

Оценка потенциала восстановления экологического состояния природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, по спутниковым данным

С.П. Остапенко, С.П. Месяц ✉

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

Резюме: Изучены факторы восстановления экологического состояния природных экосистем, нарушенных при освоении месторождений полезных ископаемых, на примере фитоценоза, формирующегося на ограждающей дамбе складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинской группы месторождений по разработанной в Горном институте КНЦ РАН технологии восстановления нарушенных земель созданием биологически активной среды без нанесения плодородного слоя. По данным спутниковых наблюдений мониторинговых полигонов в течение вегетационного периода изучено влияние рельефа и теплолагообеспеченности на состояние формирующегося растительного покрова с использованием градиентных по высоте откоса ограждающей дамбы трансектах разной экспозиции. Применением усовершенствованной процедуры паншарпенинга обеспечены согласование пространственного разрешения спутниковых снимков с минимальным характерным размером элементов откоса дамбы и представительность данных, полученных при оценке состояния растительного покрова вегетационным индексом и индексом стресса влажности.

Выполнено обобщение связи параметров, характеризующих состояние растительного покрова, с абиотическими факторами его формирования на основе нейросетевой модели. Проведено обучение двух искусственных нейронных сетей прогнозу индексов вегетационного и стресса влажности растений на массиве данных, полученных в результате обработки видимых, инфракрасных и тепловых спектральных каналов спутниковых снимков мониторинговых полигонов. С помощью нейросетевой модели показано, что вегетационный индекс формирующегося растительного покрова антибате́н индексу стресса влажности растений – доминирующему фактору восстановления экологического состояния исследуемого объекта, и температуре поверхности ограждающей дамбы хвостохранилища.

Зависимость прогнозного стресса влажности фитоценоза, формирующегося на откосе ограждающей дамбы, от высотной отметки и экспозиции использована для оценки потенциала его восстановления до лесной стадии сукцессии, соответствующей фитоценозу окружающего природного ландшафта. Выполнено зонирование хвостохранилища по потенциалу восстановления экологического состояния с целью поддержки принятия решений при планировании природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: арктический регион, освоение георесурсов, хвостохранилище, восстановление природных экосистем, формирующийся фитоценоз, спутниковые данные, паншарпенинг, вегетационный индекс, индекс стресса влажности растений, искусственная нейронная сеть

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

Для цитирования: 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>

Assessment of the potential for restoration of the environmental state of the natural ecosystems disturbed by development of geo-resources based on satellite data

S.P. Ostapenko, S.P. Mesyats ✉

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

Abstract: The factors of environmental state restoration of the natural ecosystems disturbed as the result of mining mineral deposits were investigated using the case study of the phytocenosis formed on the enclosing dam of the apatite-nepheline ore processing waste storage in the Khibiny group of deposits according to the technology developed in the Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences for the restoration of disturbed lands through creation of a biologically active environment without deposition of a fertile layer. Based on the data of satellite observations of the monitoring sites during

the vegetation period, the impact of relief as well as the heat and moisture availability on the state of the emerging vegetation cover was studied using gradient transects of different exposures along the height of the enclosing dam slope. The spatial resolution of the satellite images was harmonized using the enhanced pan-sharpening procedure with the minimum characteristic size of the dam slope elements and the representativeness of the data obtained when assessing the vegetation cover condition using the vegetation index and the moisture stress index was ensured.

Generalization was made of the relationship between the parameters characterizing the vegetation cover state and abiotic factors of its formation using a neural network model. Two artificial neural networks were trained to predict the vegetation and the plant moisture stress indices using the data set obtained from processing of visible, infrared and thermal spectral channels of satellite images of the monitoring sites. The neural network model shows that the vegetation index of the emerging vegetation cover is antipathetic to the plant moisture stress index - the dominant factor in restoration of the environmental state of the investigated site, and to the surface temperature of the enclosing dam of the tailing dump.

Dependence of the predicted moisture stress of the phytocenosis formed on top of the enclosing dam slope on the elevation and exposure was used to assess the potential of its restoration to the forest succession stage corresponding to the phytocenosis of the surrounding natural environment. Zoning of the tailing dump according to the potential for restoration of the environmental state was performed in order to support the decision-making process when planning environmental protection measures.

Keywords: Arctic region, development of georesources, tailing dump, restoration of environmental condition of the territory, emerging phytocenosis, satellite data, pan-sharpening, vegetation index, plant moisture stress index, artificial neural network

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the State Assignment 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: 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. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-80-86>

Введение

Спутниковые наблюдения среди прочих возможностей позволяют поставить в соответствие каждой точке земной поверхности спектральные индексы, характеризующие ее отражательную способность, что широко используется в современных исследованиях наземных экосистем [1; 2]. В рамках задачи экологизации горного производства пространственное распределение спектральных индексов применяется для выявления благоприятного или неблагоприятного сочетания факторов восстановления экосистем, нарушенных при освоении месторождений полезных ископаемых, с целью подбора оптимальных технологических решений при планировании природоохранных мероприятий [3; 4].

Целевой функцией восстановления экосистем, нарушенных является формирование растительного покрова, состояние которого характеризуется спектральными индексами по отраженному солнечному излучению, измененному в красной и инфракрасной областях спектра вследствие фотосинтетической активности растений и поглощения света водой, содержащейся в листовых органах [5]. Степень восстановления природных экосистем оценивается вегетационным индексом формирующегося растительного покрова в сравнении с индексом растительного покрова окружающего природного ландшафта [6]; динамика его проективного покрытия в течение вегетационного периода оценивается вегетационным индексом в отношении к его максимальному значению [7]; тепловлагообеспеченность оценивается температурой (тепловым излучением) поверхности и индексом стресса влажности растений [8; 9]. Следует отметить малую изученность пространственного распределения спектральных индексов и температуры поверхности на территории горно-обогатительных предприятий, что связано с суперпозицией спектров отражения растительного покрова и горных пород из-за несоответствия между пространственным разрешением спутникового изображения и размером элементов технологических объектов [10; 11].

Согласование пространственного разрешения спутнико-

вого изображения с характерным минимальным размером элементов объектов восстановления (отвалов вскрыши, складированных отходов рудообогащения и др.) выполняется путем паншарпенинга – улучшения детализации изображения в спектральных каналах в красной и инфракрасной областях спектра, что обеспечивает повышение информативности оценки состояния формируемого растительного покрова за счет его более точной идентификации и уменьшения дисперсии спектральных индексов [12]. Паншарпенинг приводит к кратному увеличению объема обрабатываемых данных, так, двукратное увеличение пространственного разрешения увеличивает объем выборки пикселей изображения формируемого растительного покрова в три-четыре раза, что целесообразно учитывать при выборе способа статистической обработки данных.

Следует отметить сложность выявления корреляционной связи спектральных индексов формируемого растительного покрова с факторами восстановления природных экосистем, что обусловлено асимметрией плотности функции распределения индексов [13]. Однако при наличии большого объема исходных данных возможным решением проблемы является использование для их обработки нейросетевой модели, мало чувствительной к отклонению выборочных распределений от распределения Гаусса-Лапласа. Известно, что увеличение массива обучающих примеров и числа нейронов в скрытом слое искусственной нейронной сети позволяет аппроксимировать данные с высокой точностью, при этом достоверность прогноза определяется представительностью обучающей выборки [14; 15].

В развитие проводимых в Горном институте КНЦ РАН работ, связанных с применением современных информационных технологий исследования в области горной экологии, представляются актуальными изучение факторов и оценка потенциала восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, использованием обученной на основе данных спутниковых наблюдений нейросетевой модели.

Объект исследований

Возможность использования нейросетевой модели для прогноза спектральных индексов при оценке потенциала восстановления природных экосистем исследовалась на примере складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд месторождений Хибинской группы (Кольский полуостров). Площадь хвостохранилища составляет 7 км², максимальная проектная высота ограждающей дамбы – 89 м, емкость хвостохранилища на конечной отметке заполнения – 600 млн м³. Ширина транспортных берм (15 м) соответствует минимальному характерному размеру элементов объекта исследования.

Хвостохранилище расположено в Атлантико-Арктической зоне умеренного климата, отрицательных среднегодовых температур (–2 °С), избыточного увлажнения воздуха. Лесной пояс окружающего природного ландшафта (северная тайга) простирается до высоты 370–400 м, что вдвое превышает конечную отметку заполнения хвостохранилища – 200 м. С 1980-х годов на откосе ограждающей дамбы формируется растительный покров (рис. 1) по разработанной в Горном институте технологии восстановления нарушенных земель созданием биологически активной среды без нанесения плодородного слоя [16].

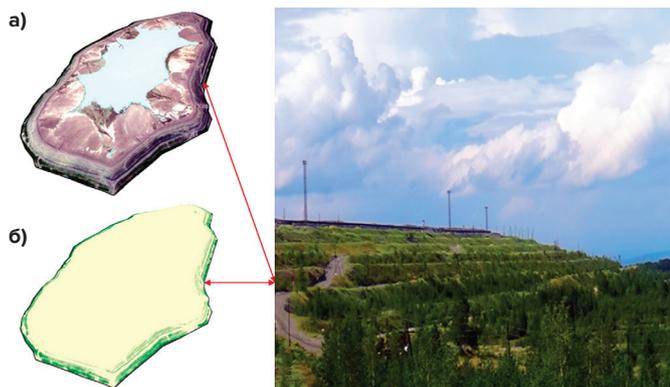


Рис. 1
Актальное состояние растительного покрова на ограждающей дамбе складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд месторождений Хибинской группы: а – вид со спутника; б – распределение вегетационного индекса

Fig. 1
Actual state of the vegetation cover on the enclosing dam of the dumped apatite-nepheline ore processing waste from the Khibiny group of deposits: а – a satellite view; б – distribution of the vegetation cover

Наибольшая плотность растительного покрова, идентифицированного на спутниковом изображении вегетационным индексом, наблюдается на нижних ярусах откоса ограждающей дамбы (рис. 1, а и 1, б), что обуславливается последовательностью ее формирования по мере наращивания максимальной высотной отметки действующего хвостохранилища. Помимо временного фактора эффективность природоохранных мероприятий зависит от совокупности таких факторов, как высотное положение, экспозиция откоса дамбы, тепловлагообеспеченность фитоценоза, определяющих потенциал восстановления природных экосистем.

Спутниковые данные и их обработка

Влияние абиотических факторов – рельефа и тепловлагообеспеченности – на потенциал восстановления природных экосистем изучалось по данным спутниковой съемки Landsat 7 (NASA), выполненной в 2021 г. в течение вегетационного периода (начало июня – конец августа). Для обеспечения представительности данных на спутниковых изображениях хвостохранилища закладывались виртуальные мониторинговые полигоны – градиентные по высоте откоса дамбы трансекты разной экспозиции. При расчете экспозиции мониторинговых полигонов использовалась цифровая модель рельефа FABDEM (Forest and Buildings removed Copernicus DEM) с разрешением в горизонтальной плоскости 30 м/пк.

Для каждого пикселя спутникового изображения виртуальных мониторинговых полигонов определялась спектральная плотность излучения в видимом и инфракрасном диапазонах в пяти спектральных каналах с длинами волн 560; 661.5; 835; 1650; 11335 нм, с шириной каналов 41; 31,5; 63; 200; 1025 нм соответственно и разрешением в горизонтальной плоскости 30 м/пк, а также плотность излучения в панхроматическом канале в диапазоне длин волн 515–896 нм с разрешением 15 м/пк. Для вычисления спектральных индексов и температуры поверхности, характеризующих состояние растительного покрова и факторы восстановления природных экосистем, выполнялось предварительное преобразование спектральной плотности излучения каждого пикселя исходных спутниковых данных с минимизацией невязки результирующей и исходной плотности излучения. Обработка спутниковых изображений мониторинговых полигонов проводилась в несколько этапов.

На первом этапе согласовывалось пространственное разрешение изображения мониторинговых полигонов с минимальным характерным размером элементов откоса ограждающей дамбы. С этой целью выделялись пиксели изображения мониторинговых полигонов в спектральных каналах с разрешением 30 м/пк, перекрывающие пиксели панхроматического изображения с разрешением 15 м/пк в соотношении 1:9. Для каждого спутникового изображения мониторинговых полигонов, полученного в течение вегетационного периода, выполнялось уравнивание спектральной плотности излучения пикселей изображения с разрешением 30 м/пк и соответствующих девяти пикселей панхроматического канала расчетом коэффициентов a^j и b в соответствии с системой уравнений

$$\begin{cases} I_{i,k}^j(a^j, b) = I_i^j \cdot I_{i,k}^{PAN} \frac{1}{\sum_j a^j I_i^j} + b \\ \{a^j, b\} = \arg \min \left\{ \sum_i \left(I_i^j - \frac{\sum_k I_{i,k}^j(a^j, b)}{9} \right)^2 \right\} \\ k = 1..9 \end{cases} \quad (1)$$

где I_i^j – спектральная плотность излучения i -го пикселя разрешением 30 м/пк в j -м спектральном канале; $I_{i,k}^{PAN}$ – спектральная плотность излучения k -го пикселя панхроматического канала разрешением 15 м/пк, перекрывающегося i -м пикселем спектрального канала разрешением 30 м/пк; a^j – вклад спектральной плотности

излучения j -го канала в спектр панхроматического канала; b – свободный коэффициент; $I_{i,k}^j(a^j, b)$ – спектральная плотность излучения k -го пикселя разрешением 15 м/пк после паншарпенинга i -го пикселя разрешением 30 м/пк. Паншарпенинг изображения мониторинговых полигонов для расчета индексов вегетационного и стресса влажности растений проводился для двух комбинаций спектральных каналов, а именно: первого, второго, третьего и первого, второго, четвертого – в развитие предложенного в работе [12] подхода. Статистическая устойчивость расчетной процедуры повышалась дополнением линейной модели свободным коэффициентом b , невязка плотности излучения пикселей высокого и низкого разрешения составила менее 10%.

Спектральная плотность излучения пикселя разрешением 15 м/пк использовалась для расчета вегетационного индекса NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) и индекса стресса влажности растений MSI (Moisture Stress Index)

$$NDVI = \frac{I_{i,k}^3 - I_{i,k}^2}{I_{i,k}^3 + I_{i,k}^2},$$

$$MSI = \frac{I_{i,k}^4}{I_{i,k}^3},$$
(2)

где $I_{i,k}^2, I_{i,k}^3, I_{i,k}^4$ – спектральная плотность излучения второго, третьего, четвертого спектральных каналов спутникового изображения с длинами волн 661, 5, 835, 1650 нм соответственно, сулучшенным после паншарпенинга разрешением 15 м/пк.

На втором этапе обработки спутниковых изображений мониторинговых полигонов определялись и исключались из дальнейшего рассмотрения участки откоса ограждающей дамбы хвостохранилища без растительности и транспортные бермы, что характеризовалось низкой (менее 0,25) величиной вегетационного индекса на снимках, сделанных в середине вегетационного периода. Спектральные индексы оставшихся пикселей после корректировки их плотности излучения на третьем этапе обработки использовались для обучения нейросетевой модели, увязывающей вегетационный индекс фитоценоза с факторами восстановления природных экосистем.

На третьем этапе обработки спутниковых данных корректировалась по ранее разработанному алгоритму плотность излучения во втором, третьем, четвертом спектральных каналах для учета затенения поверхности мониторинговых полигонов растительностью, поскольку восстановление природных экосистем сопровождается сукцессией к фитоценозу окружающего природного ландшафта, представленного смешанным лесом. Для этого использовались корреляция спектральной плотности излучения в каналах спутникового изображения фитоценоза окружающего природного ландшафта с излучением в диапазоне длин волн 519–1750 нм, характеризующем его освещенность [17].

На четвертом этапе обработки спутниковых данных спектральная плотность излучения пикселей теплового изображения (пятый спектральный канал) мониторинговых полигонов приводилась к разрешению 15 м/пк в соответствии с алгоритмом, предложенным ранее в работе [17]. Поскольку интенсивность собственного теплового излучения земной поверхности в отсутствие иных источ-

ников тепла определяется радиационным балансом, для паншарпенинга теплового изображения использовались результаты обработки каналов видимой и инфракрасной областей спектра по системе уравнений (1). Погрешность расчета спектральной плотности теплового излучения не превышала 15%.

Температура поверхности мониторинговых полигонов определялась с использованием спектральной плотности их теплового изображения с разрешением 15 м/пк по расчетной схеме для арктических территорий [18; 19].

Для обработки спутниковых данных, проведения статистических расчетов применялось некоммерческое программное обеспечение: геоинформационная система QGIS (QGIS Development Team, QGIS Association) и программная среда R (R Development Core Team, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).

Нейросетевая обработка данных спутниковых наблюдений

На массиве $1,6 \cdot 10^4$ наблюдений спектральных индексов растительного покрова мониторинговых полигонов, выделенных в результате обработки спутниковых снимков хвостохранилища, выполнялось обучение двух искусственных нейронных сетей (ИНС) по стандартной процедуре обратного распространения ошибки, реализованной в системе статистической обработки данных R.

Структура первой искусственной нейронной сети (ИНС-1), использованной для изучения связи вегетационного индекса растительного покрова с факторами, обуславливающими восстановление природных экосистем, включала шесть входных нейронов, соответствующих дате спутникового наблюдения, экспозиции виртуального мониторингового полигона, расчетным в каждом пикселе спутникового изображения высотной отметке, температуре поверхности, проективному покрытию растительности, индексу стресса влажности. Выходной слой ИНС-1 состоял из одного нейрона, соответствующего прогнозу вегетационного индекса для пикселей спутникового изображения. ИНС-1 включала пять скрытых слоев, при обучении которых подбирались значения 990 весовых коэффициентов.

Вторая ИНС (ИНС-2) использовалась для изучения влияния абиотических факторов на индекс стресса влажности растений. Входной слой ИНС-2 состоял из пяти нейронов, соответствующих дате наблюдения, экспозиции мониторингового полигона, высотной отметке, температуре поверхности, проективному покрытию растительности; выходной слой – один нейрон – соответствовал прогнозу индекса стресса влажности растений. При обучении ИНС-2 четыре скрытых слоя параметризовались 450 весовыми коэффициентами.

Зависимости прогнозируемых индексов вегетационного и стресса влажности растений исследовались по двухфакторным сечениям факторного пространства семи и шести измерений соответственно, с использованием программной среды R и пакета GNUPlot (GNUPlot Development Team).

Результаты и их обсуждение

Для исследования потенциала восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении месторождений апатит-нефелиновых руд, использована искусственная нейронная сеть ИНС-1, увязывающая влияние факторов рельефа, времени, влажности и температуры поверхности

с вегетационным индексом при весьма высокой (по шкале Чеддока) связи прогнозных и наблюдаемых значений вегетационного индекса (коэффициент корреляции 0,99), что свидетельствует о точности аппроксимации данных наблюдений.

Значения всего массива наблюдений перекрывают диапазон изменения вегетационного индекса растительного покрова, формируемого на откосе ограждающей дамбы хвостохранилища, от минимальных в начале вегетации значений 0,05–0,1 до максимального значения (0,85) на пике вегетации в середине июля – начале августа, что характеризует представительность данных, использованных для обучения нейросети. Следует отметить, что максимальное значение наблюдаемого вегетационного индекса превышает усредненный вегетационный индекс природного фитоценоза (0,72), что обусловлено благоприятным сочетанием факторов на некоторых полигонах, а также видовым составом формируемого фитоценоза. Анализ отклика ИНС-1 на изменение факторов показывает, что на пике вегетации наибольшее влияние на вегетационный индекс растительного покрова, формирующегося на откосе ограждающей дамбы, оказывают индекс стресса влажности и температура поверхности (рис. 2, а).

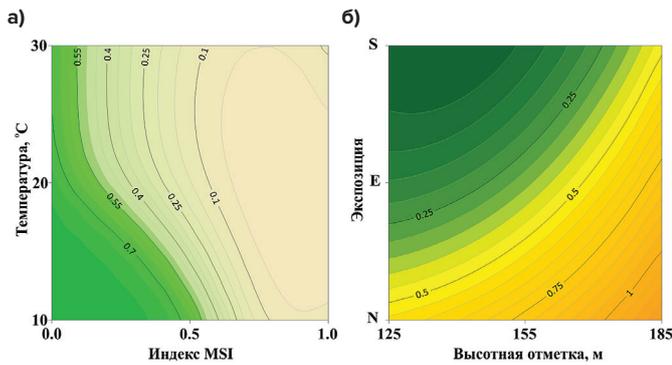


Рис. 2
Зависимость прогнозируемых искусственной нейронной сетью вегетационного индекса (а) и индекса стресса влажности растений (б) фитоценоза, формирующегося на откосе ограждающей дамбы складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд, от значимых факторов на пике вегетации

Fig. 2
Dependence of the vegetation index (а) and the plant moisture stress index (б) of the phytocenosis formed on the slope of the apatite-nepheline ore processing waste storage dam predicted by the artificial neural network on the significant factors at the peak of vegetation

Увеличение индекса стресса влажности сопровождается уменьшением максимальных значений вегетационного индекса до значений, наблюдаемых в начале вегетационного периода. При значениях индекса стресса влажности до 0,8 вегетационный индекс уменьшается с ростом температуры поверхности, что свидетельствует о лимитирующей роли влагообеспеченности в формировании растительного покрова на откосе ограждающей дамбы хвостохранилища. Отсутствие реакции растительного покрова на изменение температуры при значениях индекса стресса влажности более 0,8 интерпретируется засыханием или отмиранием растений (см. рис. 2, а).

Исследование влияния абиотических факторов на индекс стресса влажности формирующегося растительного покрова с использованием ИНС-2 показало большой

разброс прогнозных значений, чем в случае аналогичной зависимости вегетационного индекса, что связывается с влиянием неучтенных факторов на влагообеспеченность растений. Влияние локальных особенностей виртуальных мониторинговых полигонов, таких как близость к водным объектам, экспозиция склона, ветровой режим, видовой состав растений, эвапотранспирация – требуют углубленного изучения. Однако, совокупное влияние неучтенных факторов не превышает влияния изученных факторов, что подтверждается весьма высокой связью прогнозных и наблюдаемых значений индекса (коэффициент корреляции 0,93).

На пике вегетации индекс стресса влажности растений определяется согласно нейросетевой модели ИНС-2 в равной степени высотной отметкой и экспозицией откоса. Наиболее благоприятные условия формирования растительного покрова прогнозируются на нижнем ярусе ограждающей дамбы при южной экспозиции откоса. Неблагоприятные условия (высокий индекс стресса влажности) прогнозируются на откосе ограждающей дамбы северной экспозиции и на верхнем ярусе независимо от экспозиции (рис. 2, б).

Полученный результат хорошо согласуется с представлением о наиболее благоприятном сочетании фактов для фитоценозов на нижней части склона при южной экспозиции [20].

Оценка потенциала восстановления природных экосистем проводилась на основе прогноза индекса стресса влажности с учетом фактора рельефа с использованием ИНС-2. Учитывалась предложенная в работе [21] градация состояний лесной экосистемы в зависимости от стресса влажности растений. В соответствии с прогнозным состоянием формируемого фитоценоза высоким потенциалом восстановления характеризуются нижние ярусы ограждающей дамбы хвостохранилища до высоты 155 м, любой, кроме северной, экспозиции, индекс стресса влажности которых менее 0,4. Откос северной экспозиции и ярусы ограждающей дамбы с высотной отметкой от 155 до 170 м характеризуются стрессовыми условиями (индекс стресса влажности растений более 0,4, но менее 0,55), что отвечает низкому потенциалу восстановления природных экосистем. Отсутствие потенциала и негативный прогноз восстановления природных экосистем, обусловленные индексом стресса влажности растений выше 0,55, характеризуют верхние ярусы (выше 170 м) и гребень ограждающей дамбы хвостохранилища, в этом случае для снижения уровня стресса рекомендуется проведение гидромелиоративных мероприятий.

Выводы

В результате проведенных исследований разработан методический подход к изучению связи биотических и абиотических факторов восстановления природных экосистем по спутниковым снимкам с использованием нейросетевой модели. Установлено, что влагообеспеченность является определяющим фактором восстановления природных экосистем, на примере складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинской группы месторождений. Показано, что неблагоприятное сочетание факторов выявляется применением бученной искусственной нейронной сети с целью информационной поддержки принятия решений при планировании природоохранных мероприятий без привлечения исходных данных спутниковых наблюдений.

Список литературы

1. Горный В.И., Бровкина О.В., Киселев А.В., Тронин А.А. Тенденции развития дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023;20(2):9–38. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-9-38>
2. Werner T.T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6:993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
3. McKenna P.B., Lechner A.M., Phinn S., Erskine P.D. Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: A global systematic review. *Remote Sens*. 2020;12(21):3535. <https://doi.org/10.3390/rs12213535>
4. Li T., Wu M., Duan C., Li S., Liu C. The effect of different restoration approaches on vegetation development in metal mines. *Science of The Total Environment*. 2022;806-2:150626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150626>
5. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021;32:1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
6. Месяц С.П., Остапенко С.П. Методический подход к мониторингу восстановления нарушенных земель горнопромышленной отрасли по данным спутниковых наблюдений. *Горная промышленность*. 2018;(6):72–75. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-6-142-72-75>
7. Filipponi F., Valentini E., Xuan A.N., Guerra C.A., Wolf F., Andrzejak M., Taramelli A. Global MODIS fraction of green vegetation cover for monitoring abrupt and gradual vegetation changes. *Remote Sensing*. 2018;10(4):653. <https://doi.org/10.3390/RS10040653>
8. Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Связь сезонной динамики температуры поверхности и NDVI урбанизированных территорий засушливой зоны (на примере Волгоградской агломерации). *Исследование Земли из космоса*. 2021;(4):72–83. <https://doi.org/10.31857/S0205961421040084>
9. 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. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-6-137-142>
10. Labib S.M., Lindley S., Huck J.J. Scale effects in remotely sensed greenspace metrics and how to mitigate them for environmental health exposure assessment. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2020;82:101501. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101501>
11. Елсаков В.В. Влияние детальности аэрокосмических изображений на результаты классификации растительных сообществ тундры. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023;20(1):176–188. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-176-188>
12. Остапенко С.П., Месяц С.П. Изучение по спутниковым данным динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(5):155–166. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220515>
13. Martín-Sotoca J.J., Saa-Requejo A., Moratiel R., Dalezios N., Faraslis I., Tarquis A.M. Statistical analysis for satellite-index-based insurance to define damaged pasture thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019;19(8):1685–1702. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1685-2019>
14. Cybenko G.V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function. *Mathematics of Control Signals and Systems*. 1989;2(4):303–314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>
15. Ma L., Liu Y., Zhang X., Ye Y., Yin G., Johnson B.A. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019;152:166–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
16. 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>
17. Остапенко С.П., Месяц С.П. Геоинформационный подход к корректировке спутниковых данных мониторинга восстановления природных экосистем на примере складированных отходов обогащения руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):94–105. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_94
18. Nill L., Ullmann T., Kneisel C., Sobiech-Wolf J., Baumhauer R. Assessing spatiotemporal variations of Landsat land surface temperature and multispectral Indices in the Arctic Mackenzie delta region between 1985 and 2018. *Remote Sensing*. 2019;11(19):2329. <https://doi.org/10.3390/rs11192329>
19. Jimenez-Munoz J.C., Cristobal J., Sobrino J.A., Soria G., Ninyerola M., Pons X. et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009;47(1):339–349. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>
20. Соколова Г.Г. Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений. *Acta Biologica Sibirica*. 2016;2(3):34–45. <https://doi.org/10.14258/abs.v2i3.1453>
21. Markov B. Comparison of remote sensing-based indexes for monitoring drought impact on forest ecosystems. In: *Annual of Sofia University "st. Kliment Ohridski" Faculty of Geology and Geography. Book 2: Geography*. 2018. Vol. 111, pp. 237–246. Available at: https://www.uni-sofia.bg/index.php/bul/content/download/210057/1421013/version/1/file/15_Ann_Tom_111_geography_237-246.pdf

References

1. Gornyy V.I., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Tronin A.A. Trends in remote sensing methods for geological and environmental applications. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023;20(2):9–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-9-38>
2. Werner T.T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6:993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
3. McKenna P.B., Lechner A.M., Phinn S., Erskine P.D. Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: A global systematic review. *Remote Sens*. 2020;12(21):3535. <https://doi.org/10.3390/rs12213535>
4. Li T., Wu M., Duan C., Li S., Liu C. The effect of different restoration approaches on vegetation development in metal mines. *Science of The Total Environment*. 2022;806-2:150626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150626>
5. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021;32:1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
6. 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. *Russian Mining Industry*. 2018;(6):72–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-6-142-72-75>

7. Filippini F., Valentini E., Xuan A.N., Guerra C.A., Wolf F., Andrzejak M., Taramelli A. Global MODIS fraction of green vegetation cover for monitoring abrupt and gradual vegetation changes. *Remote Sensing*. 2018;10(4):653. <https://doi.org/10.3390/RS10040653>
8. Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Y., Gordienko O.A., Omarov R.S., Dubacheva A.A. The relationship between the seasonal dynamics of surface temperature and NDVI in urbanized areas of an arid zone. the case of the Volgograd agglomeration. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(12):1576–1585. <https://doi.org/10.1134/S0001433821120197>
9. Mesyats S.P., Ostapenko S.P. Recovery dynamics of lands disturbed by mining operations due to self-organizing principle of natural systems and its forecasting using satellite data. *Russian Mining Industry*. 2020;(6):137–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-6-137-142>
10. Labib S.M., Lindley S., Huck J.J. Scale effects in remotely sensed greenspace metrics and how to mitigate them for environmental health exposure assessment. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2020;82:101501. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101501>
11. Elsakov V.V. The influence of aerospace imagery spatial resolution on mapping results of tundra vegetation. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023;20(1):176–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-176-188>
12. Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Recovery dynamics of mining-altered natural ecosystems by satellite data. *Journal of Mining Science*. 2022;58(5):839–848. <https://doi.org/10.1134/S1062739122050155>
13. Martín-Sotoca J.J., Saa-Requejo A., Moratíel R., Dalezios N., Faraslis I., Tarquis A.M. Statistical analysis for satellite-index-based insurance to define damaged pasture thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019;19(8):1685–1702. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1685-2019>
14. Cybenko G.V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function. *Mathematics of Control Signals and Systems*. 1989;2(4):303–314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>
15. Ma L., Liu Y., Zhang X., Ye Y., Yin G., Johnson B.A. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019;152:166–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
16. Mesyats S.P., Novozhilova M.Yu., Romyantseva 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>
17. Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Geoinformation approach to correction of satellite data for monitoring restoration of natural ecosystems on the example of stockpiled ore dressing waste. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):94–105. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_94
18. Nill L., Ullmann T., Kneisel C., Sobiech-Wolf J., Baumhauer R. Assessing spatiotemporal variations of Landsat land surface temperature and multispectral indices in the Arctic Mackenzie delta region between 1985 and 2018. *Remote Sensing*. 2019;11(19):2329. <https://doi.org/10.3390/rs11192329>
19. Jimenez-Munoz J.C., Cristobal J., Sobrino J.A., Soria G., Ninyerola M., Pons X. et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009;47(1):339–349. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>
20. Sokolova G.G. The influence of terrain altitude, slope exposure and slope degree on plant spatial distribution. *Acta Biologica Sibirica*. 2016;2(3):34–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/abs.v2i3.1453>
21. Markov B. Comparison of remote sensing-based indexes for monitoring drought impact on forest ecosystems. In: *Annual of Sofia University "st. Kliment Ohridski" Faculty of Geology and Geography. Book 2: Geography*. 2018. Vol. 111, pp. 237–246. Available at: https://www.uni-sofia.bg/index.php/bul/content/download/210057/1421013/version/1/file/15_Ann_Tom_111_geography_237-246.pdf

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, заведующий лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

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, 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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.10.2023

Поступила после рецензирования: 09.11.2023

Принята к публикации: 22.11.2023

Article info

Received: 13.10.2023

Revised: 09.11.2023

Accepted: 22.11.2023