehman M.S.U., Albattah M. Identifying and ranking landfill sites for municipal solid waste management: An integrated remote sensing and GIS approach // Buildings. 2022. V. 12. No. 5. Article No. 605. doi: 10.3390/buildings12050605

20. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Раритет-Пермь, 2018. 288 с.

21. Перевощикова А.А., Перевощиков Р.Д., Малышкина Е.Е., Митракова Н.В. Управление отходами калийных горнодобывающих предприятий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 19–35. doi: 10.18799/24131830/2024/1/4387

22. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Перевощикова А.А. Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266–278. doi: 10.31897/PMI.2023.31

23. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit // Mining. 2023. V. 3. No. 2. P. 176–204. doi: 10.3390/mining3020011

24. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс] <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnietposobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminovatematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (Дата обращения: 15.05.2024).

25. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Порошина Н.В., Перминова А.А., Малышкина Е.Е. Классификация и свойства почв, образовавшихся на рекультивированных угольных отвалах Кизеловского угольного бассейна // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 180–187. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-180-187

26. U.S. Geological Survey [Электронный ресурс] <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Дата обращения: 15.05.2024).

References

1. Ashikhmina T.Ya., Menyalin S.A., Mamaeva Yu.I., Novikova E.A., Kantor G.Ya. Environmental ecological control and monitoring in the vicinity of the chemical weapons decommission plant “Maradikovsky” in Kirov Region // Theoretical and Applied Ecology. 2010. No. 1. P. 57–64 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-057-064
2. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // Int. J. Remote Sens. 2007. V. 28. No. 5. P. 823–870. doi: 10.1080/01431160600746456
3. Tilton III E.L. Marine resources // Third Earth Resources Technology Satellite symposium: proceedings. V. III. Greenbelt, Maryland: Goddard space flight centre, 1974. P. 83–104.
4. Parks N.F., Petersen G.W., Baumer G.M. High resolution remote sensing of spatially and spectrally complex coal surface mines of central Pennsylvania: a comparison between simulated SPOT MSS and Landsat-5 Thematic Mapper // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1987. V. 53. No. 4. P. 415–420.
5. Shafri H.Z.M., Ramle F.S.H. A comparison of support vector machine and decision tree classifications using satellite data of Langkawi Island // Information Technology Journal. 2009. V. 8. No. 1. P. 64–70. doi: 10.3923/itj.2009.64.70
6. Foody G.M., Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines //

IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. V. 42. No. 6. P. 1335–1343. doi: 10.1109/TGRS.2004.827257

7. Zhang X., Wang Y., Zhang N., Xu D., Chen B. Research on scene classification method of high-resolution remote sensing images based on RFPNet // Appl. Sci. 2019. V. 9. No. 10. Article No. 2028. doi: 10.3390/app9102028.

8. Demirel N., Emil M.K., Duzgun H.S. Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery // Int. J. Coal Geol. 2011. V. 86. No. 1. P. 3–11. doi: 10.1016/j.coal.2010.11.010

9. Usikov V.I., Lipina L.N. Geoecological assessment of the Mal'yi Khingan ridge area using land surface remote sensing data // Journal of Mining Science. 2018. V. 54. No. 2. P. 323–328. doi: 10.1134/S1062739118023690

10. Chashchin A.N., Kondratyeva M.A. Using remote sensing data to assess the self-overgrowth rates of coal dumps in the Kizel Basin // Geographical Bulletin. 2019. No. 2. P. 135–147 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2019-2-135-147

11. Galchenko Yu.P., Kalabin G.V., Ozaryan Ju.A. Use of remote sensing data in geoinformation monitoring of natural-technical systems // News of the Tula state university. Sciences of Earth. 2020. No. 1. P. 68–78 (in Russian). doi: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-68-79

12. Tang J., Liang J., Yang Y., Zhang S., Hou H., Zhu X. Revealing the structure and composition of the restored vegetation cover in semi-arid mine dumps based on LiDAR and hyperspectral images // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 4. Article No. 978. doi: 10.3390/rs14040978

13. Torres R.N., Fraternali P. Learning to identify illegal landfills through scene classification in aerial images // Remote Sens. 2021. V. 13. No. 22. Article No 4520. doi: 10.3390/rs13224520

14. Petkova N.V., Kornienko B.Ya. GIS methods in monitoring technogenic disturbance of land in the Sverdlovsk coal district (Lugansk region) // Ecology. Economy. Informatics. Series: Geoinformation technologies and space monitoring. 2020. V. 2. No. 5. P. 43–49 (in Russian). doi: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-43-49

15. Zenkov I.V., Nefedov N.B., Morin A.S., Kiryushina E.V., Vokin V.N., Veretenova T.A., Kondrashov P.M., Pavlova P.L., Brezhnev R.V. Land remediation technology in the development of coal deposits in the northern regions of Russia // Russian Coal Journal. 2020. No. 4. P. 62–67 (in Russian). doi: 10.18796/0041-5790-2020-4-62-67

16. Kumar A.A. Promising automatic system for studying of coal mine surfaces using Sentinel-2 data to assess a classification on a pixel-based pattern // J. Min. Environ. 2024. V. 15. No. 1. P. 41–54. doi: 10.22044/jme.2023.13064.2380

17. Litvintsev V.S., Usikov V.I., Ozaryan Yu.A., Alekseev V.S. Remote sensing of the Earth as a part of research

of assessing the volume of technogenic raw and the environmental situation during the exploitation of placers // Georesursy. 2021. V. 23. No. 4. P. 116–123 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2021.4.13

18. Sajb E.A., Bezborodova A.N., Solov'ev S.V., Miller G.F., Filimonova D.A. Identification of different age fallows on erosion-hazardous territories of the south of Western Siberia using geo-information technologies // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. No. 4. P. 129–136. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-129-136

19. Aslam B., Maqsoom A., Tahir M.D., Ullah F., Rehman M.S.U., Albattah M. Identifying and ranking landfill sites for municipal solid waste management: An integrated remote sensing and GIS approach // Buildings. 2022. V. 12. No. 5. Article No. 605. doi: 10.3390/buildings12050605

20. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. Kizelovsky coal basin: environmental problems and solutions. Perm: Raritet-Perm, 2018. 288 p. (in Russian).

21. Perevoshchikova A.A., Perevoshchikov R.D., Malysheva E.E., Mitrakova N.V. Waste management in potash mining companies // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asses Engineering. 2024. V. 335. No. 1. P. 19–35 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2024/1/4387

22. Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Blinov S.M., Perevoshchikova A.A. Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas // Journal of Mining Institute. 2023. V. 260. P. 266–278 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2023.31

23. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit // Mining. 2023. V. 3. No. 2. P. 176–204. doi: 10.3390/mining3020011

24. Thematic deciphering and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution [Internet resource] <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (Accessed: 15.05.2024) (in Russian).

25. Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Poroshina N.V., Perminova A.A., Malysheva E.E. Classification and properties of soils formed on reclaimed coal dumps of the Kizel coal basin // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 180–187 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-180-187

26. U.S. Geological Survey [Internet resource] <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed: 15.05.2024).