

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ АВИАЦИОННЫХ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

П. А. Рыбников^{1,2}, Д. А. Бузина¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия;

² Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассмотрены и проанализированы научные труды различных авторов, связанные с мультиспектральной и гиперспектральной съемкой. Приведены основные характеристики мультиспектральных и гиперспектральных изображений. Изложены параметры авиационного спектрометра Hyperion и спутникового спектрометра Нумар, выделены преимущества и недостатки таких датчиков. Описан алгоритм обработки гиперспектральных изображений. Подробно рассмотрено исследование, связанное с использованием датчиков Hyperion и Нумар в сфере экологического мониторинга горнопромышленных территорий. Установлено, что снимки Нумар и Hyperion отображают минералогический состав отвалов и водоемов в зависимости от их химического состава. Приведены карты различных минералов на отвалах, составленные по данным Нумар и Hyperion, вместе с графиками спектральной отражательной способности. Сформулированы результаты работы, связанной с определением вегетационного индекса NDVI и индекса AMWI по снимкам со спутника Landsat. NDVI вычислялся для Баженовского месторождения хризотил-асбеста, а AMWI рассчитывался для водных объектов в районе отработанного Левихинского рудника. По значениям NDVI был сделан вывод о том, что на Восточном отвале Баженовского месторождения на некоторых участках до сих пор не начался процесс самозарастания. Установлено отсутствие связи индекса AMWI с концентрацией Fe в кислых шахтных водах для малых водотоков. Было доказано, что изучение спектральных свойств объектов является актуальной задачей на данный момент.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, гиперспектральные данные, мультиспектральные данные, гиперспектральная съемка, гиперспектральный куб данных, спектрометр Hyperion и Нумар, обработка гиперспектральных изображений, индекс NDVI, AMWI, Landsat, QGIS, ENVI.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме № 0328-2019-0005.

Для цитирования: Рыбников П. А., Бузина Д. А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 55–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_55.

Aerospace multispectral and hyperspectral imagery in mining area studies

P. A. Rybnikov^{1,2}, D. A. Buzina¹

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

² Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: This paper reviews and discusses studies on multispectral and hyperspectral imagery. The multispectral and hyperspectral images are characterized. Parameters, advantages of space- and air-born spectrometers Hyperion and Hymap are described. The case-study of ecological monitoring of mining areas using spectrometers Hyperion and Hymap is discussed in detail. The Hyperion and Hymap spectrometers image mineralogical composition of waste dumps and water bodies as function of their chemical composition. The dump mineralogy maps plotted using Hyperion and Hymap images are presented with their spectral reflectance graphs. The NDVI and AMWI estimates obtained using Landsat images are given. NDVI was calculated for Bazhenov chrysotile asbestos field, and AMWI was found for water bodies in the closed Levikha mine area. From the NDVI evidence, natural healing has not yet started on Vostochny dump in Bazhenov field. The AMWI index is unrelated with Fe concentration in acid mine water in case of small water channels. It is topical to study spectral properties of objects.

Key words: remote sensing, hyperspectral imagery, multispectral imagery, hyperspectral data cube, spectrometers Hyperion and Hymap, hyperspectral imagery processing, NDVI, AMWI, Landsat, QGIS, ENVI.

Acknowledgements: The article was prepared as part of the implementation of the state task of the IGD of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the topic No. 0328-2019-0005.

For citation: Rybnikov P. A., Buzina D. A. Aerospace multispectral and hyperspectral imagery in mining area studies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):55–70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_55.

Введение

Революционное развитие компьютерных, космических, информационных технологий в конце XX — начале XXI вв. привело к существенным изменениям в отрасли дистанционного зондирования Земли. **В настоящее время** достаточно часто стала выполняться гиперспектральная съемка в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Она позволяет получать обширную информацию об объектах, которая недоступна при использовании традиционных камер и невидима для человеческого глаза. При проведении такой съемки выполняется определение спектральных характеристик объекта за счет его отражающей способности. Это дает возможность создать детализированную карту поверхности для дальнейшего исследования географического пространства.

Результатом гиперспектральной съемки является несколько десятков или даже сотен гиперспектральных изображений, полученных специальными сенсорами [1]. Каждый снимок представляет собой узкополосный диапазон длин волн электромагнитного спектра (спектральный диапазон). Изображения объединяются для формирования трехмерного гиперспектрального куба данных для последующей обработки и анализа [2]. Он содержит спектральные данные по одному измерению и пространственные данные по двум другим. Каждый пиксель изображения характеризуется собственным спектром [1].

Гиперспектральные снимки обычно включают сотни спектральных полос относительно узкой полосы пропускания (5–10 нм). Узкие спектральные каналы способны обнаруживать незначительные спектральные особенно-

сти, которые остаются незамеченными в более широких диапазонах. Гиперспектральные снимки обладают высоким спектральным, но низким пространственным разрешением [3].

Спектрометры Нумар и Hyperion. Обработка гиперспектральных данных

На сегодняшний день гиперспектральная съемка осуществляется с помощью спектрометров, размещенных на авиационных и космических платформах. Спектрометр Нумар представляет собой бортовой авиационный гиперспектральный датчик, который устанавливается на воздушных летательных аппаратах для съемки в спектральных каналах шириной около 10 нм. Приведенная табл. 1 иллюстрирует некоторые основные эксплуатационные характеристики современных датчиков Нумар [4].

Еще одной гиперспектральной системой является аппаратура Hyperion, которая была установлена на спутнике NASA Earth-Observing-1 (EO-1). Сенсор Hyperion является спутниковым гиперспектральным спектрометром, который был запущен в 2001 году, но сейчас уже выведен из эксплуатации. Гиперспектрометр Hyperion позволял получать информацию с 220 спектральных каналов в спектральном диапазоне 400–2500 нм (видимый и ближний ИК-диапазоны) со спектральным разрешением 10 нм и разрешением

на местности 30 м при размерах сцены 7,5×100 км [5].

Использование авиационных спектрометров в отличие от спутниковых позволяет осуществлять гиперспектральную съемку с небольшой высоты, что уменьшает влияние воздушного слоя на получаемую информацию и исключает влияние облаков на возможность проведения съемки. На данный момент недостаточно количество спутников, оборудованных гиперспектрометрами. В отличие от систем космического базирования, стоимость систем дистанционного зондирования на беспилотных платформах относительно невысока. Кроме того, возможно самостоятельно выбирать траекторию перемещения авиационного комплекса и место запуска [6].

Обработка гиперспектральных данных, получаемых как с авиационных, так и со спутниковых спектрометров выполняется в соответствии со специальным алгоритмом, который состоит из следующих действий [7]:

1) предварительная обработка, включающая радиометрическую коррекцию (устранение искажений за счет неравномерности чувствительности элементов детекторов, учет влияния атмосферы), геометрическую коррекцию (устранение сдвига, учет кривизны земли, особенностей ландшафта), географическую привязку, синтез цветных и псевдоцветных изображений из канальных изображений;

Таблица 1

Типовой пакет эксплуатационных параметров для датчика Нумар
Typical Numar sensor performance parameters

Число каналов	100–200
Спектральный диапазон	10–20 нм
Пространственное разрешение	2–10 м
Ширина обзора	60–70 градусов
Отношение сигнал/помех	>500:1
Рабочая высота	2000–5000 м

2) повышение качества изображений, включая: контрастирование, фильтрацию с использованием различных фильтров, подчеркивание границ, совмещение изображений, полученных в разных спектральных каналах, и т.п.;

3) формирование спектров для всех пикселей гиперспектральных изображений, их отдельных фрагментов или в пределах выделенных контуров;

4) тематическая обработка, включающая классификацию объектов подстилающей поверхности путем сравнения спектров на гиперспектральных изображениях с эталонными спектрами из библиотеки спектральных образов объектов. Результатом сравнения являются данные о процентном вкладе библиотечных спектров в анализируемый [8, 9];

5) интерпретация гиперспектральных изображений, заключающаяся в выявлении признаков, восстановлении параметров исследуемых элементов изображений, символическом представлении результатов, семантической интерпретации и др.;

6) формирование временных рядов тематически сегментированных гиперспектральных изображений;

7) сопоставление результатов обработки гиперспектральных изображений и экспорт их в ГИС;

8) анализ результатов обработки [7].

Гиперспектральное дистанционное зондирование с помощью бортовых и спутниковых систем используется в горнодобывающей промышленности, геологии, сельском и лесном хозяйстве, экологии и др. Некоторые сферы применения гиперспектральных данных и задачи, решаемые с их помощью, приведены в табл. 2 [10].

Применение гиперспектральных данных для изучения затопленных карьеров месторождения Лас-Эррериас (Иберийский пиритовый пояс, юго-запад Испании)

Во многих исследованиях применение именно гиперспектральных данных позволило достичь необходимых результатов. В работе [11] использовались гиперспектральные данные Hyperion и Нумар для изучения загрязнения, связанного с затопленными карьерами месторождения Лас-Эррериас (Иберийский пиритовый пояс, юго-запад Испании). Требовалось разработать алгоритм для осуществления регулярного мониторинга загрязняющих веществ с помощью гиперспектральных данных [11].

Карьеры месторождения Лас-Эррериас прекратили свою работу в 1980-х годах. Для добычи полезных ископаемых использовались

Таблица 2

Области и задачи отраслевого применения данных гиперспектральной съемки [10]
Areas and tasks of industrial application of hyperspectral imagery data [10]

Отрасли	Задачи, решаемые по гиперспектральным данным
Топография	Температурное картирование
Геология	Обнаружение некоторых видов полезных ископаемых
Сельское хозяйство	Измерение увлажнения растительности
Лесное хозяйство	Выявление пожаров, классификация лесов по породам, состоянию здоровья леса и степени зрелости крон
Нефтегазовая промышленность	Контроль деформаций трубопроводов, обнаружение мест утечек газа из газопроводов
Экология и охрана окружающей среды	Диагностика загрязнения почв, выявление факторов сброса отходов и сточных вод и др.

два карьера: в «пиритовом» карьере добывали сульфид железа, а в «медном» – сульфид с большим содержанием меди (медноколчеданные руды). На сегодняшний день эти карьеры затоплены. Вода из «медного» затопленного карьера стекает в каскад из трех прудов-отстойников, используемых для нейтрализации кислых вод. К востоку от участка добычи располагаются три водоема, на данный момент два из них снабжают водой близлежащие города, а третий используется в системе очистки сточных вод (рис. 1) [11].

Для исследований использовались данные Nuregion, полученные 10 сентября 2006 года и 24 августа 2007 года, и данные Nумар 13 августа 2009 г. Для гиперспектральных снимков, полученных с авиационного спектрометра Нумар, был применен вышеописанный алгоритм обработки. Результатом является карта, отображающая преобладающие типы минералов в породах отвалов (рис. 2, а). График спектральной

отражательной способности некоторых минералов приведен на рис. 2, б [11].

На рис. 2, а видно, что гематит покрывает ограниченные плоские поверхности отвалов, а покрытия из ярозита расположены на менее крутых поверхностях. На склонах наблюдается рост швертманнита, алунит и фиброферрит встречаются по дну ручьев, стекающих с отвалов. Гидратированные сульфаты, такие как копиапит, окружают небольшие пруды-отстойники для нейтрализации кислых вод. Области вокруг прудов-отстойников для нейтрализации кислых вод представлены в основном гетитом с небольшими покровами гематита. На плоских поверхностях уступов присутствуют камни и галька [11].

В процессе предварительной обработки данных Nuregion за сентябрь 2006 года были обнаружены и удалены каналы с помехами. В результате использовалось только 144 канала, которые были скорректированы с помощью атмосферных поправок. Такие



Рис. 1. Местоположение водных объектов, связанных с функционированием карьеров месторождения Лас-Эррериас [11]

Fig. 1. Location of water bodies related with operation of Las Herrerías mines [11]

же каналы были выбраны и для данных, полученных в августе 2007 года. При тематической обработке данных Нурегіон использовалась карта, созданная по данным Нумар, в качестве справочной информации для геологической оценки, так как данные Нурегіон содержали помехи и имели более низкое разрешение. Аналогичная процедура обработки изображений применялась и к данным Нурегіон, которые были получены в 2007 году. В результате были созданы две карты преобладающих типов минералов в породах отвалов (рис. 3, а, с) [11].

Карты, созданные по данным Нурегіон (рис. 3, а, с) и по данным Нумар (рис. 2, а), демонстрируют сходство при определении преобладающих типов минералов в породах отвалов. На них четко выделены плоские участки с гематит-гетитом, плавные склоны с ярозитом и крутые склоны, покрытые швертманнитом. Гидратированный сульфат железа вокруг водоемов, вероятно, копиапит, также обнару-

жен по данным Нурегіон [11]. За 2006 и 2007 года по данным Нурегіон был составлен график спектральной отражательной способности минералов (рис. 3, b, d).

Гиперспектральные данные Нумар и Нурегіон также использовались для анализа затопленного «медного» карьера и «пиритового» карьера. По изображениям с датчика Нумар была составлена карта водных объектов, представленная на рис. 4, а.

На графике спектральной отражательной способности для «пиритового» затопленного карьера присутствует узкий пик с максимумом в точке 0,558 мкм, нисходящий к 0,660 мкм (рис. 4, b). Это значительно ниже «медного» затопленного карьера с нейтральным рН. Картина отражательной способности «пиритового» затопленного карьера достаточно неоднородна, так как ветер, образующий волнистую поверхность, влиял на реакцию отражения. Пик отражения воды в водоемах с пресной водой шире, а спуск

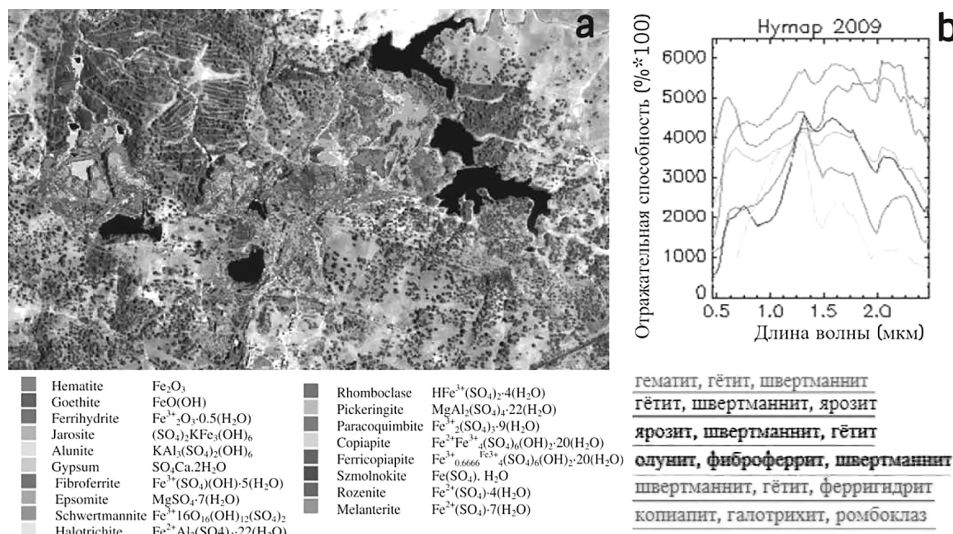


Рис. 2. а) карта различных минералов на отвалах, составленная по данным Нумар; б) график спектральной отражательной способности некоторых минералов [11]

Fig. 2. Map compiled from Numar data for different minerals in dumps (a); spectral reflectance curve of some minerals (b) [11]

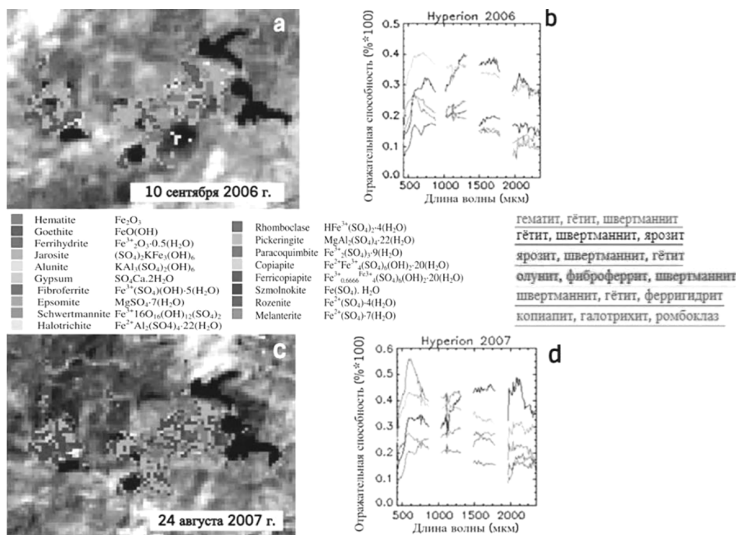


Рис. 3. а) карта минералов на отвалах, составленная по данным Hyperion, за сентябрь 2006 года; б) график спектральной отражательной способности минералов, составленный по данным Hyperion за 2006 год; в) карта минералов на отвалах, составленная по данным Hyperion, за август 2007 года; д) график спектральной отражательной способности минералов, составленный по данным Hyperion за 2007 год [11]

Fig. 3. Map compiled from Hyperion data for minerals in dumps in September 2006 (a); mineral spectral reflectance curve based on Hyperion data obtained in 2006 (b); map compiled from Hyperion data obtained for minerals in dumps in August 2007 (c); mineral spectral reflectance curve based on Hyperion data obtained in 2007 (d) [11]

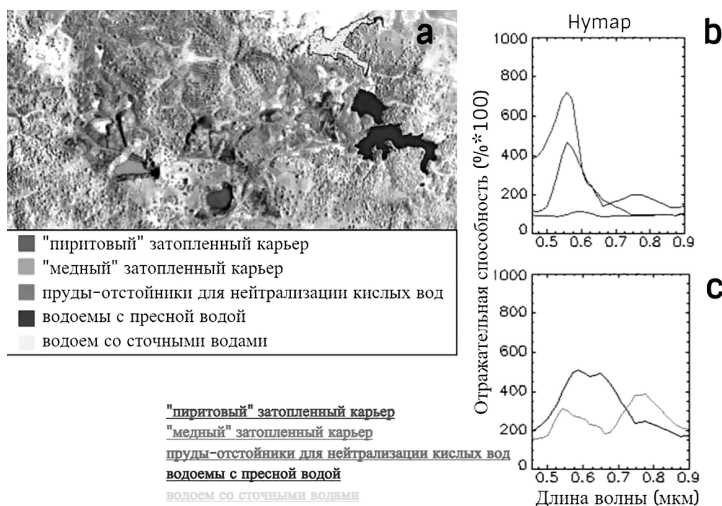


Рис. 4. а) карта водных объектов, составленная по данным Нумар; б) график спектральной отражательной способности для «пиритового», «медного» затопленного карьера и прудов-отстойников для нейтрализации кислых вод, составленный по данным Нумар; в) график спектральной отражательной способности для водоема с пресной и сточной водой, составленный по данным Нумар [11]

Fig. 4. Map compiled from Nymap data on water bodies (a); spectral reflectance curve made from Nymap data for flooded pyrite, copper quarry and sour water neutralization ponds (b); spectral reflectance curve made from Nymap data for freshwater and wastewater ponds (c) [11]

в более длинные диапазоны длин волн меняется (рис. 4, с) [11].

Карта водных объектов, составленная по гиперспектральным снимкам Hyperion, представлена на рис. 5, а, б. «Медный» затопленный карьер с нейтральным рН (равный 6) по сравнению с «пиритовым» имеет такие же спектральные характеристики, но более сглаженные (рис. 5, с, d). Подъем к 580 нм является непрерывным и гораздо менее крутым, с мягким изгибом в точке 494 нм и спуском с небольшим наклоном к 737 нм, с гладкими изгибами в точках 612 и 681 нм [11].

Для водоемов с пресной водой на графике наблюдается непрерывный подъем в сторону в точке 580 нм, а при спуске в сторону более длинных длин волн появляются волны с минимумами, совпадающими с изгибами отражательной способности воды на карьерах. Спектры чистой пресной воды демонстрируют волнообразный спек-

тральный отклик из-за высоких концентраций взвешенных отложений [11].

Гиперспектральные данные, полученные с помощью бортового датчика Нутар и космического аппарата Hyperion, также использовались в ряде других научных работ, выполняемых с 2013 по 2020 гг. В исследовании [12] данные со спектрометра Нутар применялись для изучения характеристик почвы и полезных ископаемых в горнорудном районе Сарчешмех (вулканоплутонический пояс Уромие-Доhtar, Центральный Иран). По гиперспектральным изображениям Нутар была создана карта распределения минералов белой слюды кратона Пилбара в Западной Австралии [13]. В работах [14–15] данные Hyperion использовались для определения минерального состава гористой местности в городах Раджсаманд и Бансвара (северо-западная часть Индии). На сегодняшний день гиперспектральные данные применя-

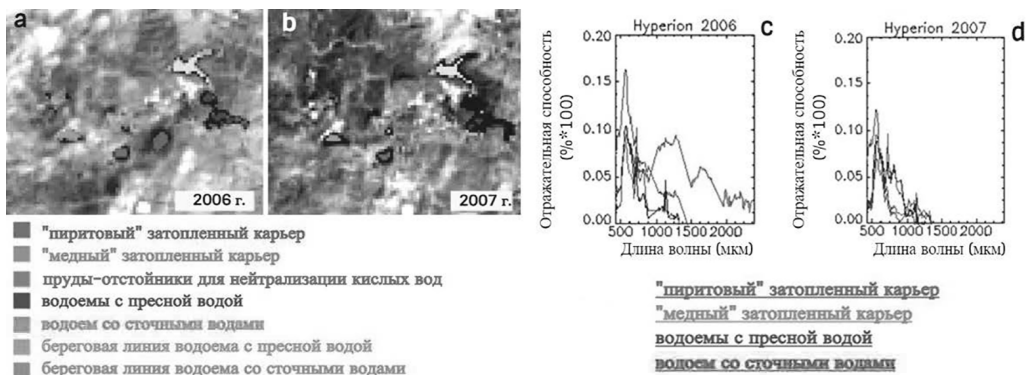


Рис. 5. а) карта водных объектов, составленная по данным Hyperion за 2006 год; б) карта водных объектов, составленная по данным Hyperion за 2007 год; в) график спектральной отражательной способности для «пиритового», «медного» затопленного карьера, водоема с пресной и сточной водой, составленный по данным Hyperion за 2006 год; д) график спектральной отражательной способности для «пиритового», «медного» затопленного карьера, водоема с пресной и сточной водой, составленный по данным Hyperion за 2007 год [11]

Fig. 5. Map of water bodies based on Hyperion data obtained in 2006 (a); map of water bodies based on Hyperion data obtained in 2007 (b); spectral reflectance curve based on Hyperion data obtained in 2006 for flooded pyrite, copper quarry, freshwater and wastewater ponds (c); spectral reflectance curve based on Hyperion data obtained in 2007 for flooded pyrite, copper quarry, freshwater and waste water ponds (d) [11]

ются все чаще и позволяют изучать территории с различными физико-географическим и природно-климатическими условиями.

Мультиспектральные данные. Вычисление индекса NDVI и AMWI по спутниковым снямкам Landsat

Наряду с гиперспектральными изображениями для изучения горнопромышленных территорий могут быть использованы мультиспектральные снимки. Мультиспектральная сканирующая аппаратура представляет собой радиометрически откалиброванные многоканальные видеоспектрометры. Мультиспектральные съемочные системы формируют несколько отдельных изображений для широких спектральных зон в диапазоне электромагнитных излучений от видимого до инфракрасного. Необходимо отметить, что съемочная система с 20 каналами будет гиперспектральной, если она покрывает диапазон 500–700 нм, при этом ширина каждой спектральной зоны не более 10 нм, а съемочная система с 20 отдельными каналами, покрывающими видимую область спектра, ближнюю, коротковолновую, среднюю и длинноволновую ИК-области, будет считаться мультиспектральной [1].

Наибольший практический интерес в настоящий момент представляют мультиспектральные данные с космических аппаратов нового поколения, среди которых Landsat, Sentinel и др. Мультиспектральные снимки состоят примерно из 5–10 полос относительно большой полосы пропускания (70–400 нм) и характеризуются высоким пространственным, но низким спектральным разрешением [1]. В настоящее время на орбите находится более ста космических аппаратов дистанцион-

ного зондирования Земли, которые выполняют съемку в различных спектральных каналах и с разным разрешением.

Программа Landsat — наиболее продолжительный проект по получению спутниковых снимков [16]. Данные, получаемые при помощи спутников Landsat, часто применяются для расчета вегетационных индексов. В настоящее время известно достаточно большое количество вегетационных индексов, но наиболее распространенным из них является индекс NDVI.

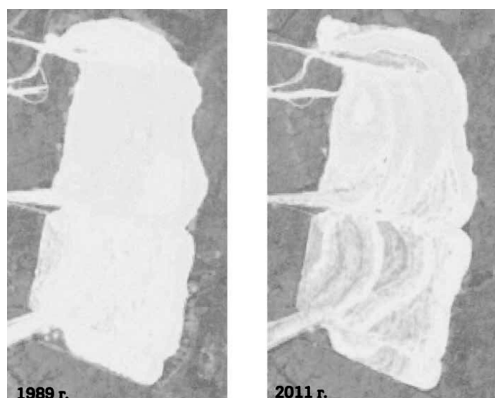
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный относительный индекс растительности (количественный показатель фотосинтетически активной биомассы), который вычисляется по следующей формуле [17]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где *NIR* — отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* — отражение в красной области спектра.

Нами выполнена оценка степени восстановления растительного покрова на Восточном отвале вмещающих пород и отходов обогащения асбестовой руды Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Указанный отвал расположен на территории Асбестовского городского округа в 8 км восточнее г. Асбеста. Индекс *NDVI* вычислялся в программном продукте QGIS за 1989 и 2011 годы по снимкам со спутника геологической службы США Landsat-5. Все спутниковые данные были взяты с сайта геологической службы США. Полученный результат представлен на рис. 6.

В программе QGIS определение индекса *NDVI* выполнялось через «Калькулятор растров» по вышеприведенной формуле (1). Для вычислений



- горные породы
- кустарники
- скудная, разреженная древесная растительность
- мощная, густая растительность (лес)

Рис. 6. Слой NDVI, построенный по снимкам за 1989 и 2011 годы через «Калькулятор растров»

Fig. 6. NDVI layer plotted from 1989–2011 images by means of Raster Calculator

использовались снимки только в красной и инфракрасной области спектра. Каждому значению индекса NDVI соответствует определенный тип покрытия.

Landsat-5 был выведен на орбиту 1 марта 1984 года, а перестал использоваться 21 декабря 2012 года [16]. На сегодняшний день на орбите находятся более новые и современные спутники: Landsat-7 и Landsat-8, которые были запущены в 1999 и 2013 годах соответственно. По снимкам со спутника Landsat-8 для оценки степени загрязнения поверхностных вод нами был рассчитан индекс AMWI (Acid Mine Waster Index), характеризующий спектральные свойства кислых шахтных вод [18, 19].

Основная особенность воды, загрязненной кислыми шахтными водами, заключается в резком росте коэффициента спектральной яркости от синего диапазона к красному. Это является маркером повышенной концентрации Fe в воде. Таким образом, индекс AMWI

может применяться для оценки степени загрязнения воды железом [18, 19].

Для определения индекса AMWI использовались снимки, прошедшие предварительную обработку в программном продукте ENVI 5.2. Она включала в себя атмосферную коррекцию с применением функции Radiometric Calibration и Dark Subtraction. Индекс AMWI вычислялся также в ENVI 5.2 по следующей формуле [18, 19]:

$$AMWI = \frac{RED - BLUE}{RED + BLUE}, \quad (2)$$

где *RED* — коэффициент спектральной яркости в красном канале (длина волны для данных Landsat-8 — от 0,63 до 0,69 мкм); *BLUE* — коэффициент спектральной яркости в синем канале (для данных Landsat-8 — от 0,45 от 0,52 мкм).

AMWI определялся для водных объектов в районе отработанного Левихинского рудника, расположенного в Кировградском районе Свердловской области. Ликвидация рудника началась еще в 2003 году посредством затопления горных выработок. К 2007 году подземные выработки были затоплены, оборудование шахтных стволов полностью демонтировано, был сформирован техногенный водоем, в который разгру-

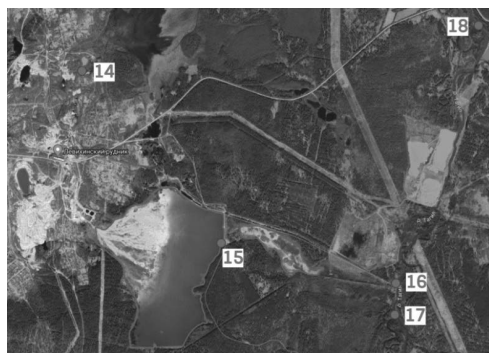


Рис. 7. Изображение Левихинского рудника с точками отбора кислых шахтных вод

Fig. 7. Image of Levikha mine with acidic mine water sampling points

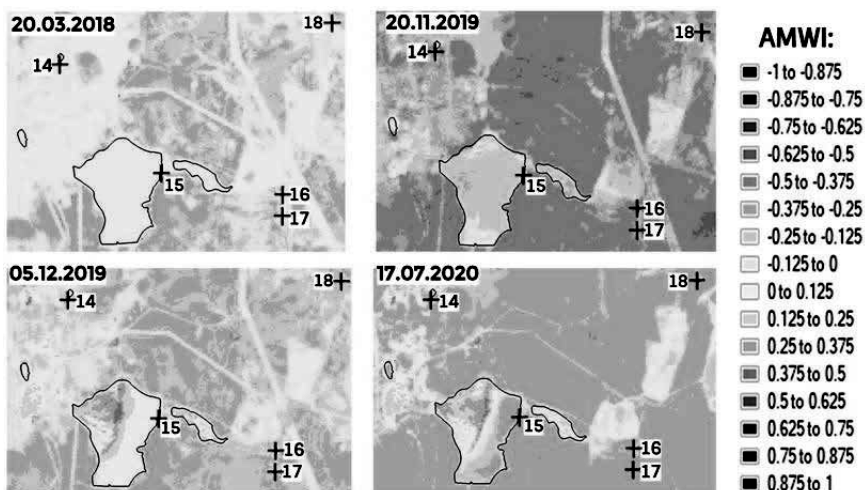


Рис. 8. Отображение индекса AMWI для водных объектов, загрязненных кислыми шахтными водами, в районе Левихинского рудника
 Fig. 8. AMWI image for water bodies polluted with acidic mine water in Levikha mine area

жаются шахтные воды. Схема Левихинского рудника с точками отбора кислых шахтных вод представлена на рис. 7.

На рис. 8 приведен индекс AMWI, отображенный с использованием градиентной шкалы, для водных объектов, загрязненных кислыми шахтными водами, в районе Левихинского рудника.

В настоящее время на затопленном Левихинском медноколчеданном руднике концентрации практически всех компонентов (цинка, алюминия, железа, меди и др.) на несколько порядков выше предельно допустимых значений. В табл. 3 приведена концентрация Fe в соответствии с результатами гидрохимических анализов проб воды в точках отбора в районе Левихинского рудника вместе со значениями индекса AMWI.

По результатам, представленным в табл. 3, были построены графики (рис. 9). Во всех пяти случаях динамика концентрации Fe и индекса AMWI в целом не совпадает. В то же время корреляция между концентрацией Fe и значениями индекса

AMWI равна 0,1445, что показывает слабую связь между значениями.

Закключение

Мультиспектральные и гиперспектральные снимки позволяют исследовать многие качественные характеристики объектов на земной поверхности. Гиперспектральное дистанционное зондирование с помощью бортовых и спутниковых систем используется в качестве источника данных для решения различных задач. По результатам вышеописанных исследований был сделан вывод о том, что гиперспектральные данные, полученные с использованием спектрометров Нумар, Hyperion, позволяют отобразить минералогический состав отвалов. На снимках Нумар и Hyperion можно различить спектры водоемов в зависимости от их химического состава. Выполненные исследования подтверждают эффективность использования гиперспектральных данных для предоставления геологической информации с помощью хорошо продуманной обработки изображений и правильного понимания геологического контекста.

Таблица 3

Концентрации загрязняющих веществ в сточных шахтных водах станции нейтрализации Левихинского рудника

Concentrations of pollutants in mine wastewater from neutralization station of Levikha mine

мес/год	Точка отбора	Fe	AMWI
		мг/дм ³	
	ПДК рыбох., 1999г.	0,1	
мар.18	т.14 — неочищенные шахтные воды	1202	-0,0027
ноя.19	т.14 — неочищенные шахтные воды	1487	-0,1786
дек.19	т.14 — неочищенные шахтные воды	1178	-0,1325
июл.20	т.14 — неочищенные шахтные воды	1119	-0,1571
мар.18	т.15 — пруд-осветлитель	468	0,0328
ноя.19	т.15 — пруд-осветлитель	86,6	-0,2133
дек.19	т.15 — пруд-осветлитель	90,2	0,0899
июл.20	т.15 — пруд-осветлитель	19,4	-0,1804
мар.18	т.16 — сбросной канал	100	-0,0581
ноя.19	т.16 — сбросной канал	44,7	-0,291
дек.19	т.16 — сбросной канал	25,8	-0,078
июл.20	т.16 — сбросной канал	28	-0,1711
мар.18	т.17 — р.Тагил, выше сброса	0,363	0,0223
ноя.19	т.17 — р.Тагил, выше сброса	1,17	-0,1838
дек.19	т.17 — р.Тагил, выше сброса	0,733	-0,1867
июл.20	т.17 — р.Тагил, выше сброса	0,583	-0,3333
мар.18	т.18 — р.Тагил, ниже сброса	0,912	0,0193
ноя.19	т.18 — р.Тагил, ниже сброса	1,98	-0,2375
дек.19	т.18 — р.Тагил, ниже сброса	0,57	-0,176
июл.20	т.18 — р.Тагил, ниже сброса	0,773	-0,2859

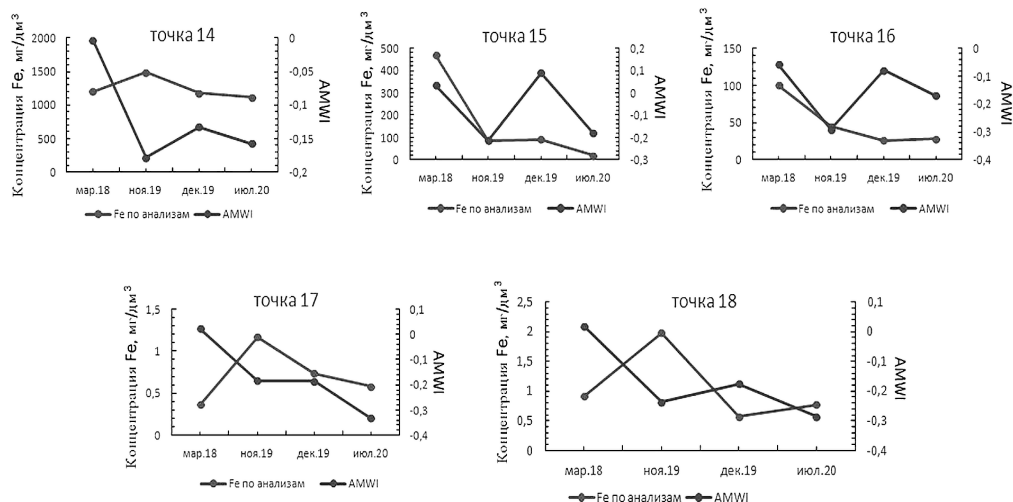


Рис. 9. Сопоставление результатов измерений концентрации Fe в воде с индексом AMWI
Fig. 9. Comparison of Fe concentrations in water from actual measurements and based on AMWI

Мультиспектральные данные, полученные со спутника Landsat-5, использовались для вычисления NDVI. Вегетационный индекс NDVI, **рассчитанный** за 1989 год, показал, что на Восточном отвале в то время активно складировались вскрышные породы. В 2011 году на отвале начала появляться разряженная древесная растительность и кустарники, но не на всей его площади. На некоторых участках до сих пор не начался процесс самозарастания. За 22 года растительный покров не был полностью восстановлен.

Сопоставление результатов измерений концентрации Fe в воде с рассчитанными по снимкам Landsat-8 значениями индекса AMWI показало, что выбранная методика вычисления индекса AMWI по мультиспектральным снимкам не подходит для водных объектов, расположенных в районе Левихинского рудника. К ограничениям алгоритма по оценке загрязнения воды по спутниковым данным можно отнести низкое пространственное разрешение снимков со спутника Landsat-8, которого оказалось недостаточно для малых водотоков. На значения индекса AMWI также

может оказывать влияние глубина водного объекта, наличие взвешенных веществ в воде и водной растительности, характер отражения солнечного излучения в зависимости от наличия или отсутствия ветрового волнения [18, 19]. Кроме того, реки горно-складчатого Урала отличаются от рек Пермского края, они меньше по размеру и скорости течения.

На данный момент для применения данных мультиспектральной и гиперспектральной съемки требуется разработка более совершенных алгоритмов, методов и технологий обработки такой информации. Исследования по комбинированию данных продемонстрировали, что объединение мультиспектральных и гиперспектральных данных позволяет точнее классифицировать объекты. Широкому применению гиперспектральных изображений препятствует отсутствие достаточного количества спутников и воздушных носителей, оборудованных спектрометрами с требуемыми характеристиками. Кроме того, возникают сложности, связанные с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, формируемой этими приборами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова В. А. Возможности гиперспектрального дистанционного зондирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. – 2019. – №11 – 2. – С. 35–38.
2. Борзов С. М. Классификация гиперспектральных изображений на основе соотношений яркостей различных каналов / С. М. Борзов, М. А. Гурьянов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т.1, № 4. – С. 81–88.
3. Колесник И. В. Земля. Взгляд из космоса. Гиперспектральная съемка // Шаг в науку. – 2019. – № 3. – С. 113–114.
4. Третьяков В. А. Основные тенденции развития гиперспектральной аппаратуры в мире // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 4. – С. 36–40.
5. Артюхина Н. К. Особенности построения видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли из космоса / Н. К. Артюхина, М. Н. Котов // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 56–62.
6. Гапонов М. И. Бортовой акустооптический гиперспектрометр для дистанционного зондирования / М. И. Гапонов, В. Э. Пожар, А. С. Мачихин, А. Е. Шерышев // Материалы междунар. науч. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации»: сб. ст. – 2017. – С. 259–261.

7. Бондур В. Г. Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений // Гиперспектральные приборы и технологии. — 2013. — С. 14–18.
8. Ломако А. А. Методы и алгоритмы анализа гиперспектральных изображений / А. А. Ломако, А. А. Ширяева // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. — 2017. — С. 85–87.
9. Перцев Д. Ю. Система сжатия гиперспектральных данных // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере: X междунар. науч.-техн. конф.: тез. докл. — 2019. — С. 165–166.
10. Никишин Ю. А. Перспективы развития гиперспектральной съемочной системы космического базирования // Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2013. — №3. — С. 35–41.
11. Rianza A., Buzzi J., Garcia-Melendez E., Vazquez I., Bellido E., et al. Pyrite mine waste and water mapping using Hymap and Hyperion hyperspectral data. *Environmental Earth Sciences*, Springer, 2011, DOI 10.1007/s12665–011–1422–0.
12. Lotfi M., Arefi H., Bahroudi A. Investigating Alteration Zone Mapping Using EO-1 Hyperion Imagery and Airborne Geophysics Data. *Journal of Mining and Environment (JME)*. Vol. 11, No. 2, 2020, 405–417. DOI: 10.22044/jme.2020.8244.1699.
13. Ramakrishnan D., Rishikesh Bharti. Hyperspectral remote sensing and geological applications. *CURRENT SCIENCE*, Vol. 108, No. 5, 2015, 879–891.
14. Chandan Kumar, Amba Shetty, Simit Raval, Prashant Kumar Champatiray, Richa Sharma. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-8, 2016, 455–461. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-8–455–2014.
15. Magendran, T., Sanjeevi, S. Hyperion image analysis and linear spectral unmixing to evaluate the grades of iron ores in the part of Noamundi, Eastern India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27, 2016, pp. 117–127. DOI: 10.1016/j.jag.2013.09.004.
16. Белова Е. И., Ершов Д. В. Метод предварительной обработки сцен LANDSAT-5/7 с изображением снежного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т.9, №4. — С. 9–14.
17. Адамович Т. А. Изучение сезонной динамики вегетационного индекса NDVI по данным Landsat // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. — 2017. — С. 99–100.
18. Березина О. А., Шихов А. Н., Абдулин Р. К. Применение многолетних рядов данных космической съемки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т.15, №2. — С. 144–158. DOI: 10.21046/2070–7401–2018–15–2-144–158.
19. Ryankov, S. V., Maximovich, N. G., Khayrulina, E. A. et al. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images. *Mine Water Environ* (2021). DOI: 10.1007/s10230–021–00761–7. **TMAS**

REFERENCES

1. Antonova V. A. *Vozmozhnosti giperspektral'nogo distantsionnogo zondirovaniya* [Possibilities of hyperspectral remote sensing]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences], 2019, no. 11–2, pp. 35–38. [In Russ]

2. Borzov S. M., Guryanov M. A. *Klassifikatsiya giperspektral'nykh izobrazheniy na osnove sootnosheniy yarkostey razlichnykh kanalov* [Classification of hyperspectral images based on the brightness ratios of different channels]. *Interesko Geo-Sibir Publ.*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 81–88. [In Russ]

3. Kolesnik I. V. *Zemlya. Vzglyad iz kosmosa. Giperspektral'naya syomka* [Land. View from space. Hyperspectral imaging]. *Shag v nauku* [Step into science], 2019, no. 3, pp. 113–114. [In Russ]

4. Tretyakov V. A. *Osnovnyye tendentsii razvitiya giperspektral'noy apparatury v mire* [Main trends in the development of hyperspectral equipment in the world]. *Kosmonavtika i raketostroeniye* [Cosmonautics and rocket science], 2013, no. 4, pp. 36–40. [In Russ]

5. Artyukhina N. K. *Osobennosti postroeniya videospektrometrov distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Main features of the construction of video spectrometers for remote sensing of the Earth from space]. *Pribory i metody izmereniy* [Instruments and measurement methods], 2010, no. 1, pp. 56–62. [In Russ]

6. Gaponov M. I. *Bortovoy akustoopticheskiy giperspektrometr dlya distantsionnogo zondirovaniya* [Onboard acousto-optic hyperspectrometer for remote sensing]. *Akustoopticheskiye i radiolokatsionnye metody izmereniy i obrabotki informatsii. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Acousto-optic and radar methods of measurement and information processing. Proceedings of the International scientific conference]. Collection of articles, 2017, pp. 259–261. [In Russ]

7. Bondur V. G. *Sovremennyye podkhody k obrabotke giperspektral'nykh aerokosmicheskikh izobrazheniy* [Modern approaches to hyperspectral aerospace image processing]. *Giperspektral'nyye pribory i tekhnologii* [Hyperspectral devices and technologies], 2013, pp. 14–18. [In Russ]

8. Lomako A. A. *Metody i algoritmy analiza giperspektral'nykh izobrazheniy* [Methods and algorithms for the hyperspectral images analysis]. *Prikladnyye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya. Materialy IV mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf.* [Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics, and Condensed Matter Physics. Proceedings of the IV International scientific-practical conference], 2017, pp. 85–87. [In Russ]

9. Pertsev D. Yu. *Sistema szhatiya giperspektral'nykh dannykh* [Hyperspectral data compression system]. *Informatsionnyye tekhnologii v promyshlennosti, logistike i sotsial'noy sfere. X mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : tez. dokladov* [Information technologies in industry, logistics, and social sphere. The X international scientific and technical conference. Abstracts of papers, 2019, pp. 165–166. [In Russ]

10. Nikishin Yu. A. *Perspektivy razvitiya giperspektral'noyb syomochnoy sistemy kosmicheskogo bazirovaniya* [Prospects for the development of a space-based hyperspectral imaging system]. *Geodeziya i aerofotosyomka Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Geodesy and aerial photography. Proceedings of higher educational institutions], 2013, no. 3, pp. 35–41. [In Russ]

11. Rianza A., Buzzi J., Garcia-Melendez E., Vazquez I., Bellido E., et al. Pyrite mine waste and water mapping using Hymap and Hyperion hyperspectral data. *Environmental Earth Sciences*, Springer, 2011, DOI 10.1007/s12665–011–1422–0.

12. Lotfi M., Arefi H., Bahroudi A. Investigating Alteration Zone Mapping Using EO-1 Hyperion Imagery and Airborne Geophysics Data. *Journal of Mining and Environment (JME)*. vol. 11, no. 2, 2020, 405–417. DOI: 10.22044/jme.2020.8244.1699.

13. Ramakrishnan D., Rishikesh Bharti. Hyperspectral remote sensing and geological applications. *Current Science*, vol. 108, no. 5, 2015, pp. 879–891.

14. Chandan Kumar, Amba Shetty, Simit Raval, Prashant Kumar Champatiray, Richa Sharma. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, vol. XL-8, 2016, pp. 455–461. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-8–455–2014.

15. Magendran, T., Sanjeevi, S. Hyperion image analysis and linear spectral unmixing to evaluate the grades of iron ores in the part of Noamundi, Eastern India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27, 2016, pp. 117 – 127. DOI: 10.1016/j.jag.2013.09.004.

16. Belova E. I., Ershov D. V. *Metod predvaritel'noy obrabotki stsen LANDSAT-5/7 s izobrazheniem snezhnogo pokrova* [The method for preliminary processing of LANDSAT-5/7 scenes with the snow cover]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, vol. 9, no. 4, pp. 9 – 14. [In Russ]

17. Adamovich T. A. *Izucheniye sezonnoy dinamiki vegetatsionnogo indeksa NDVI po dannym Landsat* [Study of the seasonal dynamics of the vegetation index (NDVI) on the basis of Landsat data]. *Perspektivy razvitiya nauchnykh issledovaniy v 21 veke. Materialy XIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Prospects for the scientific research development in the 21st century. Proceedings of the XIII International scientific-practical conference], 2017, pp. 99 – 100. [In Russ]

18. Berezina O. A., Shikhov A. N., Abdulin R. K. *Primeneniye mnogoletnikh ryadov dannykh kosmicheskoy syomki dlya otsenki ekologicheskoy situatsii v ugledobyvayushchikh rayonakh (na primere likvidirovannogo Kizelovskogo ugol'nogo basseyna)* [Application of long-term record of satellite imagery data for assessing the ecological situation in coal-mining regions (on the example of abandoned Kizelovskiy coal basin)]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2018, vol. 15, no. 2, pp. 144 – 158, DOI: 10.21046/2070 – 7401 – 2018 – 15 – 2-144 – 158. [In Russ]

19. Pyankov, S. V., Maximovich, N. G., Khayrulina, E. A. et al. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images. *Mine Water Environ*, 2021. DOI: 10.1007/s10230 – 021 – 00761 – 7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыбников Петр Андреевич^{1,2} — канд. геол.-минерал. наук, в.н.с. зав. лаборатории «Геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании», e-mail: ribnikoff@yandex.ru;

*Бузина Дарья Алексеевна*¹ — м.н.с. лаборатории «Геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании», e-mail: buzina.dasha2014@yandex.ru;

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН, 620075, Россия, Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58;

² Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rybnikov P. A.^{1,2}, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Management;

*Buzina D. A.*¹, Junior Researcher at the Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Management, e-mail: buzina.dasha2014@yandex.ru;

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58 Mamin-Sibiryak str., Yekaterinburg, Russia, 620075;

² Ural State Mining University, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 03.09.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 25.05.2021; received after the review 03.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.