

# Исследование динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, по данным спутниковых наблюдений

С.П. Остапенко, С.П. Месяц✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ s.mesyats@ksc.ru

**Резюме:** В рамках экоинвестиционного подхода выявлены факторы динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, для поддержки принятия решений по экологизации горного производства в арктических условиях. Разработан методический подход к изучению динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, по спутниковым снимкам среднего разрешения с использованием нечеткой нейросетевой модели взаимосвязи факторов восстановления по данным мониторинга фитоценоза, формирующегося на основе сеяного злакового фитоценоза на ограждающей дамбе действующего хвостохранилища переработки руд Хибинской группы месторождений, за период с 2000 по 2023 г. Разработан алгоритм четырехкратного улучшения пространственного разрешения дистанционной оценки температуры поверхности мониторинговых полигонов по тепловым спутниковым снимкам MODIS обратным расчетом радиояркостной температуры с учетом различия коэффициента излучения их поверхности, обусловленного растительным покровом, и минимизацией невязки наблюдаемых и прогнозных значений температурного поля. Установлено, что определяющими факторами восстановления природных экосистем являются минимальная температура поверхности и влагообеспеченность. Выявлено пространственное распределение трендов восстановления и определена приоритетность фактора стресса влажности растений.

**Ключевые слова:** Арктический регион, освоение георесурсов, отходы обогащения руд, хвостохранилище, сеяный фитоценоз, восстановление природных экосистем, спутниковые данные, вегетационный индекс, индекс стресса влажности растений, температура поверхности

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания № FMEZ-2022-0006 «Развитие методологии экоинвестиционного подхода к восстановлению природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов». Исходные данные спутниковых наблюдений MODIS получены на сервере Геологической службы США (USGS). Для обработки данных использовалось свободно распространяемое программное обеспечение: система обработки спутниковых данных SeaDAS, геоинформационные системы GRASS и QGIS, система нечеткой обработки данных FisPro, система визуализации данных GNUPlot.

**Для цитирования:** Остапенко С.П., Месяц С.П. Исследование динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, по данным спутниковых наблюдений. *Горная промышленность*. 2024;(6):52–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-52-58>

## Studying the restoration dynamics of natural ecosystems disturbed by the development of geo-resources based on satellite observations

S.P. Ostapenko, S.P. Mesyats✉

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ s.mesyats@ksc.ru

**Abstract:** Factors of the restoration dynamics for natural ecosystems disturbed during the development of geo-resources were identified within the framework of the eco-investment approach to support decision-making on greening the mining operations in Arctic conditions. A methodological approach to study the restoration dynamics of the natural ecosystems disturbed during the development of georesources was developed based on medium-resolution satellite images. It uses a fuzzy neural network model of the relationship between the restoration factors based on the monitoring data for a phytocenosis formed over an artificial gramineous phytocenosis on the enclosing dam of an active tailings dump of ores processing facilities at the Khibiny group of deposits, for the period from 2000 to 2023. An algorithm was developed for a four-fold improvement in the spatial resolution of remote sensing of the surface temperature at the monitored sites based on the MODIS thermal satellite images by reverse calculation of the brightness temperature with account for the difference in the emissivity of their surface due to the vegetation cover, and minimizing the discrepancy between the observed and predicted values of the temperature field. It was found that the determining restoration factors are the minimum land surface temperature and water availability. A spatial distribution of the restoration trends has been identified in the natural ecosystems as well as the priority of the plant moisture stress index.

**Keywords:** Arctic region, development of geo-resources, ore processing waste, tailings dump, artificial phytocenosis, restoration of natural ecosystems, satellite data, vegetation index, plant moisture stress index, land surface temperature

**Acknowledgments:** The work was executed within the framework of the State Assignment No. FMEZ-2022-0006 "Development of the eco-investment approach methodology to restoration of natural ecosystems disturbed during the development of geo-resources". The initial data of the MODIS satellite observations were collected from the United States Geological Survey (USGS) server. The data were processed using the following freely distributable software: the SeaDAS satellite data processing system, GRASS and QGIS geoinformation systems, FisPro fuzzy data processing system, GNUPlot data visualization system.

**For citation:** Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Studying the restoration dynamics of natural ecosystems disturbed by the development of geo-resources based on satellite observations. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):52–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-52-58>

## Введение

Материальный базис социально-экономического развития общества обеспечивается освоением георесурсов, сопровождающимся негативным воздействием на здоровье человека и природную среду, что представляет критическую проблему современности. Важность снижения негативных последствий человеческой деятельности признана на глобальном уровне Генеральной Ассамблеей ООН, провозгласившей период с 2021 по 2030 г. «Десятилетием восстановления экосистем для координации во всем мире совместных усилий по восстановлению природной среды и мониторингу результатов»<sup>1</sup> [1].

Мониторинг является важным этапом оценки эффективности восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, обеспечивающим адаптивный характер управления при реализации проектов [2]. При этом состояние растительного покрова используется в качестве индикатора восстановления, поскольку он играет ключевую роль в наземных экосистемах [3].

Вместе с тем вблизи горнопромышленных объектов из-за пространственной и временной неоднородности растительного покрова мониторинг восстановления природных экосистем, традиционно использующий данные полевых исследований, требует значительного числа мониторинговых площадок для обеспечения представительности данных [4; 5]. В этой связи при изучении динамики восстановления природных экосистем представляется перспективным использование данных дистанционного спутникового наблюдения с учетом непрерывного развития технологий съемки, улучшения разрешения датчиков и доступности данных [6]. Для оценки состояния растительного покрова по спутниковым данным широко используется нормализованный вегетационный индекс (NDVI) из-за его ясного физического значения и простого однозначного алгоритма расчета на основе отражательной способности земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного излучения [7].

Следует отметить, что мониторинг динамики восстановления природных экосистем предполагает исследование долгосрочных рядов данных нормализованного вегетационного индекса, рассчитываемого по изображениям свободной от перекрытия облаками территории. В этой связи для районов с частым проявлением 100%-ной облачности, как, например, арктические регионы, использование снимков Landsat (NASA) или Sentinel-2 (ESA), а также таких инструментов, как LandTrendr и CCDC [8], для обнаружения

тренда нарушения и восстановления объектов, затруднено вследствие частых разрывов временного ряда снимков. Среди источников спутниковых данных космические аппараты проекта MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, NASA) обеспечивают ежедневную съемку земной поверхности, и непрерывность временного ряда наблюдений в условиях облачности достигается за счет агрегации (temporal aggregation) снимков за фиксированные интервалы времени (неделя, две недели, месяц, год). Однако применение спутниковых снимков среднего пространственного разрешения (от 250 до 1000 м/пк) для мониторинга динамики восстановления природных экосистем вблизи горнопромышленных объектов затруднено из-за необходимости согласования разрешения спутниковых данных в разных спектральных каналах.

Данное исследование направлено на разработку подхода к ретроспективному анализу спутниковых снимков среднего пространственного разрешения для выявления долгосрочных трендов состояния растительного покрова при восстановлении природных экосистем в арктических условиях, что определяет его актуальность. Предполагается увязать тренды восстановления растительного покрова и смещения даты годового максимума вегетации с локальными условиями тепловлагообеспеченности растений по спутниковым данным об отражении солнечного излучения и собственном тепловом излучении земной поверхности, что требует согласования пространственного разрешения спектральных каналов снимков MODIS в видимой (250 м/пк), ближней инфракрасной (500 м/пк) и тепловой (1000 м/пк) областях электромагнитного излучения.

## Объект исследований

Долгосрочные тренды восстановления природных экосистем исследовались на примере складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений (Мурманская область), расположенных в Арктическом регионе России, экологическая уязвимость природных экосистем которого обусловлена медленным приростом биомассы вследствие отрицательных среднегодовых температур ( $-2^{\circ}\text{C}$ ), что делает растительность очень чувствительной к изменениям окружающей среды. С 1980-х годов на откосе ограждающей дамбы хвостохранилища формируется растительный покров по разработанной в Горном институте технологии восстановления нарушенных земель созданием биологически активной среды без нанесения плодородного слоя [9].

В условиях действующего хвостохранилища состояние растительного покрова на ограждающей дамбе изменяется в диапазоне от полного его отсутствия до фитоценоза

<sup>1</sup> UN, 2019. United Nations decade on ecosystem restoration (2021–2030). General Assembly, 69th Plenary Meeting, Seventy-third Session, Agenda Item 14. Available at: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n19/060/16/pdf/n1906016.pdf> (accessed: 18.09.2024).



**Рис. 1**  
Создание растительного покрова на складированных отходах переработки руд Хибинской группы месторождений:  
1 – первое десятилетие существования сеяного злакового фитоценоза; 2 – переход от луговой к лесной стадии сукцессии, формирование ярусной структуры;  
3 – формирование фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта

**Fig. 1**  
Creation of the vegetation cover on the dumped ore processing wastes of the Khibiny group of deposits:  
1 - the first decade of existence of the artificial gramineous phytocenosis; 2 - transition from the meadow to the forest succession stage, formation of the tier structure;  
3 - formation of the phytocenosis with the structure of the surrounding natural environment

окружающего природного ландшафта (рис. 1, снимки 0 и 1–3 соответственно), что определяет максимально широкий диапазон изменения вегетационного индекса и факторов восстановления.

**Спутниковые данные и их обработка**

Динамика восстановления растительного покрова изучалась по данным спутниковой съемки складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений космическими аппаратами MODIS (NASA), выполнявшейся в течение вегетационного периода (май – август) с 2000 по 2023 г. Предварительная обработка снимков включала атмосферную коррекцию и проективное преобразование с помощью системы обработки SeaDAS (NASA).

Каждый пиксел спутникового изображения складированных отходов рудообогатения в видимой и ближней инфракрасной области спектра с пространственным разрешением 250 м/пк рассматривался в качестве виртуального мониторингового полигона, для которого определялся вегетационный индекс, агрегированный для обеспечения неразрывности временного ряда за 8 сут. Для каждого мониторингового полигона рассчитывались ежегодные значения максимума вегетационного индекса аппроксимацией его годового изменения полиномом второго порядка зависимости от времени. Затем, на дату выхода вегетационного индекса на годовой максимум рассчитывались индекс стресса влажности растительности, минимальная и максимальная температура поверхности.

Для расчета вегетационного индекса и индекса стресса влажности растительности использовались следующие выражения:

$$NDVI = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}; \tag{1}$$

$$MSI = \frac{R_6}{R_1}, \tag{2}$$

где – спектральные коэффициенты отражения; индексы  $R_1, R_2, R_6$  – соответствуют номеру канала спутникового изображения MODIS с длинами волн 645, 858.5, 1640 нм с шириной 50, 35, 24 нм соответственно. Согласование пространственного разрешения изображения в шестом спектральном канале (500 м/пк) с размером мониторинговых полигонов (250 x 250 м) достигалось разделением каждого пиксела изображения на четыре пиксела путем линейной интерполяции значений спектральной яркости средствами геоинформационной системы GIS GRASS с учетом

значений в соседних пикселах и последующим расчетом коэффициента спектральной отражения.

Метод линейной интерполяции с учетом соседних пикселов неприменим для согласования пространственного разрешения изображения температурного поля (1000 м/пк), поскольку при переходе к разрешению 250 м/пк не все расчетные пиксели расположены на внешней границе исходного. Для расчета спектральной яркости внутренней области, образованной четырьмя из шестнадцати пикселов, перекрывающих пиксел теплового снимка, требуется привлечение дополнительной информации. В этой связи при оценке температуры поверхности мониторинговых полигонов учитывалось различие излучательной способности (коэффициента излучения) их поверхности, обусловленное растительным покровом, что позволило, используя обратный расчет радиояростной температуры, минимизировать невязку значений температурного поля и средней температуры 16 мониторинговых полигонов по системе уравнений (3):

$$\left\{ \begin{aligned} NDVI^i &= \sum_j \alpha_j \cdot NDVI_j^i \\ \varepsilon &= 1.0094 + 0.047 \cdot \ln(NDVI) \\ BT^i &= \frac{T^i}{1 - k \cdot T^i \cdot \ln(\varepsilon^i)} \\ T_j^i &= \frac{BT^i}{1 + k \cdot BT^i \cdot \ln(\varepsilon_j^i)} \\ f_i(\alpha_j) &= \max \left\{ \left( T^i - \frac{\sum_j T_j^i}{16} \right)^2 \right\} \rightarrow \min \\ \alpha_j &\geq 0, j = 1..16 \end{aligned} \right. \tag{3}$$

где  $NDVI$  – вегетационный индекс;  $\alpha_j$  – вклад в вегетационный индекс  $j$ -го мониторингового полигона, перекрывающего пиксел изображения температурного поля;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности;  $T$  – температура поверхности;  $BT$  – радиояростная температура;  $k$  – коэф-

фициент в уравнении излучения черного тела, равный отношению длины волны теплового излучения к постоянной Больцмана. Индексация пикселей спутникового изображения осуществляется следующим образом: верхний индекс  $i$  – пиксели изображения температурного поля с разрешением 1000 м/пк, нижний индекс  $j$  – пиксели изображения с разрешением 250 м/пк, перекрывающие  $i$ -й пиксел изображения температурного поля. Один пиксел изображения температурного поля перекрывается 16 пикселями изображения мониторинговых полигонов, нумерация которых в пределах пиксела изображения температурного поля осуществляется последовательно с севера на юг и с запада на восток.

Процедура повышения пространственного разрешения проводилась отдельно для каждого спутникового изображения температурного поля итерацией последовательных вычислений в несколько этапов. На первом этапе рассчитывался усредненный вегетационный индекс для 16 пикселей изображения мониторинговых полигонов, перекрывающих пиксел изображения температурного поля (первое уравнение системы (3)). На втором этапе с учетом эмпирической зависимости коэффициента излучения поверхности от вегетационного индекса (второе уравнение системы) по значению температурного поля определялась радиояркостная температура поверхности (третье уравнение системы), использованная для расчета температуры поверхности мониторинговых полигонов (четвертое уравнение системы). Вклад каждого мониторингового полигона в усредненный вегетационный индекс определялся минимизацией невязки значений температурного поля и среднеарифметической температуры 16 мониторинговых полигонов (шестое уравнение системы (3)), чем обеспечивалось согласование расчетных и наблюдаемых значений температуры и улучшение пространственного разрешения теплового снимка.

### Выявление тренда по данным мониторинга

Для изучения динамики восстановления природных экосистем для каждого мониторингового полигона за период наблюдений с 2000 по 2023 г. на ограждающей дамбе складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений рассчитывались тренды ежегодного максимума вегетационного индекса и его даты, а также тренды индекса стресса влажности растений, максимальной и минимальной температуры поверхности на дату максимума вегетационного индекса. Во всех случаях для однозначности трактовки направленности тренда использовалась линейная модель изменения перечисленных показателей со временем.

При интерпретации тренда состояния растительного покрова на мониторинговых полигонах складированных отходов рудообогатения принимались во внимание два очевидных обстоятельства: многофакторность и статистический характер зависимости вегетационного индекса.

В предыдущих исследованиях для характеристики влияния биотических и абиотических факторов на восстановление растительного покрова использовалась нейросетевая модель связи входных и выходных параметров модели, что позволило выделить и изучить значимые факторы и нелинейные многофакторные зависимости по их графическому представлению, не прибегая к аналитическому представлению зависимостей [10]. Искусственная нейронная сеть является универсальным аппроксиматором, позволяющим в модификации нечетких нейросетевых моделей систематизировать связи в статистической выборке взаимосвязанных данных в виде совокупности правил (продукций) [11]. Так, элементы каждого слоя сети Ванга – Менделя, идентичной по структуре многослойной нейронной сети прямого распространения сигнала, реализуют отдельный этап нечеткого вывода: фuzziфикацию, алгоритм нечеткого вывода и дефuzziфикацию [11; 12]. При этом для нечеткой продукционной модели существующие алгоритмы позволяют упростить многофакторную базу нечетких правил до минимальной избыточности, что обеспечивает возможность интерпретации прогноза при обработке данных спутниковых наблюдений природных систем [13; 14].

Для поиска связей во множестве данных, полученных в результате обработки спутниковых изображений, создавались две нечеткие нейросетевые продукционные модели прогноза тренда ежегодного максимума вегетационного индекса (НИНС-1) и тренда даты максимума вегетационного индекса (НИНС-2) для 150 мониторинговых полигонов на ограждающей дамбе складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений. Кодирование термов входных и выходных переменных НИНС проводилось на трех уровнях («низкий», «средний», «высокий») в диапазоне изменения факторов модели динамики формирования растительного покрова (табл. 1).

Термы факторов «низкий» и «высокий» моделировались трапецеидальной функцией, термы «средний» – треугольной. Расчет параметров функций принадлежности на основе кластеризации значений факторов, кодирование данных на этапе предобработки, обучение нечетких искусственных нейронных сетей НИНС-1 и НИНС-2, генерация баз нечетких правил с минимальной избыточностью проводились в системе нечеткой обработки данных FisPro (Франция).

**Таблица 1**  
Диапазон изменения значимых факторов модели динамики формирования растительного покрова на мониторинговых полигонах ограждающей дамбы складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений

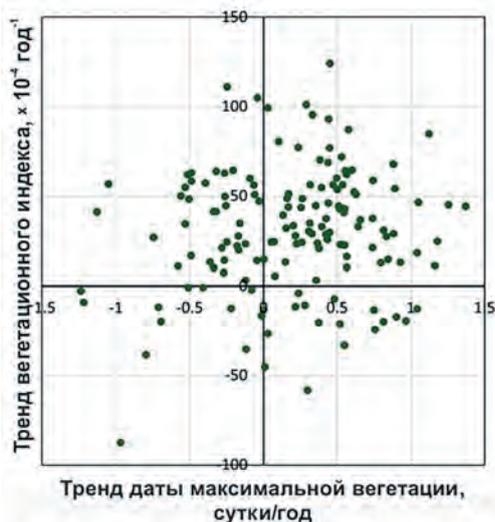
**Table 1**  
The range of changes in the significant factors of the model for the vegetation cover formation dynamics at the monitored sites on the enclosing dam of the processed ore waste dumps at the Khibiny group of deposits

№	Фактор	Размерность	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
1	Максимум вегетационного индекса, $\times 10^{-2}$	безразмерный	4,8	35,4	65,9
2	Тренд максимального вегетационного индекса, $\times 10^{-4}$	год <sup>-1</sup>	-87,5	30,6	124,2
3	Тренд даты максимума вегетационного индекса	сутки/год	-1,2	0,2	1,3
4	Тренд индекса стресса влажности растительности $\times 10^{-4}$	год <sup>-1</sup>	-9,4	0,9	10,1
5	Ночная температура поверхности	градус Цельсия	6,3	7,8	8,1
6	Дисперсия минимальной температуры поверхности	градус Цельсия	1,6	1,8	4,7

Визуализация и исследование трендов максимального вегетационного индекса и даты его наблюдения выполнялись по двухфакторным сечениям 6-мерного факторного пространства с использованием пакета GNUPlot (GNUPlot Development Team). Для характеристики пространственного распределения динамики и факторов восстановления природных экосистем на ограждающей дамбе складированных отходов рудообогатительной системы использовалась геоинформационная система QGIS.

**Результаты и их обсуждение**

Установлено, что для 80% мониторинговых полигонов на ограждающей дамбе складированных отходов рудообогатительной системы тренд вегетационного индекса имеет положительное значение, что характеризует восстановление природных экосистем, как видно из заполнения I и II квадрантов диаграммы рассеяния на рис. 2.



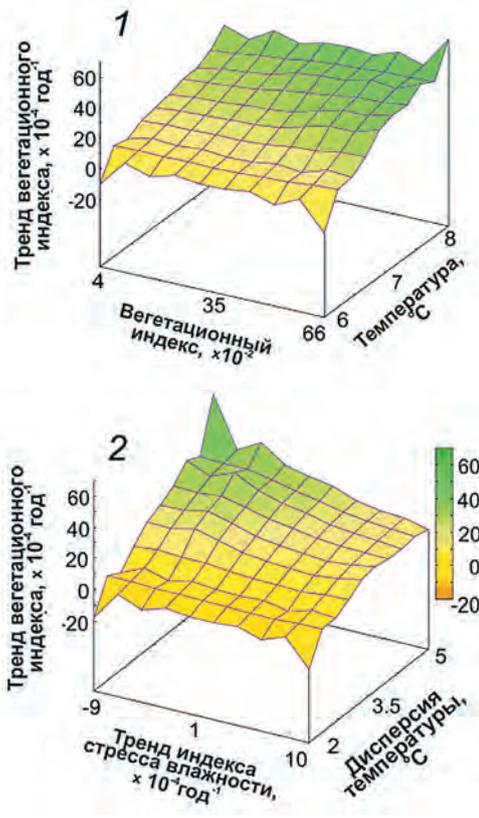
**Рис. 2**  
 Диаграмма рассеяния трендов состояния растительного покрова на мониторинговых полигонах ограждающей дамбы складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений

**Fig. 2**  
 A scatter diagram of trends in the vegetation cover condition at the monitored sites on the enclosing dam of the processed ore waste dumps at the Khibiny group of deposits

Следует отметить соответствие положительного значения тренда вегетационного индекса восстанавливаемого растительного покрова глобальному климатическому тренду на потепление и связанному с ним повышению вегетационного индекса природных экосистем в Арктике [15–17].

Выявлена зависимость тренда ежегодного максимума вегетационного индекса от пяти факторов: среднего значения и дисперсии минимальной температуры поверхности мониторинговых полигонов, максимального значения вегетационного индекса и его даты, тренда индекса стресса влажности растений – в результате представления результатов спутникового мониторинга ограждающей дамбы складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений в виде нечеткой нейросетевой модели НИНС-1. В качестве примера выявленных закономерностей на рис. 3 приведены две из 10 возможных двухфакторных зависимостей тренда вегетационного индекса.

Установлено, что тренд на восстановление растительного



**Рис. 3**  
 Зависимости тренда вегетационного индекса на ограждающей дамбе складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений: 1 – от максимального значения индекса и минимальной температуры поверхности, 2 – от индекса стресса влажности растений и дисперсии минимальной температуры поверхности

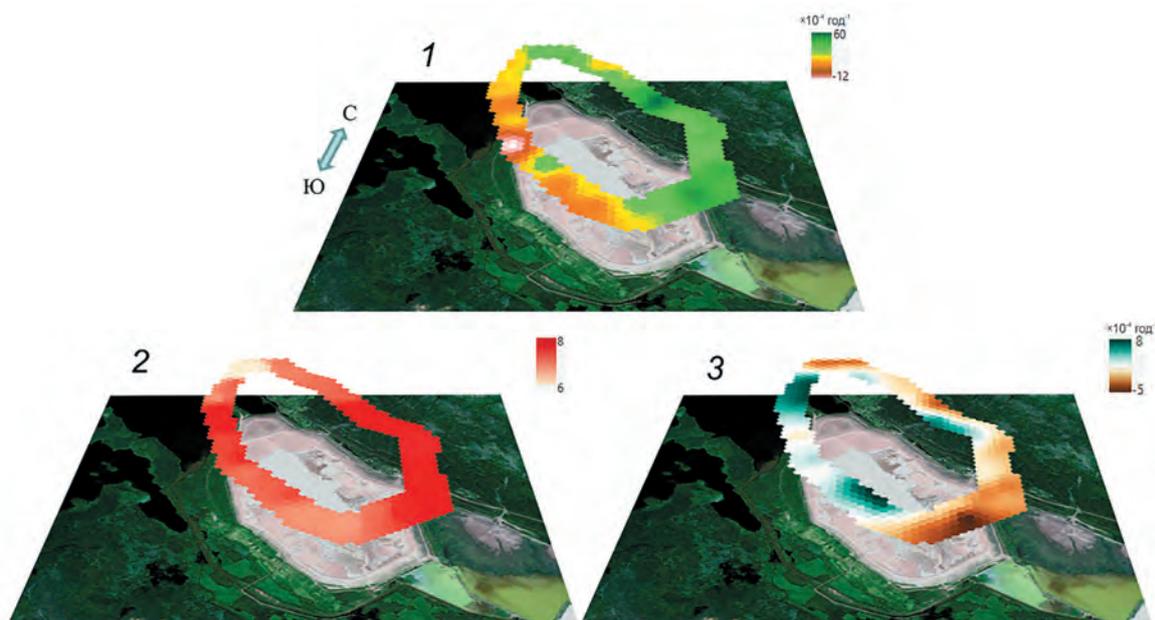
**Fig. 3**  
 Dependencies of the vegetation index trend on the enclosing dam of the processed ore waste dumps at the Khibiny group of deposits: 1 - on the maximum value of the index and minimum surface temperature, 2 - on the plant moisture stress index and dispersion of the minimum surface temperature

покрова симбатен с увеличением минимальной температуры поверхности и антибатен тренду индекса стресса влажности растений (соответственно фиг. 1 и фиг. 2 на рис. 3).

Благоприятное сочетание факторов восстановления растительного покрова наблюдается на ограждающей дамбе северо-восточной, восточной и юго-восточной экспозиции склона, характеризующихся относительно высокой минимальной температурой поверхности и тенденцией к уменьшению стресса влажности растений (рис. 4).

Тенденция к уменьшению стресса влажности растений (фиг. 3) имеет приоритетное влияние на положительную динамику восстановления растительного покрова на откосах северной и южной экспозиции, для которых отмечаются относительно низкие ночные температуры поверхности (фиг. 2). Таким ранжированием факторов обусловлено состояние растительного покрова на склонах северо-западной, западной и юго-западной экспозиции, где не создавался сеяный фитоценоз (фиг. 1), при относительно высокой минимальной температуре (фиг. 2) и тенденции к усилению стресса влажности растений (фиг. 3, рис. 4).

Установлено наличие отрицательного тренда вегетационного индекса на склоне западной экспозиции ограждающей дамбы складированных отходов переработки руд



**Рис. 4**  
Пространственное распределение тренда вегетационного индекса – 1, минимальной температуры – 2 и тренда стресса влажности – 3 растительного покрова, созданного на ограждающей дамбе складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений, по данным спутниковых наблюдений в период 2000–2023 гг.

**Fig. 4**  
Spatial distribution of the vegetation index trend - 1, minimum temperature - 2 and the moisture stress trend - 3 of the vegetation cover created on the enclosing dam of the processed ore waste dumps at the Khibiny group of deposits, based on satellite observations during the period of 2000–2023

Хибинской группы месторождений (фиг. 1, рис. 4) из-за отсутствия сеяного злакового фитоценоза.

Восстановительный тренд растительного покрова на ограждающей дамбе хвостохранилища в большинстве случаев сопровождается увеличением даты максимальной вегетации (55% мониторинговых полигонов), тогда как уменьшение даты, ожидаемое в связи с потеплением климата, наблюдается вдвое реже (26%) (рис. 2). При этом для мониторинговых полигонов с отрицательным трендом вегетационного индекса различия трендов даты максимальной вегетации на увеличение или уменьшение невелики (11 и 9% мониторинговых полигонов соответственно). В соответствии с нечеткой нейросетевой продукционной моделью НИНС-2 тренд даты максимума вегетационного индекса определяется величиной и вариацией минимальной температуры поверхности мониторинговых полигонов. Вместе с тем позитивное влияние температуры поверхности на тренд даты максимума вегетационного индекса прослеживается только в условиях ее минимальной вариации, что свидетельствует о наличии неучтенных факторов и требует уточнения модели.

### Заключение

Разработан методический подход к изучению динамики восстановления природных экосистем по спутниковым

снимкам среднего разрешения с использованием нечеткой нейросетевой модели взаимосвязи факторов восстановления растительного покрова на примере данных мониторинга ограждающей дамбы складированных отходов переработки руд Хибинской группы месторождений в условиях действующего хвостохранилища за период с 2000 по 2023 г.

Разработан алгоритм четырехкратного улучшения пространственного разрешения дистанционной оценки температуры поверхности мониторинговых полигонов по тепловым спутниковым снимкам обратным расчетом радиояркостной температуры с учетом различия коэффициента излучения их поверхности, обусловленного растительным покровом, и минимизацией невязки наблюдаемых и прогнозных значений температурного поля.

Установлено, что максимальная температура поверхности и влагообеспеченность являются определяющими факторами восстановления растительного покрова на складированных отходах переработки руд Хибинской группы месторождений. Выявлено пространственное распределение трендов и факторов восстановления растительного покрова на ограждающей дамбе хвостохранилища для поддержки принятия решений по экологизации горного производства в арктических условиях.

### Список литературы / References

- Werden L.K., Cole R.J., Schönhofer K., Holl K.D., Zahawi R.A., Averill C. et al. Assessing innovations for upscaling forest landscape restoration. *One Earth*. 2024;7(9):1515–1528. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.011>
- Корнилков С.В., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала. *Горная промышленность*. 2022;(1S):127–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133>  
Kornilkov S.V., Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu. Geoinformation monitoring for solving environmental problems of mining territories of the Middle Ural. *Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):127–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133>

3. Aubin I., Deschênes É., Santala K.R., Emilson E.J.S., Schoonmaker A.L., McIntosh A.C.S. Restoring forest ecosystem services through trait-based ecology. *Environmental Reviews*. 2024. <https://doi.org/10.1139/er-2023-0130>
4. Wang Y., Qin K., Zhang Z., He Q., Cohen J. Mapping open-pit mining area in complex mining and mixed land cover zone using Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024;129:103782. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103782>
5. Дёгтева С.В. Особенности восстановления растительности на отвалах отработанных россыпей Приполярного Урала. *Теоретическая и прикладная экология*. 2021;(3):80–89. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-080-089>  
Degteva S.V. Features of vegetation restoration on the dumps of spent minings of the Subpolar Urals. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;(3):80–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-080-089>
6. Sikakwe G.U. Mineral exploration employing drones, contemporary geological satellite remote sensing and geographical information system (GIS) procedures: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023;31:100988. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100988>
7. Li S., Xu L., Jing Y., Yin H., Li X., Guan X. High-quality vegetation index product generation: A review of NDVI time series reconstruction techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021;105:102640. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102640>
8. Pasquarella V.J., Arévalo P., Bratley K.H., Bullock E.L., Gorelick N., Yang Z., Kennedy R.E. Demystifying LandTrendr and CCDC temporal segmentation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022;110:102806. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102806>
9. 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. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.11>  
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.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.11>
10. Остапенко С.П., Месяц С.П. Оценка потенциала восстановления экологического состояния природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, по спутниковым данным. *Горная промышленность*. 2023;(5S):80–86. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-80-86>  
Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Assessment of the potential for restoration of the environmental state of the natural ecosystems disturbed by development of geo-resources based on satellite data. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):80–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-80-86>
11. Солдатова О.П., Лёзин И.А., Лёзина И.В. Исследование эффективности алгоритмов генерации базы нечетких продукционных правил для нейронной сети Ванга – Менделя. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2023;(1):86–100. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-1-7>  
Soldatova O.P., Lyozin I.A., Lyozina I.V. Studying the efficiency of algorithms for generating the base of fuzzy production rules for the Wang-Mendel neural network. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*. 2023;(1):86–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2023-1-7>
12. Alateeq M., Pedrycz W. Logic-oriented fuzzy neural networks: A survey. *Expert Systems with Applications*. 2024;257:125120. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125120>
13. Łapa K. Increasing the explainability and trustiness of Wang–Mendel fuzzy system for classification problems. *Applied Soft Computing*. 2024;167(Part A):112257. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112257>
14. Christos V., Tsekouras G.E., Palaiologou P., Kalabokidis K. Neural-Network time-series analysis of MODIS EVI for post-fire vegetation regrowth. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018;7(11):420. <https://doi.org/10.3390/ijgi7110420>
15. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic climate system and its global influences - Overview of GRENE Arctic climate change research project (2011–2016). *Polar Science*. 2020;25:100548. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100548>
16. Treitz P.M., Atkinson D.M., Blaser A., Bonney M.T., Braybrook C.A., E.C. Buckley et al. Remote sensing of biogeophysical variables at the Cape Bounty Arctic Watershed Observatory, Melville Island, Nunavut, Canada. *Arctic Science*. 2024;10(2):281–304. <https://doi.org/10.1139/as-2023-0043>
17. Beamish A., Reynolds M.K., Epstein H., Frost G.V., Macander M.J., Bergstedt H. Recent trends and remaining challenges for optical remote sensing of Arctic tundra vegetation: A review and outlook. *Remote Sensing of Environment*. 2020;246:111872. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111872>

**Информация об авторах**

**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

**Месяц Светлана Петровна** – ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9929-8067>; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 30.09.2024

Поступила после рецензирования: 18.11.2024

Принята к публикации: 25.11.2024

**Information about the authors**

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

**Svetlana P. Mesyats** – Leading Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9929-8067>; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

**Article info**

Received: 30.09.2024

Revised: 18.11.2024

Accepted: 25.11.2024