

Комплексный мониторинг динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, как основа информационной системы поддержки принятия решений

С.П. Месяц✉, А.А. Петров

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

Резюме: Большие площади нарушенных земель горной отрасли определяют актуальность интегральной оценки динамики восстановления природных экосистем на основе наземных и спутниковых данных. В Горном институте КНЦ РАН обоснована методология и разработана технология восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, в соответствии с принципом их самоорганизации. Образование биологически активной среды в результате создания сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя для увеличения энергетического потенциала системообразующей функции биоты приводит к значительно более быстрому, чем при самозарастании, формированию фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта.

Формирование информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, осуществляется на основе данных комплексного мониторинга: 1 – состояния нарушенных земель; 2 – ресурсного потенциала самовосстановления; 3 – наземного изучения генетических параметров и функциональных показателей почв, образующихся в ходе эволюции системы «горная порода – биота» при восстановлении природных экосистем в соответствии с принципом их самоорганизации созданием биологически активной среды; 4 – геоботанического описания лесной стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза, которая характеризуется формированием фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта; 5 – спутниковых данных, характеризующих вещественный состав горной породы, вегетационный индекс и индекс стресса влажности формирующегося фитоценоза. Анализ данных комплексного мониторинга, включающего геоботаническое описание формирующегося фитоценоза и временные ряды спутниковых данных вегетационного индекса, дает возможность прогнозировать динамику восстановления природных экосистем в соответствии с принципом их самоорганизации созданием биологически активной среды для повышения энергетического потенциала системообразующей функции биоты.

Ключевые слова: нарушенные земли горной отрасли, восстановление природных экосистем, данные наземных наблюдений, данные спутниковых наблюдений, геоинформационные технологии

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания №FMEZ-2022-0006 «Развитие методологии экоинвестиционного подхода к восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов».

Для цитирования: Месяц С.П., Петров А.А. Комплексный мониторинг динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, как основа информационной системы поддержки принятия решений. *Горная промышленность*. 2023;(2):106–111. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-106-111>

Integrated monitoring as the basis of an information system to support decision-making on the restoration of natural ecosystems disturbed during the development of georesources

S.P. Mesyats✉, A.A. Petrov

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

Abstract: The permanent increase in monitoring data determines the relevance of integral assessment of the dynamics of ecological restoration by means of geoinformation design. The Mining Institute KSC RAS has justified the methodology and developed a technology to restore natural ecosystems disturbed during the development of georesources, in accordance with the principle of their self-organization. The increase of the energy potential of the system-forming function of biota results in a much faster remediation of natural ecosystems, as compared to self-growing.

The information system includes data on: (1) the state of disturbed lands; (2) the resource potential for self-recovery; (3) the surface study of genetic parameters and functional indexes of soils forming due to “rock – biota” system evolution, during the formation of sown cereal phytocenosis without applying a topsoil layer; (4) the geobotanical description of the forest succession

stage of sown cereal phytocenosis, characterizing the formation of phytocenosis with the structure of the surrounding natural landscape; (5) the satellite data to study the dynamics of natural ecosystems restoration based on the vegetation index of the forming phytocenosis.

Analysis of geobotanical description of the forming phytocenosis and time series of satellite data makes it possible to predict the dynamics of ecological restoration.

Keywords: disturbed lands of the mining industry, ecological restoration, ground-based data, satellite observation data

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the State Contract No. FMEZ-2022-0006 «Development of a methodology for an eco-investment approach to restoration of natural ecosystems disturbed by the development of georesources».

For citation: Mesyats S.P., Petrov A.A. Integrated monitoring as the basis of an information system to support decision-making on the restoration of natural ecosystems disturbed during the development of georesources. *Russian Mining Industry*. 2023;(2): 106–111. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-106-111>

Введение

Актуальность проблемы сохранения устойчивого состояния биосферы перманентно возрастает на фоне роста производства и потребления георесурсов, что выводит на первое место необходимость восстановления природных экосистем в свете современного знания их роли в обеспечении устойчивого развития цивилизации [1; 2]. Состояние природных экосистем определяет экологическую емкость территории, характеризуемую биопродуктивностью каждого конкретного типа экосистемы, что, в свою очередь, определяет основной целью восстановления нарушенных земель горной отрасли – восстановление экологической целостности природных ландшафтов – «ecological restoration» [3; 4].

В Горном институте Кольского научного центра РАН обоснована методология и разработана технология восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, в соответствии с принципом их самоорганизации в рамках эволюции «горная порода – биота». Увеличение энергетического потенциала системообразующей функции биоты достигается созданием сеяного злакового фитоценоза без нанесения плодородного слоя для образования биологически активной среды, обеспечивающей более быстрое, чем при самозарастании, формирование фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта. Реализация технологии на различных объектах в разных климатических зонах подтвердила эффективность и целесообразность предлагаемого решения восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов [5].

Объект исследований

Исследования динамики восстановления природных экосистем при реализации разработанной в Горном институте Кольского научного центра РАН технологии восстановления нарушенных земель в рамках эволюции «горная порода – биота» созданием биологически активной среды проводятся в течение 40 лет в соответствии с системой мониторинга, предусматривающей комплексное и одновременное изучение генетических параметров и функциональных показателей формирующихся почв, а также биопродуктивности формирующегося фитоценоза методами, принятыми в минералогии, геохимии, грунтоведении, почвоведении, экологии, лесоведении, геоботанике [6].

Тестовым объектом исследований определены складированные отходы рудообогащения, характеризующиеся наибольшим проявлением факторов, лимитирующих самозарастание: мелкодисперсность и бесструктурность субстрата, полное отсутствие органического вещества и

элементов питания растений, низкая влагоемкость, сильные проявления ветровой и водной эрозии.

Создание биологически активной среды для увеличения энергетического потенциала системообразующей функции биоты приводит к значительно более быстрому, чем при самозарастании, формированию фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта (рис. 1).



Рис. 1
Восстановление природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, в соответствии с принципом их самоорганизации созданием биологически активной среды

Fig. 1
Restoration of natural ecosystems disturbed by the development of georesources based on the principle of their self-organization through creation of a biologically active environment

Концептуальный подход

Развитие информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению нарушенных при освоении георесурсов природных экосистем в соответствии с принципом их самоорганизации на базе комплексного мониторинга предусматривает интеграцию наземных и спутниковых данных с применением программных средств ГИС для сбора, ввода, обработки, хранения, анализа и представления информации (рис. 2).

База данных комплексного мониторинга динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, включает следующие данные:

- состояние нарушенных земель;
- ресурсный потенциал самовосстановления;
- генетические параметры и функциональные показатели почв, образующихся в ходе эволюции системы «горная порода – биота» при восстановлении природных систем в соответствии с принципом их самоорганизации создания биологически активной среды;
- геоботаническое описание лесной стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза, характеризующейся формированием фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта;
- спутниковые данные, дающие возможность исследования динамики восстановления природных экосистем на основе вегетационного индекса и индекса стресса влажности формирующегося фитоценоза.

Преимуществами спутниковых наблюдений земной по-

верхности являются перманентная съемка, широта охвата территории, большая информативность за счет мультиспектральной съемки, дающей возможность комбинации каналов, наличие архивов наблюдений, свободный доступ и оперативная публикация данных [7; 8].

Комбинированные спутниковые изображения обеспечивают выбор спектральных каналов, обусловленный параметрами взаимодействия солнечной радиации с подстилающей поверхностью исследуемых объектов [9].

Спутниковые данные характеризуют вещественный состав горной породы, одного из компонентов системы «горная порода – биота». Одним из параметров, широко используемых для оценки состояния биоты по спутниковым данным, является вегетационный индекс (NDVI – normalized difference vegetation index), нормированная разность в интенсивности красного и ближнего инфракрасного каналов спутникового изображения [10; 11].

Из индексов, используемых для оценки специфических признаков состояния природных экосистем, 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 [12].

База данных комплексного мониторинга динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при ос-

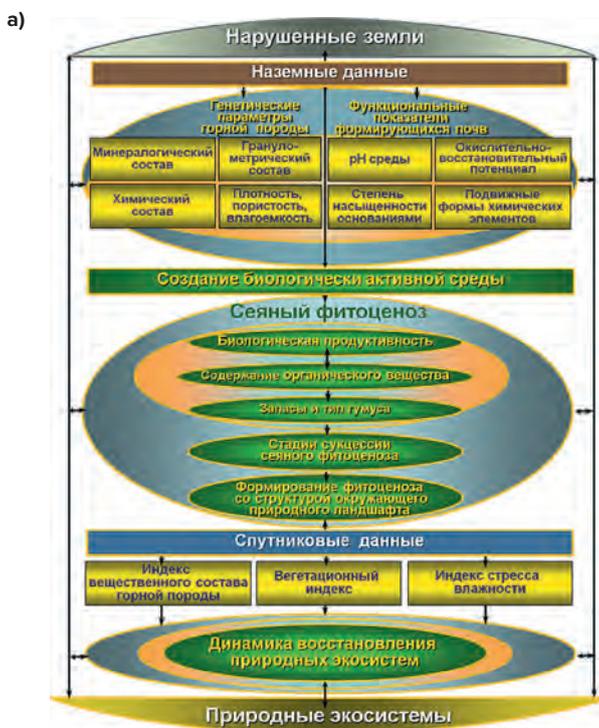


Рис. 2
Развитие информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, на примере Кольского горнопромышленного комплекса: а – структура мониторинга динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, на основе наземных и спутниковых данных; б – информационная система поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем

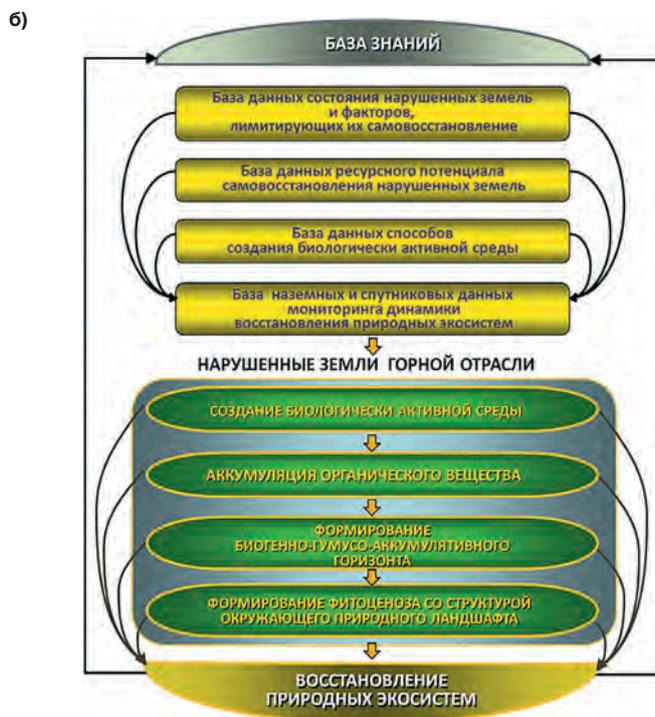


Fig. 2
Development of an information system to support decision-making on restoration of natural ecosystems disturbed by the development of georesources, as exemplified by the Kola Mining Complex: а – structure of monitoring the dynamics of restoration of natural ecosystems disturbed by the development of georesources, based on the ground and satellite data; б – information system to support decision-making on the restoration of natural ecosystems

воени георесурсов, включает разнородную информацию (числовые данные, пространственно-индексированные числовые данные, текстовые данные, геоизображения), и, следовательно, в составе информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем должны быть реализованы программные модули, обеспечивающие ввод, обработку, хранение и отображение данных разного типа. Ввиду сложности изучаемого объекта интеграция неоднородных данных должна осуществляться в информационной системе открытого типа, позволяющей включать в нее произвольные данные на основе стандартной системы интерфейсов.

Информационный ресурс Системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем формируется на базе выделенного WEB-сервера, отслеживающего запросы пользователей на получение данных того или иного типа. В случае поступления запроса сервер может обращаться к специализированным программам, таким как геоинформационная система, система управления базами данных (СУБД), для выполнения запроса. Стандартизация представления данных, выдаваемых специализированными программами, могут осуществлять промежуточные программные модули, как интерфейсы информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем. Формирование ресурса осуществляется на основе WEB-страниц, представляющих статистические данные, текущие фактические значения параметров исследуемых объектов, результаты статистической и аналитической обработки данных мониторинга, прогностические расчеты, графики.

Структура данных Информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем должна быть максимально простой и понятной пользователям, что позволит конструировать различные объектные модели исследуемых процессов. Наилучшим образом этим требованиям отвечают схемы данных размерной модели («снежинка» или «звезда»). Отличием структуры данных для этих схем является выделение из общего объема в единую таблицу собственно анализируемых данных (или фактов) и создание нескольких связанных с основной таблицей, содержащих вспомогательные данные (называемые измерениями или размерностями). По этой схеме проектировались базы данных комплексного мониторинга динамики восстановления природных экосистем. Штатным средством, используемым для формирования сложных аналитических запросов к базам данных в структуре информационной системы, определен язык SQL.

В структуру информационной системы интегрирован программный модуль автоматизированного выбора способов восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, на основе анализа содержимого баз данных состояния нарушенных земель и способов создания биологически активной среды в области их пересечения по факторам, лимитирующим процессы самовосстановления природных экосистем. Обратные связи в соответствии с принципом самоорганизации природных экосистем обеспечиваются данными мониторинга с корректировкой способов создания биологически активной среды, в случае необходимости, посредством интерактивного редактирования данных информационной системы.

Геоизображения – наиболее компактная форма представления пространственно-распределенных объектов.

Для проведения различного вида анализа пространственно-распределенных данных предпочтительно использовать соответствующее представление геоизображений – растровое, векторное или триангуляционное. Современные ГИС поддерживают перевод (экспорт) геоданных из одного представления в другое, что позволяет использовать один набор данных для комплексного анализа разными программными средствами ГИС.

Атрибутивные характеристики индексируются пространственно-распределенными данными так, что каждому объекту (метке, ячейке, точке, линии, полигону, узлу) может быть поставлен в соответствие набор данных об этом объекте. В этом случае становится возможным пространственный анализ распределения атрибутивных параметров геометрических объектов, реализуемый средствами ГИС.

В информационную систему поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, включены следующие виды геоизображений:

- предприятия Кольского горнопромышленного комплекса (ГПК) (составные слои пространственных данных со встроенными таблицами атрибутивных параметров исследуемых объектов);
- тематические карты (пространственные данные): геологическая карта, категории загрязнения верхнего слоя почв, превышение критических нагрузок серы, биоклиматический потенциал, годовые осадки, осадки за вегетационный период, биоклиматический индекс, геохимический потенциал самоочищения;
- иллюстрации (растровые данные без пространственной привязки): сырьевая база Кольского ГПК, охраняемые территории, схема водосборных бассейнов;
- мультиспектральные космоснимки высокого разрешения исследуемой территории Кольского ГПК.

Знания в области восстановления природных экосистем являются важным, если не решающим, информационным ресурсом. Хранение, представление знаний и интеграция их в информационную систему поддержки принятия решений является сложной задачей, что связано как с меньшей развитостью процедур создания баз знаний, по сравнению с процедурами создания баз данных, так и тем, что эта область знаний трудно формализуема в достаточной для ее кодирования степени.

Оптимальным вариантом интеграции баз данных с базой знаний является использование специализированных модулей в рабочей среде ГИС или СУБД. В этом случае достигается экономия времени на разработку программных средств, высокая степень функциональности модуля, простота его использования. В состав полнофункциональных ГИС входят программные модули, обеспечивающие обработку данных на основе продукционной модели представления знаний.

ГИС GRASS свободно распространяется с открытым исходным кодом, нетребовательна к аппаратным ресурсам компьютера и используется для моделирования экологических процессов. Разработанные для GRASS модели анализа геоданных распространяются через Интернет в виде программных модулей. Эта возможность используется для интеграции базы знаний с данными комплексного мониторинга, что отвечает цели создания информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем.

На основе классификационных правил средствами ГИС GRASS выполнено районирование территории Кольского полуострова по ресурсному потенциалу самовосстановления природных экосистем, путем обработки тематических карт биоклиматического потенциала и суммарного показателя загрязнения почв тяжелыми металлами, созданных в ходе проведенных исследований, и опубликованных карт биогенности почв, ландшафтно-геохимического потенциала самоочищения геосистем, превышения критических нагрузок серы для почв. Созданные картографические материалы интегрированы в информационную систему поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов [13].

Заключение

Таким образом, комплексный мониторинг динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, предусматривающий интеграцию наземных и спутниковых данных программными средствами ГИС, является основой информационной системы поддержки принятия решений по их восстановлению.

Для анализа пространственно-распределенных данных в структуру информационной системы интегрирована электронная карта Кольского полуострова с атрибутивными характеристиками и растровыми изображениями исследуемых объектов.

Средствами GIS GRASS на основе тематических карт ин-

формационной системы выполнено районирование территории Кольского полуострова по ресурсному потенциалу самовосстановления природных экосистем.

С применением программных модулей GIS GRASS, обеспечивающих обработку данных на основе продукционной модели представления знаний, в структуре информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению природных экосистем выполнена интеграция базы знаний с данными комплексного мониторинга динамики их восстановления.

Анализ данных комплексного мониторинга, включающего геоботаническое описание формирующегося со структурой окружающего природного ландшафта фитоценоза и временные ряды спутниковых данных вегетационного индекса, дает возможность прогнозировать динамику восстановления природных экосистем в соответствии с принципом их самоорганизации созданием биологически активной среды для повышения энергетического потенциала системообразующей функции биоты.

На следующем этапе в рамках комплексного мониторинга динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, интегрирующего данные спутниковых и наземных наблюдений, представляет интерес выявить наиболее значимые параметры мониторинга для развития информационной системы поддержки принятия решений по восстановлению 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.
2. Надточий Ю.В. Экологическая безопасность как объект экологических преступлений. Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2018;(1-2):96–100.
3. van Andel J., Aronson J. Restoration ecology the new frontier. Blackwell Publishing Ltd.; 2012. 403 p.
4. Martin D.M. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. Restoration Ecology. 2017;25(5):668–673. <https://doi.org/10.1111/rec.12554>
5. Melnikov 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. <https://doi.org/10.1134/S1062739116020586>
6. Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы: справочник: минералогические, органические и неорганические методы анализа: пер. с англ. СПб.: Профессия; 2014. 800 с.
7. Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite monitoring of impact Arctic Regions. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015;51(9):949–968. <https://doi.org/10.1134/S0001433815090054>
8. 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. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.10>
9. Райкунов Г.Г. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2014. 136 с.
10. Komeil R., Tajul A.M. Normalized difference vegetation change index: A technique for detecting vegetation changes using Landsat imagery. Catena. 2019;178:59–63. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.007>
11. Li Hengkai, Xu Feng, Li Qin. Remote sensing monitoring of land damage and restoration in rare earth mining areas in 6 counties in southern Jiangxi based on multisource sequential images. Journal of Environmental Management. 2020;267:110653. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110653>
12. 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
13. Месяц С.П., Петров А.А. Развитие информационного обеспечения восстановления нарушенных земель техногенных ландшафтов в соответствии с принципом самоорганизации природных экосистем. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017;(S23):554–563. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-554-563>

References

1. 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. <https://doi.org/10.1134/S1019331606020055>
2. Nadtochiy J.V. Environmental safety as an object of environmental crimes. Pacific Rim: Economics, Politics, Law. 2018;(1-2):96–100. (In Russ.)
3. van Andel J., Aronson J. Restoration ecology the new frontier. Blackwell Publishing Ltd.; 2012. 403 p.
4. Martin D.M. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. Restoration Ecology. 2017;25(5):668–673. <https://doi.org/10.1111/rec.12554>
5. Melnikov 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. <https://doi.org/10.1134/S1062739116020586>
6. Pansyou M., Gauterou J. Soil Analysis. Handbook. Mineralogical, organic and inorganic methods of analysis. St. Petersburg: Profession; 2014. 800 p. (In Russ.)
7. Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite monitoring of impact Arctic Regions. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015;51(9):949–968. <https://doi.org/10.1134/S0001433815090054>
8. 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.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.10>
9. Raikunov G.G. Hyperspectral remote sensing in geological mapping. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 136 p. (In Russ.)
10. Komeil R., Tajul A.M. Normalized difference vegetation change index: A technique for detecting vegetation changes using Landsat imagery. Catena. 2019;178:59–63. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.007>
11. Li Hengkai, Xu Feng, Li Qin. Remote sensing monitoring of land damage and restoration in rare earth mining areas in 6 counties in southern Jiangxi based on multisource sequential images. Journal of Environmental Management. 2020;267:110653. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110653>
12. 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
13. Mesyats S.P., Petrov A.A. Development of information support for the restoration of disturbed lands of mining landscapes in accordance with the principle of self-organization of natural ecosystems. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2017;(S23):554–563. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-554-563>

Информация об авторах

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

Петров Алексей Александрович – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.ostapenko@ksc.ru

Information about the authors

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

Aleksey A. Petrov – Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; e-mail: s.ostapenko@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.03.2023

Поступила после рецензирования: 04.04.2023

Принята к публикации: 07.04.2023

Article info

Received: 18.03.2023

Revised: 04.04.2023

Accepted: 07.04.2023