

УДК 622.271.45:528.7:581.524.441

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОЗДЕЙСТВИЯ СКЛАДИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ*

С. П. МЕСЯЦ, ведущий научный сотрудник, mesyats@goi.kolasc.net.ru
С. П. ОСТАПЕНКО, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

При планировании научно-исследовательских работ в Горном институте академик Н. Н. Мельников уделял большое внимание расширению области применения информационных технологий в горном деле, полагая, что в контексте перехода страны к «цифровой экономике» цифровизация недропользования потребует разработки средств и методов компьютерного контроля и управления процессами на всех этапах освоения месторождений полезных ископаемых [1–4]. Особое значение Н. Н. Мельников придавал экологическому аспекту горного производства, что нашло свое отражение в обосновании экологической стратегии его развития, базирующейся, в том числе, на применение методов компьютерного моделирования [5].

Складирование и консервация отходов горного производства является одним из наиболее ответственных этапов освоения месторождений ввиду высокой социальной значимости и воздействия на природную среду: горнопромышленная отрасль характеризуется огромными объемами отходов [6–8]. Так, например, в Мурманской области объем отходов Кольского горнопромышленного комплекса достигает 99,8 % общего [9]. За время, прошедшее с середины прошлого века, – начала промышленной эксплуатации месторождений Мурманской области – добыто $\sim 2,6 \cdot 10^9$ т руды [10] и складировано более 10^9 т отходов добычи и переработки минерального сырья, что не может не оказывать влияния на состояние природной среды и здоровье населения региона.

Следует отметить, что в настоящее время контроль за воздействием отходов на природную среду затруднен вследствие отсутствия возможности непосредственного доступа к объекту и корректной информации об их расположении. Аварийные потери минерального сырья не документируют. Аналогичная ситуация характерна в случае давно прекращенной разработки месторождения. Так, например, в Мурманской области в 1944 г. в районе Печенгской губы прекращена добыча полиметаллических руд, информация об отходах отсутствует [10].

Актуализация сведений о воздействии отходов горного производства на природную среду, накопленных за время освоения

Предложен методический подход к оценке воздействия складированных отходов добычи и переработки рудного сырья на природную среду на основе спутниковых данных по двум параметрам подстилающей поверхности: индексу наличия характерных для отходов химических соединений и вегетационному индексу. На примере железорудного предприятия выполнена оценка суммарной площади складированных отходов добычи и переработки рудного сырья и динамика их изменения во времени. Выявлено воздействие складированных отходов на природную среду, приводящее к нарушению растительного покрова. Показана эффективность мероприятий, проводимых предприятием по восстановлению растительного покрова нарушенных земель.

Ключевые слова: железорудное месторождение, отходы добычи и переработки руд, отходы рудообогащения, спутниковые данные, вегетационный индекс, индекс наличия компонентов перерабатываемых руд, растительный покров, мониторинг, создание фитоценоза, восстановление.

DOI: 10.17580/gzh.2019.06.10

месторождений, не может быть обеспечена изучением архивов предприятий из-за неполноты хранящихся данных, не входящих в сферу производственных интересов. Зачастую единственной доступной информацией об отходах является факт их регистрации в Государственном реестре объектов размещения отходов и сведения Росстата об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства (форма 2-ТП).

В связи с этим представляется перспективным использование спутниковых данных, обеспечивающих объективный контроль воздействия горнодобывающих предприятий на природную среду и характеризующихся частой периодичностью съемки, значительной широтой охвата территории, доступностью электронных архивов наблюдений по сети Интернет.

Объект исследования

В качестве объекта исследований определено одно из предприятий Кольского ГПК, разрабатывающее открытым способом месторождение магнетитсодержащих руд.

Исходные данные и методы исследования

Перспективным направлением дистанционной идентификации геоматериалов (горных пород, продуктов их химического выветривания) является применение многоканальных космоснимков,

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН I.39 «Фундаментальные основы и энергоэффективные, ресурсосберегающие, инновационные технологии переработки минерального сырья, утилизации промышленных и бытовых отходов» (госзадание № 0226-2018-0001).

в частности для геологического картирования и составления тематических карт [11].

В рамках этого направления для характеристики воздействия отходов горного производства на природную среду использовали сформированный в Горном институте КНЦ РАН массив спутниковых данных наблюдения территории Мурманской области космическим аппаратом Landsat [12] за период 2005–2018 гг.

Цель проводимых исследований – разработка подхода к оценке площадей, занятых отходами добычи и переработки рудного сырья, с учетом динамики их изменения во времени. Воздействие отходов добычи и переработки рудного сырья на природную среду оценивали по пороговым значениям индексов (соотношений интенсивностей каналов космоснимка): индекса наличия характерных для отходов химических соединений и вегетационного индекса, показывающего состояние растительного покрова по его фотосинтетической активности. Оценку площади нарушенных земель проводили по суммарной площади точек растра, характеризующих низким значением вегетационного индекса (отсутствие растительного покрова) и высоким значением индекса наличия железосодержащих химических соединений.

Набор каналов изображений, получаемых с помощью космического аппарата Landsat, позволяет рассчитать не менее 9 индексов, характеризующих наличие на подстилающей поверхности железосодержащих химических соединений, что отвечает вещественному составу перерабатываемых магнетитсодержащих руд [13–16]. Для выявления индекса, обеспечивающего полноту отображения воздействия горнодобывающих предприятий на природную среду, предварительно была исследована корреляция индексов, характеризующих наличие значительного количества железосодержащих химических соединений, с вегетационным индексом и различие в оценках площади нарушенных земель по усредненной сумме квадратов разностей оценок.

Оценку состояния растительного покрова на исследуемой территории проводили по вегетационному индексу NDVI [17], рассчитанному с использованием каналов 3, 4 и 5 снимков Landsat 5 и Landsat 8 соответственно, по соотношениям $(4-3)/(4+3)$ и $(5-4)/(5+4)$. Отсутствие растительного покрова характеризуется значениями индекса меньше 0,2.

Каждый пиксель снимка Landsat, рассматриваемый в качестве мониторинговой точки размером 30×30 м, относили к одной из четырех категорий по наличию или отсутствию на подстилающей поверхности растительного покрова и наличию железосодержащих химических соединений. Категорию мониторинговых точек, характеризующую отсутствием растительного покрова и наличием значительного количества железосодержащих химических соединений, использовали для расчета площади складированных отходов. Оценку динамики воздействия складированных отходов добычи и переработки руд на природную среду на прилегающей территории проводили с использованием мониторинговых точек, характеризующих наличием и растительного покрова, и значительного количества железосодержащих химических соединений.

Оценку площади складированных отходов добычи и переработки руд и промплощадки в целом выполняли по изображениям,

Табл. 1. Статистические характеристики оценки площади воздействия складированных отходов добычи и переработки руд на природную среду по индексу, характеризующему наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационному индексу

№	Соотношение каналов снимка Landsat при расчете индекса, характеризующего наличие железосодержащих химических соединений	Коэффициент корреляции оценок площади по индексу, характеризующему наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационному индексу	Расхождение оценок площади по индексу, характеризующему наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационному индексу, км ²
1	6/7	0,90	3,34
2	5/4	0,88	3,67
3	6/4	0,88	4,09
4	7/5	0,80	5,73
5	6/5	0,85	6,04
6	3/4	0,85	9,38
7	4/2	0,97	9,69
8	7/5+3/4	0,88	13,04
9	4/1	0,87	13,57

полученным вычислением индексов без изменения исходного разрешения снимков Landsat (~30 м).

Обработку спутниковых данных проводили с помощью некоммерческого программного обеспечения для работы с растровыми изображениями: геоинформационной системы QGIS [18] и программной среды R с библиотекой raster [19].

Результаты исследований и их обсуждение

Сравнение площади складированных отходов добычи и переработки руд показало высокую корреляцию значений, полученных по индексу, характеризующему наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационному индексу, что обуславливает целесообразность их применения при мониторинге воздействия отходов на природную среду (табл. 1).

С учетом результатов статистических исследований при оценке воздействия отходов горного производства на природную среду наряду с вегетационным индексом применяли индекс, характеризующий наличие железосодержащих химических соединений, показавший наименьшее расхождение с вегетационным индексом в оценке площади нарушенных земель – (6/7), где 6 и 7 – каналы мультиспектрального изображения Landsat 8 в спектральных диапазонах 1,560–1,660 и 2,100–2,300 мкм соответственно.

Результаты мониторинга отвала вскрышных пород карьера и складированных отходов рудообогащения (ограждающая дамба хвостохранилища) свидетельствуют о чувствительности применяемых индексов для оценки воздействия отходов горного производства на природную среду (рис. 1 и 2).

Увеличение площади отвала вскрышных пород карьера с 2013 г. сопровождается уничтожением растительного покрова, что проявляется в значении вегетационного индекса менее 0,2 и антибатном ходе индекса, характеризующего наличие железосодержащих химических соединений (см. рис. 1, 2, изображения а).

Неизменность границы хвостохранилища, обусловленная наличием ограждающей дамбы, проявляется стационарностью временного ряда индекса, характеризующего наличие железосодержащих химических соединений, его отклонения не превышают 10 % (см. рис. 1, 2, изображения б). С 2006 г. наблюдается увеличение значений вегетационного индекса с ~0,2 (отсутствие растительного покрова) до 0,55 (см. рис. 2, изображение б), что связано с проведением мероприятий по восстановлению нарушенных земель, созданием сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя по разработанной в Горном институте технологии и соответствует результатам спутникового мониторинга процесса восстановления [20]. Следует отметить высокую чувствительность индексов к состоянию подстилающей поверхности ограждающей дамбы хвостохранилища, наряду с незначительными изменениями изображений в естественном цвете по снимкам Landsat.

Оценка площади с использованием индекса, характеризующего наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационного индекса, выполненная для двух площадок с разной подстилающей поверхностью: первая – на отвалах вскрышных пород карьера и рудных складах, вторая – на территории лесного массива, прилегающего к границе земельного отвода предприятия, свидетельствует о достоверности и малой погрешности измерения (табл. 2). В качестве эталонного значения использовали оценку площади, полученную в интерактивном режиме с помощью инструментов Публичной кадастровой карты России-2019 [21].

Применение двух индексов позволяет повысить точность оценки площади, что объясняется нивелированием помех на многоканальных космоснимках. Следует отметить, что предельная точность оценки площади по космоснимку определяется разрешением изображения (для снимков Landsat ~30 м) и составляет ~0,001 км², что соответствует величине доверительного интервала при комбинации индексов (см. табл.2).

В ходе анализа спутниковых данных было установлено, что отклонение оценки площади от среднего для ряда наблюдений связано с нахождением на части снимков Landsat значимого числа мониторинговых точек в разных условиях освещенности, в том числе – в затенении. Воспроизводимость оценок площади складированных отходов добычи и переработки руд планируется улучшить за счет учета данных ежедневных наблюдений исследуемой территории с космического аппарата MODIS при разных углах визирования и положении Солнца.

На конец 2018 г. суммарная площадь нарушенных земель предприятия, рассчитанная с использованием двух индексов, составила 34,8 км².

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о достоверности оценки воздействия складированных отходов добычи и переработки рудного сырья на природную среду за счет интегральной обработки нескольких показателей отражения от земной поверхности с использованием четырех каналов космоснимков Landsat 8. Учитывая объективность, регулярность, доступность данных спутниковых наблюдений за земной поверхностью, предложен алгоритм практической реализации разработанного

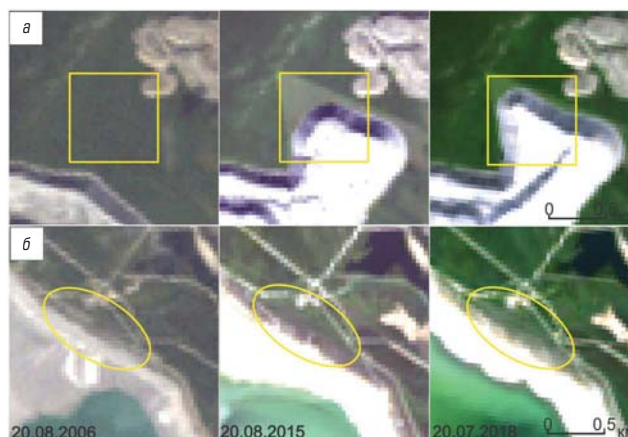


Рис. 1. Временная динамика воздействия отходов на природную среду: отвал вскрышных пород карьера (а) и складированные отходы рудообогащения (б) (изображения получены по снимкам Landsat в естественном цвете). Желтым контуром выделено расположение мониторинговых площадок.

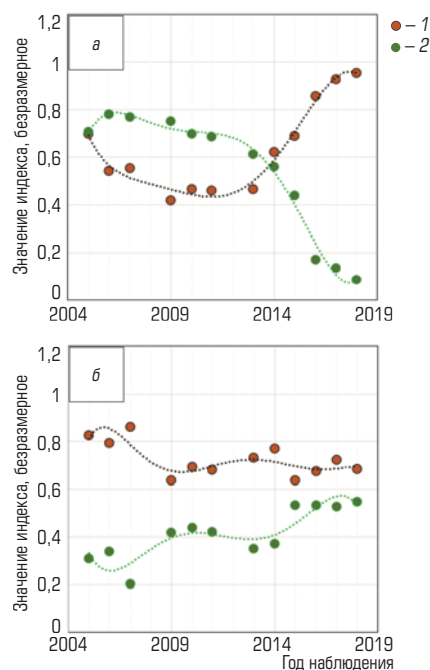


Рис. 2. Динамика индексов: характеризующего наличие железосодержащих химических соединений (1) и вегетационного (2) на мониторинговых площадках; отвал вскрышных пород карьера (а), складированные отходы рудообогащения (б)

методического подхода для поддержки принятия решений по восстановлению земель, нарушенных в ходе освоения месторождений.

Практическая реализация методического подхода включает загрузку актуальных данных спутниковых наблюдений и компьютерных программ для их обработки средствами операционной системы для работы в сети Интернет. Расчет индекса, характеризующего наличие железосодержащих химических соединений,

Табл. 2. Оценки площадей с разной подстилающей поверхностью по индексу, характеризующему наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационному индексу (пороговые значения индексов составляли 0,8 и 0,2 соответственно)

Тип подстилающей поверхности площадки	Оценка площади с использованием индекса подстилающей поверхности по снимкам Landsat, км ²			Оценка площади по Публичной кадастровой карте России-2019, км ²
	Индекс, характеризующий наличие железосодержащих химических соединений	Вегетационный индекс	Комбинация индекса, характеризующего наличие железосодержащих химических соединений, и вегетационного индекса	
Отвалы вскрышных пород карьера и рудные склады	3,383±0,004	3,308±0,005	3,308±0,001	3,308543
Смешанный хвойно-лиственный лес	1,835±0,007	1,835±0,007	1,835±0,001	1,835325

и вегетационного индекса выполняют с помощью векторных операций с геоиндексированными растровыми данными спутниковых наблюдений в соответствии со стандартным ходом проведения вычислений в среде R, включающим загрузку исходных данных, проведение арифметических операций (приведены в части «Исходные данные и метод исследования»), сохранение результатов вычислений. Визуализацию пространственных распределений индексов проводят в среде геоинформационной системы QGIS стандартной последовательностью операций импорта файлов, полученных расчетным путем в среде R.

Целевым назначением предлагаемого алгоритма применения данных спутниковых наблюдений является достижение экологической сбалансированности при разработке месторождений, характеризующейся минимальным приростом площади нарушенных земель в соответствии с экологической стратегией развития горного производства.

Заключение

В рамках предложенного подхода обоснована возможность оценки воздействия складированных отходов добычи и переработки рудного сырья на природную среду по данным спутниковых наблюдений. Отличительным признаком и преимуществом спутниковых наблюдений за состоянием земной поверхности являются: ежемесячная съемка, широта охвата территории, информативность за счет возможности комбинации спектральных каналов съемки, наличие электронных архивов наблюдений

и возможность доступа к ним по сети Интернет. В совокупности эти преимущества обеспечивают перспективность использования данных спутниковых наблюдений для мониторинга воздействия складированных отходов горного производства на природную среду и позволяют:

- повысить корректность оценки воздействия складированных отходов на природную среду по убывающей динамике вегетационного индекса с учетом индекса, характеризующего наличие химических соединений – компонентов перерабатываемой руды;
- оценить эффективность мероприятий по восстановлению растительного покрова.

На примере одного из предприятий Кольского горнопромышленного комплекса по данным спутниковых наблюдений выполнена оценка площади нарушенных земель с привлечением индекса, характеризующего наличие компонентов перерабатываемой руды. Показана эффективность восстановления растительного покрова по разработанной в Горном институте технологии, обеспечивающей значительно более быстрое формирование фитоценоза, чем при самовосстановлении, проявляющаяся в возрастающей временной динамике вегетационного индекса

Использование спутниковых данных для мониторинга воздействия складированных отходов горного производства на природную среду не требует коммерческого программного обеспечения и может быть рекомендовано для поддержки принятия решений по восстановлению нарушенных земель в ходе разработки месторождений на горнопромышленных предприятиях.

Библиографический список

1. Мельников Н. Н. Без науки нет будущего // Горный журнал. 2013. № 7. С. 101–102.
2. Мельников Н. Н., Лукичев С. В., Наговицын О. В. Компьютерная технология инженерного обеспечения горных работ на основе системы MINEFRAME // ГИАБ. 2013. № 9. С. 223–233.
3. Мельников Н. Н., Федоров С. Г. Инновационный проект освоения месторождения Олений Ручей в Хибинах // Горный журнал. 2010. № 9. С. 36–39.
4. Мельников Н. Н. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск 23. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли. С. 7–18.
5. Мельников Н. Н., Скороходов В. Ф., Месяц С. П., Иванова В. А., Билин А. Л. и др. Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли // Горный журнал. 2013. № 12. С. 109–116.
6. Turgunova K. K., Sultamurat G. I., Boranbaeva B. M. Kazakhstan republic legislation law as a way to reduce negative impact on environment // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 11. P. 9–15. DOI: 10.17580/cisr.2016.01.02
7. Filin A. E., Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M. Prospects of safety control in combination of mining and metallurgy industries // Eurasian Mining. 2018. No. 1. P. 31–34. DOI: 10.17580/em.2018.01.07
8. Zenkov I. V., Nefedov B. N., Zayats V. V., Kiryushina E. V. Remote monitoring of mining situation and disturbed land ecology at the Teisk and Abagas iron ore deposits // Eurasian Mining. 2018. No. 1. P. 41–44. DOI: 10.17580/em.2018.01.09
9. Ежегодные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области. URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/> (дата обращения: 19.03.2019).
10. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / под ред. Г. Г. Райкунова. – М. : Физматлит, 2014. – 136 с.
11. Fennoscandian Mineral Deposits application, Ore Deposits database and Maps. Essential information on a still under-explored region / Geological Survey of Finland. URL: <http://en.gtk.fi/information-services/databases/fodd> (дата обращения: 19.03.2019).
12. About the LP DAAC / LP DAAC. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/about/> (дата обращения: 15.03.2019).
13. Index Database. URL: <https://www.indexdatabase.de/> (дата обращения: 19.03.2019).
14. Volesky J. C., Stern R. J., Johnson P. R. Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, Southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies // Precambrian Research. 2003. Vol. 123. No. 2-4. P. 235–247.
15. Rowan L. C., Mars J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 84. Iss. 3. P. 350–366.

16. *Yaqin Sun, Shufang Tian, Baogang Di.* Extracting mineral alteration information using WorldView-3 data // *Geoscience Frontiers*. 2017. Vol. 8. Iss. 5. P. 1051–1062.
17. *Yengoh G. T., Dent D., Olsson L., Tengberg A. E., Tucker III C. J.* Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. – Cham : Springer, 2015. – 110 p.
18. QGIS – The Leading Open Source Desktop GIS. URL: <https://qgis.org/ru/site/about/index.html> (дата обращения: 19.03.2019).
19. The R Project for Statistical Computing. 2019. URL: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 29.04.2019).
20. *Месяц С. П., Остапенко С. П.* Методический подход к мониторингу восстановления нарушенных земель горнопромышленной отрасли по данным спутниковых наблюдений // *Горная промышленность*. 2018. № 6. С. 72.
21. Публичная кадастровая карта России / ЕГРП 365, 2019. URL: <http://egrp365.ru/map> (дата обращения: 19.03.2019). **РЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 72–76
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.10

The prospect of using satellite data to monitor the impact of mining waste on environment

Information about authors

S. P. Mesyats¹, Leading Researcher, mesyats@goi.kolasc.net.ru

S. P. Ostapenko¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹ Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The case study object is an industrial site of an iron ore enterprise of the Kola mining complex and the surrounding area. The work aims to assess the mining and processing ore waste impact on natural environment using satellite data to support decision-making on waste management and improve the ecological state of the region.

A methodical approach to the research is to assess the impact of the mining and processing ore waste on environment using two parameters of the underlying surface: an index of presence of chemical compounds typical for waste and a vegetation index, taking into account their change in the course of time from 2005 to 2018.

As a research result, an assessment was made of the total area of disturbed lands and the area of stored mining and processing waste in dynamics of their change over time. The environmental impact of stored mining and processing waste, leading to inhibition of a vegetation cover, was revealed. The efficiency of company's measures to create the phytocenosis (vegetation cover) on the tailings with the aim to reduce the mining-induced impact on the environment is shown.

The article highlights the perspective of using satellite observations to monitor the state of the mining and processing ore waste aimed at improving the accuracy of the assessment of the area of disturbed lands, identifying areas of negative environmental impact of stored waste and assessing the effectiveness of measures to create a vegetation cover.

The proposed approach covers the support of decision-making during the development of deposits by mining enterprises and the assessment of the environmental impact of mining.

The study was carried out in the framework of the Basic Research Program of the Russian Academy of Sciences I.39 : Fundamentals and energy-effective, resource-saving and innovation technologies of mineral processing and factory and residential waste management. State Contract No. 0226–2018–0001.

Keywords: iron ore deposit, mining waste, ore processing waste, satellite data, vegetation cover, vegetation index, index of processed ore components presence, monitoring, phytocenosis creation

References

1. Melnikov N. N. There is no future without science. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 7. pp. 101–102.
2. Melnikov N. N., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Ogy of engineering providing of mining on basis of mine-frame softwar. *GIAB*. 2013. No. 9. pp. 223–233.
3. Melnikov N. N., Fedorov S. G. Innovation project of the deposit exploration in Oleniy Ruchey in Khibiny. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 9. pp. 36–39.

4. Melnikov N. N. Information technologies in implementation of ecological strategy in the mining industry. *GIAB*. 2017. Special Issue 23. Information technologies in implementation of ecological strategy in the mining industry. pp. 7–18.
5. Melnikov N. N., Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Ivanova V. A., Bilin A. L. et al. Ecological strategy of mining branch development. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 12. pp. 109–116.
6. Turgunova K. K., Sultamurat G. I., Boranbaeva B. M. Kazakhstan republic legislation law as a way to reduce negative impact on environment. *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 11. pp. 9–15. DOI: 10.17580/cisr.2016.01.02
7. Filin A. E., Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M. Prospects of safety control in combination of mining and metallurgy industries. *Eurasian Mining*. 2018. No. 1. pp. 31–34. DOI: 10.17580/em.2018.01.07
8. Zenkov I. V., Nefedov B. N., Zayats V. V., Kiryushina E. V. Remote monitoring of mining situation and disturbed land ecology at the Teisk and Abagas iron ore deposits. *Eurasian Mining*. 2018. No. 1. pp. 41–44. DOI: 10.17580/em.2018.01.09
9. Annual reports on state and protection of the environment in the Murmansk Region. Available at: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/> (accessed: 19.03.2019).
10. Raykunov G. G. (Ed.). Hyperspectral remote sensing in geological mapping. Moscow : Fizmatlit, 2014. 136 p.
11. Fennoscandian Mineral Deposits application, Ore Deposits database and Maps. Essential information on a still under-explored region. Geological Survey of Finland. Available at: <http://en.gtk.fi/information/services/databases/fodd> (accessed: 19.03.2019).
12. About the LP DAAC. LP DAAC. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov/about/> (accessed: 15.03.2019).
13. Index Database. Available at: <https://www.indexdatabase.de/> (accessed: 19.03.2019).
14. Volesky J. C., Stern R. J., Johnson P. R. Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, Southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies. *Precambrian Research*. 2003. Vol. 123, No. 2–4. pp. 235–247.
15. Rowan L. C., Mars J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 84, Iss. 3. pp. 350–366.
16. *Yaqin Sun, Shufang Tian, Baogang Di.* Extracting mineral alteration information using WorldView-3 data. *Geoscience Frontiers*. 2017. Vol. 8, Iss. 5. pp. 1051–1062.
17. *Yengoh G. T., Dent D., Olsson L., Tengberg A. E., Tucker III C. J.* Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. Cham : Springer, 2015. 110 p.
18. QGIS – The Leading Open Source Desktop GIS. Available at: <https://qgis.org/ru/site/about/index.html> (accessed: 19.03.2019).
19. The R Project for Statistical Computing. 2019. Available at: <https://www.r-project.org/> (accessed: 29.04.2019).
20. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. Methodological approach to the monitoring of the restoration of lands disturbed by the mining sector based on satellite data. *Gornaya promyshlennost*. 2018. No. 6. p. 72.
21. Public cadastral map of Russia. EGRP 365, 2019. Available at: <http://egrp365.ru/map> (accessed: 19.03.2019).

