

# Динамика восстановления нарушенных земель горнодобывающей отрасли в соответствии с принципом самоорганизации природных систем и ее прогнозирование по спутниковым данным

С.П. Месяц✉, С.П. Остапенко

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация  
✉s.mesyats@ksc.ru

**Резюме:** Экологические проблемы освоения месторождений минерального сырья в значительной степени связаны с необходимостью складирования отходов добычи и переработки, являющихся источником загрязнения природной среды. Большие площади складированных отходов рудообогатения определяют целесообразность применения спутниковых данных для мониторинга экологического состояния нарушенных земель с целью принятия обоснованных решений по восстановлению целостности природных ландшафтов, что имеет принципиальное значение для Арктических регионов. Цель исследований – выявление на основе спутниковых данных динамики формирования фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта при реализации технологии, разработанной в Горном институте Кольского научного центра РАН в соответствии с принципом самоорганизации природных систем в рамках эволюции системы «горная порода – биота» созданием сеяного без нанесения плодородного слоя злакового фитоценоза, обеспечивающего образование биологически активной среды. Анализ временного ряда спутниковых данных вегетационного индекса, характеризующего сукцессию сеяного злакового фитоценоза на откосах ограждающей дамбы складированных отходов обогащения Хибинской группы месторождений апатитсодержащих руд, свидетельствует об определяющем влиянии фитоценологических факторов на динамику восстановления природных экосистем. Геоботаническое исследование мониторингового полигона показало, что при переходе к лесной стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза наблюдается появление ярусной структуры и массовое подселение видов окружающего природного ландшафта, что согласуется с увеличением вегетационного индекса и позволяет прогнозировать динамику восстановления природных экосистем.

**Ключевые слова:** нарушенные земли, восстановление, складированные отходы рудообогатения, ограждающая дамба, сеяный злаковый фитоценоз, сукцессия, видовой состав растительного покрова, природный ландшафт, мониторинг, спутниковые данные, вегетационный индекс, индекс стресса влажности

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания № 0226-2019-0060 «Развитие методологии мониторинга природных экосистем при восстановлении нарушенных земель горнопромышленного комплекса в соответствии с концепцией естественного почвообразования созданием биологически активной среды».

**Для цитирования:** Месяц С.П., Остапенко С.П. Динамика восстановления нарушенных земель горнодобывающей отрасли в соответствии с принципом самоорганизации природных систем и ее прогнозирование по спутниковым данным. *Горная промышленность*. 2020;(6):137–142. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-137-142.

## Recovery Dynamics of Lands Disturbed by Mining Operations due to Self-Organizing Principle of Natural Systems and its Forecasting Using Satellite Data

S.P. Mesyats✉, S.P. Ostapenko

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation  
✉s.mesyats@ksc.ru

**Abstract:** Environmental issues associated with the development of mineral deposits are largely caused by the need to store mining and processing waste which becomes a source of environmental pollution. Large areas of dumped ore processing wastes determine the expediency of applying satellite data to monitor the environmental condition of the disturbed lands in order to make justified decisions on restoring the integrity of natural landscapes, which is crucial for the Arctic regions. The purpose of the research is to use the satellite data as the basis to reveal the dynamics of plant formation on the surrounding natural terrain when implementing the technology developed in the Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences in accordance with the self-organizing principle of natural systems in the framework of the rock-biota system evolution. This is achieved by introducing a gramineous plant community without creating a fertile layer, which creates a biologically active environment. Analysis of the vegetation index obtained from a time series of the satellite data that characterizes the introduced vegetational change of the gramineous plant community on the bund wall slopes at the Khibiny group of apatite-containing ore deposits demonstrates the determinant influence of phytocoenotic factors on the recovery dynamics of natural ecosystems. A geobotanical study of the monitoring site has shown that in transition from the introduced gramineous to the forest stage of vegetational change, we observe a tier structure and large-scale resettlement of species from the adjacent natural areas, which is consistent with an increase in the vegetation index and allows to predict the dynamics of the natural ecosystem recovery.

**Keywords:** disturbed lands, ecological restoration, stockpiled ore processing waste, protective dam, sown cereal phytocenosis, succession, species composition of vegetation cover, monitoring, satellite data, vegetation index, moisture stress index

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of the State Contract No. 0226-2019-0060 "Development of methodology for monitoring natural ecosystems during reclamation of lands disturbed by mining operations in compliance with the concept of natural soil formation through creation of a biologically active environment".

**For citation:** Mesyats S.P., Ostapenko S.P. The dynamics of restoration of disturbed lands in the mining industry in accordance with the self-organization principle of natural systems and its prediction by satellite data. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(6):137–142. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-137-142.

## Введение

Актуальность проблемы поддержания устойчивого состояния биосферы перманентно возрастает при снижении ее продуктивности на фоне роста производства и потребления ресурсов [1]. Проблема сохранения биосферы выводит на первое место необходимость сохранения и восстановления почвенной оболочки в свете современного знания ее роли в поддержании устойчивого состояния биосферы [2].

Анализ практики восстановления техногенно-нарушенных земель позволяет сделать вывод, что наиболее перспективный путь состоит в содействии регенерационным возможностям природной среды на основе изучения потенциала самовосстановления каждой конкретной природной системы [3].

В Горном институте КНЦ РАН разработана методология восстановления нарушенных земель горной отрасли в соответствии с принципом самоорганизации природных систем созданием биологически активной среды, обеспечивающей увеличение энергетического потенциала системообразующей функции биоты. Сеяный без нанесения плодородного слоя злаковый фитоценоз приводит к значительно более быстрому, чем при самозарастании, формированию биогеоценоза-аккумулятивного горизонта. В ходе мониторинга выделены три стадии сукцессии сеяного фитоценоза: луговая стадия, переход от луговой стадии к лесной, лесная стадия [4].

Изучение видового состава и биопродуктивности лесной стадии сукцессии сеяного фитоценоза, а также генетических характеристик формирующейся почвы свидетельствует о более быстром, чем при самозарастании, формировании фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта, что подтверждает правильность разработанной методологии, обеспечивающей восстановление природных экосистем в соответствии с принципом их самоорганизации [4].

Для исследования динамики восстановления природных экосистем, учитывая площадные характеристики нарушенных земель горной отрасли, перспективно использование дистанционных методов [5–7]. Современные средства программной обработки мультиспектральных спутниковых данных просты в освоении, методики их применения для ситуативного мониторинга территории представлены в сети Интернет [8–12]. Свободный доступ и оперативная публикация данных, перманентная спутниковая съемка, пространственный охват представляют возможность оценивать площадные параметры горнопромышленных объектов с высокой точностью, несмотря на невысокое по современным меркам пространственное разрешение ~10–30 м [6]. Выбор и комбинация спектральных каналов обеспечивают требуемое информационное наполнение спутниковых изображений, обусловленное особенностями взаимодействия солнечной радиации с подстилающей поверхностью [13].

Для характеристики растительного покрова по спутни-

ковым данным наиболее часто используется вегетационный индекс (NDVI – normalized difference vegetation index), нормированная разность в интенсивности красного и ближнего инфракрасного каналов спутникового изображения [14]. Как было показано ранее на примере складированных отходов обогащения бадделеит-апатит-магнетитовых руд, при формировании фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта в ходе сукцессии сеяного фитоценоза происходит увеличение вегетационного индекса [15].

Из индексов, используемых для оценки специфических признаков состояния формирующегося фитоценоза, представляет интерес индекс стресса влажности (MSI – moisture stress index), характеризующий содержание влаги в листьях растений. Экстремальные (менее 0,3 или более 3) значения индекса используются в качестве индикатора угнетения растительности, связанного с недостатком или переизбытком влаги, а наиболее благоприятным условиям вегетации отвечают значения от 0,3 до 2 [16]. Так, исследование по спутниковым данным фитоценоза, формируемого на ограждающей дамбе складированных отходов обогащения бадделеит-апатит-магнетитовых руд, показало значимую (более 20%), но остающуюся в пределах благоприятных условий вегетации, вариацию индекса стресса влажности растительного покрова нижних ярусов дамбы [15].

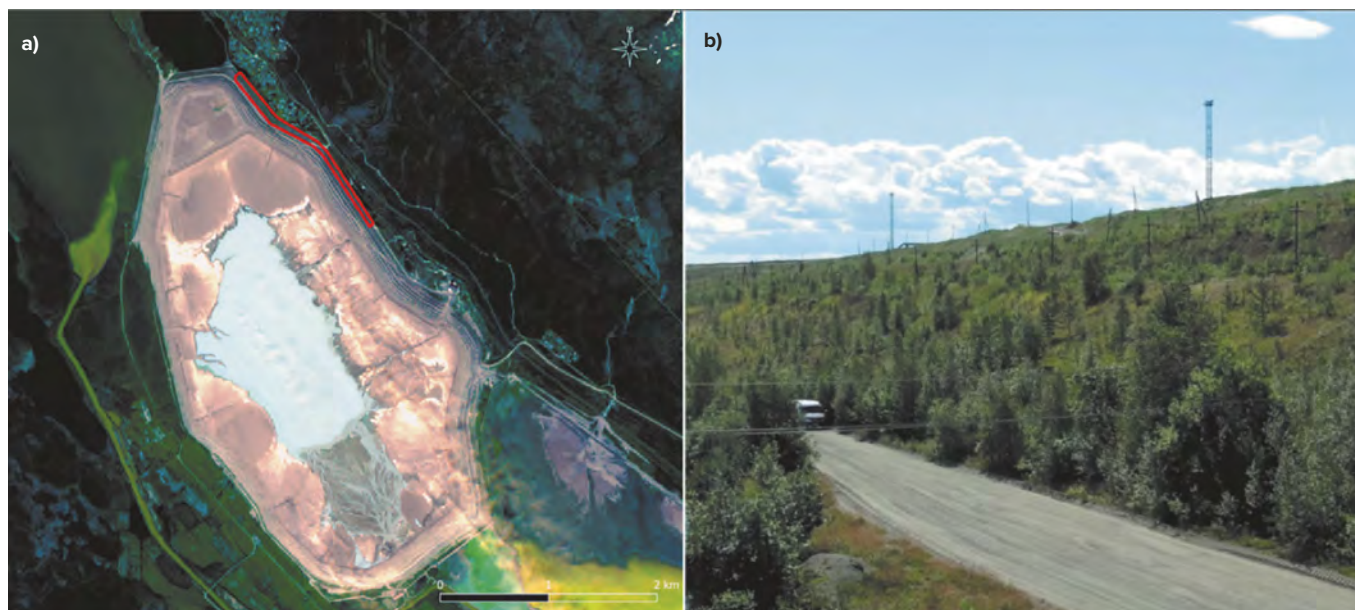
## Цель исследований

Обоснование использования спутниковых данных для мониторинга экологического состояния нарушенных земель горной отрасли с целью принятия обоснованных решений по восстановлению целостности природных ландшафтов.

## Характеристика объекта исследований

Тестовым объектом были определены складированные отходы рудообогатления, характеризующиеся наибольшим проявлением факторов, лимитирующих самозарастание (мелкодисперсность и бесструктурность субстрата, полное отсутствие органического вещества и элементов питания растений, низкая влагоемкость, подверженность ветровой и водной эрозии). В статье представлены данные по действующему хвостохранилищу, куда складированы отходы обогащения Хибинской группы месторождений апатит-содержащих руд, максимальная высота ограждающей дамбы на конечной отметке заполнения 200,0 м составит 89,4 м. Мониторинговый полигон находится на ограждающей дамбе северо-восточной экспозиции, где в течение 40 лет проводятся исследования сукцессии сеяного без нанесения плодородного слоя злакового фитоценоза. Характерные размеры полигона: длина составляет 1835 м, ширина бермы ~15 м, высота ~30 м (сдвоенные откосы) (рис. 1).

Работы по закреплению откосов ограждающей дамбы складированных отходов обогащения апатитсодержащих



**Рис. 1**  
а) – Спутниковое изображение складированных отходов обогащения Хибинской группы месторождений апатитосодержащих руд, выделен мониторинговый полигон на ограждающей дамбе;  
б) – Формирование фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта в ходе лесной стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза на мониторинговом полигоне

**Fig. 1**  
a) – A satellite image of the dumped processing wastes at the Khibiny group of apatite-containing ore deposits, the monitored dump at the bund wall is indicated;  
b) – Formation of a plant community with the structure of the surrounding natural landscape during the forest stage of vegetational change of the introduced gramineous community at the monitored dump site

руд с целью пылеподавления созданием растительного покрова без нанесения плодородного слоя стартовали в начале 1980-х годов, что определяет точку отсчета временного ряда оценки фотосинтезирующей активности формирующегося фитоценоза по данным спутниковых наблюдений.

В соответствии с разработанной в Горном институте технологией многолетние злаки высеваются совместно с одолетней покровной культурой, обеспечивающей поступление большого количества растительных остатков для создания биологически активной среды с первого года. После посева мелкокапельным нанесением водной полимерной эмульсии создается полимерное покрытие, сразу же обеспечивающее прекращение ветровой и водной эрозии складированных отходов рудообогатления и улучшение экологического фона корнеобитаемых горизонтов [4].

#### Данные спутниковых наблюдений и их обработка

Для изучения динамики сукцессии сеяного злакового фитоценоза на ограждающей дамбе использовались мультиспектральные снимки Landsat, выполненные в 1984–2020 гг. в середине вегетационного периода (июль-август). Разрешение снимков в горизонтальной плоскости составляет ~30 м. Источник спутниковых данных – архив Национального космического агентства США (NASA)<sup>1</sup>.

Исследование динамики сукцессии сеяного злакового фитоценоза проводилось по вегетационному индексу и индексу стресса влажности. Каждый пиксел спутникового изображения полигона рассматривался как мониторинговая площадка с индивидуальной спектральной характеристикой. Расстояние между центрами соседних мониторинговых площадок составляет в плане ~30 м. На спутниковом изображении мониторинговый полигон представлен 108 площадками, для каждой из которых рас-

считывались значения индексов по соотношению интенсивности спектральных каналов в диапазонах длин волн 0,63–0,69 мкм (канал B3), 0,76–0,90 мкм (канал B4), 1,55–1,75 мкм (канал B5) по следующим соотношениям:  $NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$ ,  $MSI = B5 / B4$ , затем полученные значения индексов усреднялись по полигону. Относительная погрешность определения индексов не превышала 10%.

Обработка спутниковых данных, статистические расчеты проводились с использованием программы Erdas Imagine и некоммерческого программного обеспечения: геоинформационной системы QGIS и программной среды R<sup>2</sup>.

#### Результаты и их обсуждение

Временной ряд вегетационного индекса растительного покрова на мониторинговом полигоне и его характеристика на основании геоботанического описания в ходе наземных исследований приведены на рис. 2 и 3. Варьирование значений NDVI в пределах исследуемого временного ряда связано, в первую очередь, с изменением видового состава растительного покрова в ходе сукцессии сеяного злакового фитоценоза и определяется доминированием в нем растений различных жизненных форм (рис. 3).

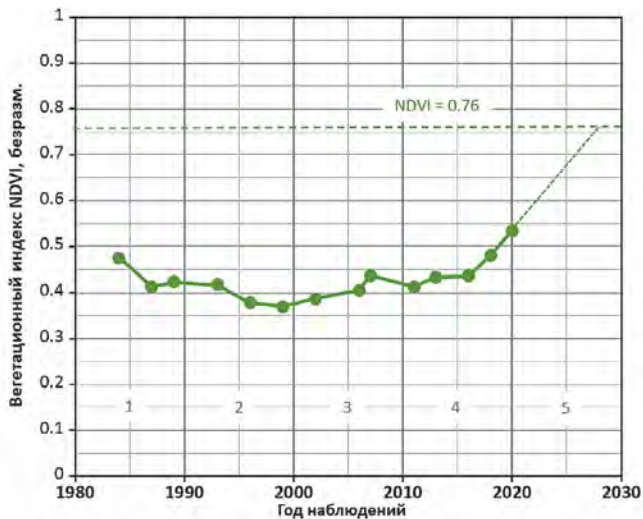
Анализ данных многолетнего мониторинга состояния сеяного фитоценоза на основе геоботанических описаний показал, что сукцессия инициируется в начале второго десятилетия преимущественно опушечно-луговым многолетним разнотравьем. В течение первых 20 лет доминирующее положение принадлежит сеяным злаковым видам, образующим сообщество, характеризующееся сомкнутостью травостоя и устойчивой дерниной.

Со временем эдификаторная роль доминантов ослабляется – снижается ежегодная продукция, уменьшается ко-

<sup>1</sup> NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov> (Accessed: 20.09.2020).

<sup>2</sup> QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System, Software Version 3.16.0. Open Source Geospatial Foundation Project. Available at: <http://qgis.osgeo.org> (Accessed: 06.07.2020); R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. Available at: <http://www.R-project.org> (Accessed: 20.09.2020).





Обозначения:  
 1 – первое десятилетие существования сеяного фитоценоза;  
 2 – луговая стадия сукцессии сеяного фитоценоза, подселение опушечных злаковых;  
 3, 4 – переход от луговой к лесной стадии сукцессии, формирование ярусной структуры;  
 5 – лесная стадия сукцессии

Legend:  
 1 – first decade of the plant community existence;  
 2 – meadow stage of the introduced plant community vegetational change, resettlement of woodside grasses;  
 3, 4 – transition from meadow to the forest stage of the vegetational change, formation of the tier structure;  
 5 – the forest stage in the vegetational change

**Рис. 2**  
 Временной ряд вегетационного индекса (NDVI), характеризующий сукцессию сеяного злакового фитоценоза на мониторинговом полигоне (вегетационный индекс природного ландшафта 0,76)

**Fig. 2**  
 Time series of the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), which characterizes the vegetational change of the gramineous plant community in the monitoring area (vegetation index of the plant community in the adjacent natural environment is 0.76)

личество годового спада, происходит затухание дернового процесса, и создаются условия для конкуренции видов. В этот период содоминантами сеяных трав, кроме лугового разнотравья, становятся мхи. Первыми поселившимися мхами были эпилитные и эпигейные ксеромезофиты – виды преимущественно открытых сухих местообитаний. Наблюдается формирование ярусной структуры.

Активное подселение древесно-кустарниковых видов – последовательный этап восстановительной сукцессии, конечной целью которой является формирование фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта. В четвертом десятилетии увеличивается видовое разнообразие и встречаемость древесных видов. Сообщество развивается в направлении образования мелколиственного древостоя с участием хвойных в соответствии со струк-

турой растительного покрова окружающего ландшафта.

В целом, геоботаническое исследование лесной стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза на мониторинговом полигоне ограждающей дамбы складированных отходов рудообогатения показало, что во второй половине четвертого десятилетия зафиксировано 89 видов из 38 семейств, представленных в основном видами лесного массива предгорий Хибин и фитоценоза вдоль транспортных магистралей.

При переходе от луговой к лесной стадии сукцессии наблюдается увеличение вегетационного индекса. Формирование фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта характеризуется возрастанием вегетационного индекса. Так, в конце четвертого десятилетия проявляется тенденция его значительного увеличения, что



Обозначения:  
 0 – до создания сеяного фитоценоза; 1 – первое десятилетие существования сеяного фитоценоза; 2 – луговая стадия сукцессии сеяного фитоценоза, подселение опушечных злаковых; 3, 4 – переход от луговой к лесной стадии сукцессии, формирование ярусной структуры; 5 – лесная стадия сукцессии

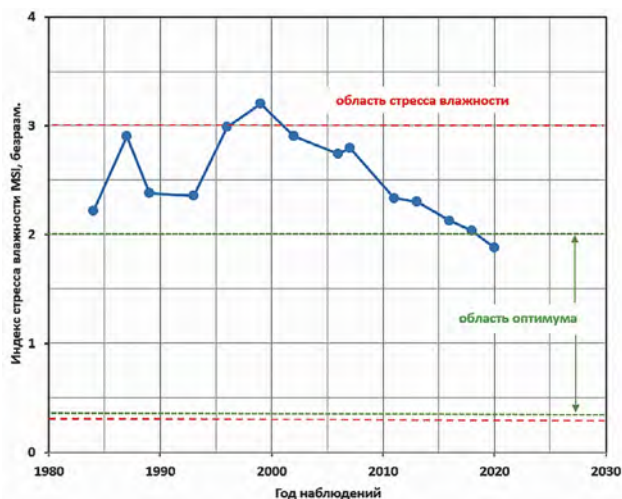
Legend:  
 0 – before the introduced plant community; 1 – first decade of the introduced plant community existence; 2 – meadow stage of the plant community vegetational change, resettlement of woodside grasses; 3, 4 – transition from meadow to the forest stage of the vegetational change, formation of the tier structure; 5 – the forest stage in the vegetational change

**Рис. 3**  
 Этапы сукцессии сеяного злакового фитоценоза при восстановлении нарушенных земель горнодобывающей отрасли в соответствии с принципом самоорганизации природных систем созданием биологически активной среды (складированные отходы рудообогатения)

**Fig. 3**  
 Stages in the vegetational change of the introduced gramineous community during rehabilitation of the lands disturbed by mining operations in accordance with the self-organizing principle of natural systems through creation of a biologically active environment (dumped ore process wastes)

позволяет прогнозировать выход индекса на значение, характерное для окружающей природной среды (рис. 2).

Сложный характер временного ряда индекса стресса влажности, характеризующего содержание влаги в листьях растений, кроме флуктуации климатических характеристик, также определяется изменением видового состава в ходе сукцессии сеяного злакового фитоценоза, хотя на протяжении практически всего мониторинга вариация индекса находится ниже области стресса влажности, характеризующейся значениями  $> 3$  (рис. 4).



**Рис. 4**  
Временной ряд индекса стресса влажности (MSI) растительного покрова

**Fig. 4**  
Time series of the Moisture Stress Index (MSI) of vegetation cover at the monitored dump of ore process waste

На лесной стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза, характеризующейся формированием фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта, временной ряд индекса стресса влажности стремится к оптимуму (рис. 4).

В целом, формирование фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта в ходе сукцессии сеяного злакового фитоценоза характеризуется уменьшением значений индекса стресса влажности и его выходом в область оптимума, что соответствует возрастающему вегетационному индексу и свидетельствует о формировании благоприятных условий вегетации.

Таким образом, анализ наземных и спутниковых данных, полученных в ходе мониторинга, свидетельствует о влиянии фитоценологических факторов на динамику восстановления нарушенных земель в соответствии с принципом самоорганизации природных экосистем созданием биологически активной среды и позволяет прогнозировать динамику восстановления природных экосистем.

### Выводы

Исследование эволюции системы «горная порода – биота» в конкретных климатических условиях с нулевого момента показало, что образование биологически активной среды в результате создания сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя под полимерным покрытием обеспечивает увеличение энергетического потенциала системообразующей функции биоты, что значительно увеличивает скорость формирования фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта в ходе сукцессии сеяного фитоценоза. Анализ временного ряда вегетационного индекса, характеризующего динамику восстановления нарушенных земель горной отрасли по спутниковым данным, позволяет прогнозировать динамику восстановления природных экосистем. Создание на первом этапе сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя решает задачу закрепления поверхности складированных отходов рудообогатления с целью прекращения ветровой и водной эрозии, повышения устойчивости гидротехнического сооружения, улучшения экологического состояния территории и, в конечном счете, восстановления природных экосистем.

### Список литературы

1. Горшков В.Г., Макарьева А.М., Лосев К.С. В повестке дня – стратегия выживания человечества. *Вестник Российской академии наук*. 2006;76(4):309–314. Режим доступа: <https://www.bioticregulation.ru/common/pdf/vestn06-ru.pdf>
2. Ковда В.А. *Проблемы защиты почвенного покрова и биосферы планеты*. Пушино; 1989. 155 с.
3. Mel'nikov N.N., Mesyats S.P., Volkova E.Yu. Methodological approach to restoration of ecosystem functions in the industrial lands. *Journal of Mining Science*. 2016;52(2):410–416. DOI: 10.1134/S1062739116020586
4. Месяц С.П., Новожилова М.Ю., Румянцева Н.С., Волкова Е.Ю. Научное обоснование восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов. *Горный журнал*. 2019;(6):77–83. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.11.
5. Bondur V.G., Vorobeve V.E. Satellite monitoring of impact Arctic Regions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015;51(9):949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054.
6. Месяц С.П., Остапенко С.П. Перспектива использования данных спутниковых наблюдений для мониторинга воздействия складированных отходов горного производства на природную среду. *Горный журнал*. 2019;(6):72–76. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.10.
7. Месяц С.П., Остапенко С.П. Оценка воздействия горнопромышленного комплекса Мурманской области на состояние растительного покрова по данным спутниковых наблюдений. *Горная промышленность*. 2019;(6):112–116. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-6-148-112-116.
8. Steiniger S., Hay G.J. Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics*. 2009;4(4):183–195. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2009.07.004.
9. Bai Y.Q., Di L.P. Review of geospatial data systems' support of global change studies. *British Journal of Environment & Climate Change*. 2012;2(4):421–436. DOI: 10.9734/BJECC/2012/2726.
10. Lausch A., Schmidt A., Tischendorf L. Data mining and linked open data – New perspectives for data analysis in environmental research. *Ecological Modelling*. 2014;295:5–17. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.018.
11. Zhao P., Foerster T., Yue P. The Geoprocessing Web. *Computers & Geosciences*. 2012;47:3–12. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.04.021.
12. Yang C., Raskin R., Goodchild M., Gahegan M. Geospatial Cyberinfrastructure: Past, present, and future. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2010;34(4):264–277. DOI: 10.1016/j.compenvurbysys.2010.04.001.



13. Райкунов Г.Г. (ред.) *Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании*. М.: Физматлит; 2014. 136 с.
14. 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*. Springer; 2016. 110 p. DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8.
15. Месяц С.П., Остапенко С.П. Методический подход к мониторингу восстановления нарушенных земель горнопромышленной отрасли по данным спутниковых наблюдений. *Горная промышленность*. 2018;(6):22–25. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-6-142-72-75.
16. Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 1987;22:429–435. Available at: [https://hrsl.ba.ars.usda.gov/ERHunt/hunt\\_rse1987.pdf](https://hrsl.ba.ars.usda.gov/ERHunt/hunt_rse1987.pdf)

### References

- Gorshkov V.G., Makar'eva A.M., Losev K.S. A strategy for the survival of humanity is on the agenda. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2006;76(2):139–143. DOI: 10.1134/S1019331606020055.
- Kovda V.A. *Problems of vegetation cover and planet biosphere protection*. Pushchino; 1989. 155 p. (In Russ.)
- Mel'nikov N.N., Mesyats S.P., Volkova E.Yu. Methodological approach to restoration of ecosystem functions in the industrial lands. *Journal of Mining Science*. 2016;52(2):410–416. DOI: 10.1134/S1062739116020586
- Mesyats S.P., Novozhilova M.Yu., Rumyantseva N.S., Volkova E.Yu. Scientific substantiation of the natural ecosystems restoration disturbed during the development of georesources. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):77–83. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2019.06.11.
- Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite monitoring of impact Arctic Regions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015;51(9):949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054.
- Mesyats S.P., Ostapenko S.P. The prospect of using satellite data to monitor the impact of mining waste on environment. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):72–76. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2019.06.10.
- Mesyats S.P., Ostapenko S.P. Assessment of impact from mining sector of Murmansk region on condition of vegetation cover using satellite observations. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2019;(6):112–116. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2019-6-148-112-116.
- Steiniger S., Hay G.J. Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics*. 2009;4(4):183–195. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2009.07.004.
- Bai Y.Q., Di L.P. Review of geospatial data systems' support of global change studies. *British Journal of Environment & Climate Change*. 2012;2(4):421–436. DOI: 10.9734/BJECC/2012/2726.
- Lausch A., Schmidt A., Tischendorf L. Data mining and linked open data – New perspectives for data analysis in environmental research. *Ecological Modelling*. 2014;295:5–17. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.018.
- Zhao P., Foerster T., Yue P. The Geoprocessing Web. *Computers & Geosciences*. 2012;47:3–12. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.04.021.
- Yang C., Raskin R., Goodchild M., Gahegan M. Geospatial Cyberinfrastructure: Past, present, and future. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2010;34(4):264–277. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.04.001.
- Raikunov G.G. (ed.) *Hyperspectral remote sensing in geological mapping*. Moscow: Fizmatlit; 2014. 136 p. (In Russ.)
- 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*. Springer; 2016. 110 p. DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8.
- 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 = Russian Mining Industry*. 2018;(6):22–25. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2018-6-142-72-75.
- Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 1987;22:429–435. Available at: [https://hrsl.ba.ars.usda.gov/ERHunt/hunt\\_rse1987.pdf](https://hrsl.ba.ars.usda.gov/ERHunt/hunt_rse1987.pdf)

#### Информация об авторе

**Месяц Светлана Петровна** – ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

**Остапенко Сергей Павлович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.ostapenko@ksc.ru

#### Information about the author

**Svetlana P. Mesyats** – Leading Researcher, Head of Laboratory, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

**Sergey P. Ostapenko** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: s.ostapenko@ksc.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.11.2020

Поступила после рецензирования: 23.11.2020

Принята к публикации: 01.12.2020

#### Article info:

Received: 12.11.2020

Revised: 23.11.2020

Accepted: 01.12.2020