

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.882(985):528.88

ИЗУЧЕНИЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ДИНАМИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ, НАРУШЕННЫХ ПРИ ОСВОЕНИИ ГЕОРЕСУРСОВ

С. П. Остапенко, С. П. Месяц

Горный институт КНЦ РАН, E-mail: s.ostapenko@ksc.ru,
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

На основе данных спутниковых наблюдений разработан методический подход к оценке динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов. Учитывались два фактора: вегетационный индекс формирующегося фитоценоза и температура подстилающей поверхности. На примере складированных отходов переработки апатитсодержащих руд выявлен временной ряд вегетационного индекса и температуры поверхности формирующегося фитоценоза в сравнении с фитоценозом окружающего природного ландшафта. Установлено, что восстановление природных экосистем путем создания биологически активной среды обеспечивает более быстрый выход исследуемых параметров на показатели фитоценоза окружающего природного ландшафта. Обоснована возможность использования ретроспективных данных дистанционного наблюдения земной поверхности для объективной оценки динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов в арктических условиях без проведения наземных исследований.

Апатитсодержащие руды, складированные отходы переработки, нарушенные природные экосистемы, фитоценоз окружающего природного ландшафта, динамика восстановления, данные спутниковых наблюдений, вегетационный индекс, температура подстилающей поверхности, панишарпенинг

DOI: 10.15372/FTPRPI20220515

Освоение георесурсов связано с перемещением и складированием значительного объема горных пород, что неизбежно приводит к негативному воздействию на природную среду, в частности к уничтожению фитоценозов — главного компонента природных ландшафтов. В России общая площадь техногенно нарушенных земель в 2020 г. составляла более 1 млн га. Наибольшие площади нарушений природных ландшафтов отмечены в Тюменской области, Республике Саха (Якутия), Красноярском и Забайкальском краях, Амурской и Мурманской областях [1–3].

В современном мире становится актуальной разработка методических подходов к изучению динамики восстановления, что соответствует общему направлению на экологизацию промышленного производства. В качестве источника наблюдений целесообразно использование архивов глобального спутникового мониторинга земной поверхности, накапливающих данные с начала 70-х годов прошлого века [4].

Следует отметить практическое значение привлечения общедоступных данных дистанционных наблюдений Земли с целью анализа экологического состояния нарушенных природных экосистем. Для предприятий, расположенных в Арктической зоне Российской Федерации, верифицируемость предлагаемых решений из-за низкой скорости восстановления природных экосистем приобретает особое значение.

При дешифрировании на спутниковых снимках растительного покрова используется различие его отражательных свойств в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения Солнца [5]. Разработано более ста вегетационных индексов в виде соотношения спектральной яркости каналов многоспектрального спутникового изображения. Наиболее часто используется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Из-за чувствительности протекающих в растениях биохимических и физиологических процессов к внешним факторам изменение отражательных свойств NDVI применяется для оценки техногенного воздействия на природные экосистемы [6–8]. Однако информативность вегетационных индексов, обусловленных биохимическим и биологическим статусом растительного покрова, недостаточна для характеристики экологического состояния нарушенных природных экосистем. Оно может быть охарактеризовано участием экосистем в биогеохимических циклах, обеспечивающих поддержание устойчивого состояния жизни и биосферы в целом [9].

С целью выявления по спутниковым снимкам динамики восстановления природных экосистем используется активная роль растений в формировании цикла воды, сопровождаемого изменением физических параметров среды их обитания. Так, транспирация (испарение воды с листовой поверхности) позволяет растениям поддерживать в дневное время температуру близкой к температуре воздуха. Данный процесс объясняет разницу температур растительного покрова и фоновой температуры складированных отходов переработки минерального сырья, рассматриваемых в качестве примера нарушенных природных экосистем [10]. Синхронное изменение температурного режима и вегетационного индекса земной поверхности используется в качестве индикатора структурных и функциональных нарушений экосистем по индексу MGD I (MODIS Global Disturbance Index) при спутниковых наблюдениях земной поверхности [11]. Для исследования динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, применение индекса MGD I ограничено разрешающей способностью радиометрической системы MODIS, составляющей 1000 м/пиксель. Это эквивалентно усреднению по площади 100 га и недостаточно для разделения на спутниковом изображении нарушенных земель и элементов инфраструктуры горнодобывающего предприятия. Наилучшее пространственное разрешение тепловых снимков — 60 м/пиксель, переведенное программным путем до 30 м/пиксель, предоставлено на некоммерческой основе спутником Landsat [12]. Фактическая погрешность измерения температуры по спутниковым снимкам составляет 1 °C, что соответствует порогу чувствительности, установленной на спутнике радиометрической системы в пикселе приходящего с поверхности Земли излучения [12, 13]. Повышение чувствительности наблюдений температуры возможно за счет обработки множества пикселей, представляющих на спутниковом снимке пространственно-контрастные площадные объекты исследования.

Следует отметить, что температура на спутниковых снимках определяется по тепловому излучению земной поверхности. Необходимость учета множества факторов при обработке тепловых снимков приводит к неоднозначности результатов расчета [14], что осложняет интерпретацию полученных значений температуры. Указанная неопределенность устраняется при переходе от абсолютных значений к разности температур фитоценозов, формирующихся при восстановлении нарушенных земель и окружающего природного ландшафта. Дополнительным

преимуществом такого подхода является наглядность получаемых величин, что немаловажно при поддержке принятия решений по экологической реабилитации территории горнопромышленных регионов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом мониторинга динамики восстановления природных экосистем определены складированные отходы переработки апатитсодержащих руд Хибинской группы месторождений. Производственные отходы подвержены ветровой и водной эрозии вследствие их мелкодисперсности и бесструктурности и характеризуются наибольшим проявлением факторов, лимитирующих самозарастание. Мониторинговый полигон находится на ограждающей дамбе северо-восточной экспозиции действующего хвостохранилища намывного типа (рис. 1). Максимальная высота ограждающей дамбы на конечной отметке заполнения 200.0 м составляет 89.4 м. Протяженность полигона в длину 1835 м, ширина бермы 15 м, высота откоса 30 м. Проекция откоса по горизонтали 45 м.

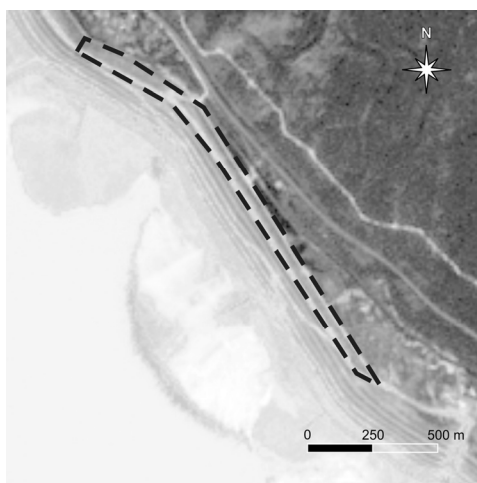


Рис. 1. Спутниковое изображение мониторингового полигона (выделен штриховой линией) на ограждающей дамбе хвостохранилища

Хвостохранилище расположено севернее Полярного круга в центральной части Кольского полуострова в Атлантико-Арктической зоне умеренного климата, отрицательных среднегодовых температур (-2°C), избыточного увлажнения воздуха. Окружающий природный ландшафт относится к группе бореальных (северная тайга), лесной пояс простирается до высоты 370–400 м. Леса состоят из ели, сосны, березы. Предыдущими исследованиями показано, что фитоценоз окружающего природного ландшафта представлен смешанным лесом, который подвержен техногенному аэрозольному воздействию, вследствие чего отмечается изменения максимального значения вегетационного индекса и календарного дня его наблюдения [7].

На мониторинговом полигоне складированных отходов переработки минерального сырья с целью пылеподавления посевом создавался растительный покров без нанесения плодородного слоя. Посев включал многолетние злаковые травы совместно с однолетней покровной культурой, обеспечивающей поступление большого количества растительных остатков для образования биологически активной среды с первого года. Создание полимерного покрытия мелкокапельным нанесением водной полимерной эмульсии сразу после посева способствует прекращению ветровой и водной эрозии складированных отходов и улучшению экологического фона корнеобитаемых горизонтов [15]. Исследования показали, что образование биологически ак-

тивной среды увеличивает энергетический потенциал системообразующей функции биоты и скорость формирования фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта в ходе сукцессии (процесса изменения видовой структуры с течением времени), что подтверждается возрастающим временным рядом вегетационного индекса [16].

МЕТОДИКА НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для получения базовой информации выполнялся суточный мониторинг температуры поверхности складированных отходов переработки руд в отсутствие и при наличии растительного покрова в период максимальной вегетации (июль – август).

Измерение температуры проводилось традиционным контактным методом с использованием резистивных платиновых датчиков, изготовленных ООО “Тесей” (г. Дубна). В качестве термочувствительного элемента на керамическую подложку напылялся платиновый слой. Данное решение позволило радикально уменьшить габаритные размеры термочувствительного элемента (менее 5 мм) по сравнению со стандартным решением в виде платиновой проволоки, а также обеспечило чувствительность измерений и минимальный температурный дрейф, достаточные для определения небольших ($0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) суточных колебаний температуры поверхности складированных отходов.

Мониторинг температуры выполнялся на площадках 25 м^2 . Расположение датчиков температуры осуществлялось “конвертом”, подключение — по четырехпроводной схеме, длина экранированных соединительных кабелей составляла 50 м.

Сбор информации проводился в автоматическом режиме на базе многоканальной системы ввода данных RL-40AI (ООО “НИЛ АП”, г. Таганрог) с частотой $0.02\text{--}1.00$ измерений в секунду с усреднением в период опроса данных датчиков. Регистрировались как быстрые, так и медленные суточные изменения температуры поверхности складированных отходов переработки руд. Обработка и хранение поступающих данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения RealView (ООО “НИЛ АП”, г. Таганрог).

При калибровке резистивных платиновых датчиков температуры и контроле стабильности метрологических характеристик регистрирующей системы использовался сертифицированный метрологический комплекс УПСТ-2М (ФГУП ООЗ “Эталон”, г. Омск).

ДАННЫЕ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

При изучении динамики восстановления природных экосистем созданием биологически активной среды применялись данные спутниковой съемки, выполненной Landsat 7 (NASA) в 2000–2021 гг. Для расчета вегетационного индекса и теплового излучения поверхности из массива спутниковых данных отбирались безоблачные снимки, сделанные в полуденное время в период максимальной вегетации (июль – август) при содержании влаги в столбе атмосферы не выше 3 % (по данным наблюдений со спутника MODIS).

Следует отметить, что при съемке Landsat 7 изображение территории формируется в восьми спектральных каналах (многоканальный снимок), пять из которых использовались в данном исследовании. Для каждого пикселя (ячейки) спутникового изображения объектов исследования определялась спектральная плотность излучения в видимом и инфракрасном диапазонах в пяти спектральных каналах с длинами волн 492.4; 661.5; 705.5; 835.0; 11335.0 нм и шириной каналов соответственно 41.0; 31.5; 190.5; 63.0; 1025.0 нм.

Разрешение в горизонтальной плоскости третьего спектрального канала (панхроматического) составляет 15 м/пиксель, разрешение остальных — 30 м/пиксель. Для приведения разрешающей способности спутникового изображения к линейному размеру элементов ограждающей

дамбы хвостохранилища выполнялось комплексирование с панхроматическим каналом. Известно, что процедура комплексирования каналов с низким и высоким пространственным разрешением (паншарпенинг) приводит к искажению исходной спектральной информации [17]. Для повышения воспроизводимости результатов паншарпенинга пикселей, характеризующих состояние растительного покрова, обработка спутниковых данных в видимой и ближней инфракрасной областях спектра проводилась в три этапа.

На первом этапе паншарпенинга для каждого исследуемого объекта (мониторинговый полигон, фитоценоз окружающего природного ландшафта) выделялись пиксели, формирующие изображение объектов в спектральных каналах с разрешением 30 м/пиксель, перекрывающие пиксели панхроматического изображения в соотношении 1:9. Для мониторингового полигона применение процедуры паншарпенинга позволило увеличить число пикселей с 92 до 440, что способствовало повышению информативности массива обрабатываемых данных. Сглаживание зависимости проявления техногенного воздействия в спектральных характеристиках фитоценоза природного ландшафта от расстояния достигалось учетом розы ветров и усреднением данных по 16.8 тыс. пикселям, расположенным вдоль распространения аэрозольного техногенного загрязнения в северном, северо-западном и в перпендикулярном западном, юго-западном направлениях [7].

На втором этапе для каждого объекта определялось соотношение спектральной плотности излучения в областях 519–601, 631–692, 772–898 нм, соответствующих первому, второму, четвертому спектральному каналу, в диапазоне третьего панхроматического канала (515–896 нм) с учетом перекрывания каналов и в соответствии с системой условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{i,k}^j = I_i^j \frac{I_{i,k}^{PAN}}{\sum_j \alpha_{PAN}^j} I_i^j, \\ f_i(\alpha_{PAN}^j) = \max \left\{ \left(I_i^j - \frac{\sum_k I_{i,k}^j}{9} \right)^2 \right\} \rightarrow \min, \\ \sum_j \alpha_{PAN}^j = 1, \\ 0 \leq I_i^j, \quad 0 \leq I_{i,k}^j, \quad 0 \leq I_{i,k}^{PAN}, \quad 0 \leq \alpha_{PAN}^j, \\ i = 1, \dots, n, \quad j = 1, 2, 4, \quad k = 1, \dots, 9 \end{array} \right. \quad (1)$$

где I_i^j — спектральная плотность излучения i -го пикселя в j -м спектральном канале; $I_{i,k}^{PAN}$ — спектральная плотность излучения k -го пикселя панхроматического канала с разрешением 15 м/пиксель, перекрывающегося i -м пикселем спектрального канала с разрешением 30 м/пиксель; α_{PAN}^j — вклад спектральной плотности излучения j -го канала в спектр панхроматического; $I_{i,k}^j$ — спектральная плотность излучения k -го пикселя с разрешением 15 м/пиксель после паншарпенинга i -го пикселя с разрешением 30 м/пиксель, n — количество пикселей разрешением 30 м/пиксель.

В начале обработки данных по соотношению спектральной плотности излучения каналов рассчитывалась спектральная плотность в панхроматическом канале $I_{i,k}^{PAN}$ для пикселей, формирующих изображение исследуемых объектов с разрешением 15 м/пиксель. На следующем

шаге для каждого пикселя каждого спектрального канала I_i^j (разрешение 30 м/пиксель), перекрывающего пиксели высокого разрешения $I_{i,k}^j$, рассчитывалась невязка с усредненной по девяти пикселям высокого разрешения спектральной плотностью излучения. Поиск согласованных оценок параметров паншарпенинга изображений исследуемых объектов проводился минимизацией невязки спектральной плотности излучения пикселей высокого и низкого разрешения, составившей менее 10 %.

На третьем этапе паншарпенинга для изображений фитоценоза окружающего природного ландшафта и фитоценоза, формирующегося на мониторинговом полигоне, определялись пиксели высокого разрешения, характеризующие транспортные бермы ограждающей дамбы хвостохранилища, с низкими значениями вегетационного индекса (менее 0.25) для исключения из дальнейшего рассмотрения. Расчет вегетационного индекса проводился с использованием спектральной плотности излучения в четвертом и втором каналах по известной формуле

$$NDVI = \frac{I_{i,k}^4 - I_{i,k}^2}{I_{i,k}^4 + I_{i,k}^2}, \quad (2)$$

здесь $I_{i,k}^4$, $I_{i,k}^2$ — спектральная плотность излучения четвертого и второго спектральных каналов спутникового изображения с длинами волн 661.5 и 835.0 нм соответственно, с улучшенным после паншарпенинга разрешением 15 м/пиксель [18].

Плотность излучения в четвертом и втором спектральных каналах после паншарпенинга корректировалась с целью учета влияния на вегетационный индекс неравномерности освещенности, связанной с затенением поверхности растительностью, в соответствии с разработанным алгоритмом (данная тема исследуется в других публикациях авторов). Выявлялась корреляция спектральной плотности излучения в каналах спутникового изображения фитоценоза окружающего природного ландшафта с суммарной спектральной плотностью излучения в объединенном диапазоне 1, 2, 4 каналов (длина волн 519–898 нм), характеризующей его освещенность, при этом коэффициенты корреляции составили 0.75–0.99. Коррекция проводилась рекурсивно в соответствии с системой условий

$$\begin{cases} \tilde{I}_{i,k}^j = a_1^j \sum_j I_{i,k}^j + a_2^j, \\ f_i(a_1^j, a_2^j) = \max \left\{ \sum_k (\tilde{I}_{i,k}^j - I_{i,k}^j)^2 \right\} \rightarrow \min, \\ 0 \leq \tilde{I}_{i,k}^j, \quad 0 \leq I_{i,k}^j, \\ i = 1, \dots, n, \quad j = 1, 3, 4, \quad k = 1, 9, \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{I}_{i,k}^j$ — спектральная плотность излучения, откорректированная с учетом затенения; a_1^j , a_2^j — коэффициенты регрессионного уравнения. Увеличение невязки спектральной плотности излучения, откорректированной по суммарной спектральной плотности излучения в первом, втором и четвертом каналах, и ее значений, полученных в результате паншарпенинга, интерпретировалось наличием существенного затенения поверхности. Расчет вегетационного индекса проводился подстановкой в уравнение (2) откорректированных значений $\tilde{I}_{i,k}^j$ второго, четвертого спектральных каналов для характеризующих растительный покров пикселей с разрешением 15 м/пиксель.

Интенсивность собственного теплового излучения земной поверхности в отсутствие иных источников тепла определяется радиационным балансом. В этой связи результаты паншарпенинга спутниковых данных в видимой и ближней инфракрасной областях спектра использовались для паншарпенинга пикселей теплового изображения. Учитывалась корреляция спектральной плотности излучения объектов исследования в тепловом диапазоне с суммарной спектральной плотностью излучения в диапазоне длин волн 519–898 нм, характеризующей интенсивность отраженного растительным покровом потока солнечной радиации. Коэффициенты корреляции составили 0.62–0.77. Коррекция проводилась рекурсивным расчетом в соответствии с системой условий

$$\begin{cases} I_{i,k}^5 = a_1^5 \sum_j I_{i,k}^j + a_2^5, \\ f_i(a_1^5, a_2^5) = \max \left\{ \left(I_i^5 - \frac{\sum_k I_{i,k}^5}{9} \right)^2 \right\} \rightarrow \min, \\ 0 \leq I_{i,k}^j, 0 \leq I_{i,k}^5, \\ i = 1, \dots, n, j = 1, 3, 4, k = 1, \dots, 9. \end{cases} \quad (4)$$

В уравнении (4) обозначение переменных те же, что для систем (1), (3), верхний индекс “5” соответствует отнесению переменных к пятому спектральному (тепловому) каналу. В результате минимизации среднеквадратичного отклонения полученных паншарпенингом пикселей высокого разрешения погрешность расчета спектральной плотности теплового излучения не превышала 20 %.

При определении температуры земной поверхности по спутниковым данным использовалась расчетная схема, применявшаяся для расположенных в арктических условиях территорий:

$$\begin{cases} BT_{i,k} = \frac{K_2}{\ln(K_1/I_{i,k}^5 + 1)}; \\ \gamma_{i,k} = \frac{(BT_{i,k})^2}{b_\gamma I_{i,k}^5}; \quad \delta = BT_{i,k} - \frac{(BT_{i,k})^2}{b_\gamma}; \\ \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{m,l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix}; \quad T = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 I_{i,k}^5 + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta; \quad b_\gamma = 1277 \text{ K}; \\ i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, 9, m = l = 3, \end{cases} \quad (5)$$

где $BT_{i,k}$ — радиояркостная температура; $I_{i,k}^5$ — спектральная плотность излучения в пятом спектральном канале после паншарпенинга; K_1, K_2 — переводные коэффициенты [12]; ψ — параметры атмосферной коррекции, рассчитанные с учетом содержания влаги в столбе атмосферы w и квадратной 3×3 матрицы коэффициентов $c_{m,l}$, выбор и алгоритм расчета которых приведен в работах [19, 20]. Эмиссионная способность земной поверхности ε на объектах исследования оценивалась по эмпирическому корреляционному уравнению, предложенному в [21]: $\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI)$.

Результаты расчета эмиссионной способности земной поверхности сверялись с данными многолетних наблюдений из базы GED (Global Emissivity Databank) [22]. Обработка спутниковых данных, статистические расчеты проводились с использованием некоммерческого программного обеспечения: геоинформационной системы QGIS и программной среды R [23, 24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг температурного режима поверхности складированных отходов рудообогащения показал синусоидальный ход температуры как при наличии, так и в отсутствие растительного покрова (рис. 2а). Для обоих вариантов характерна сглаженность хода температур, обусловленная круглосуточной освещенностью Солнцем в условиях полярного дня. Без растительного покрова минимум и максимум температур наблюдаются в 3 и 15 ч, что соответствует данным многолетних наблюдений [25].

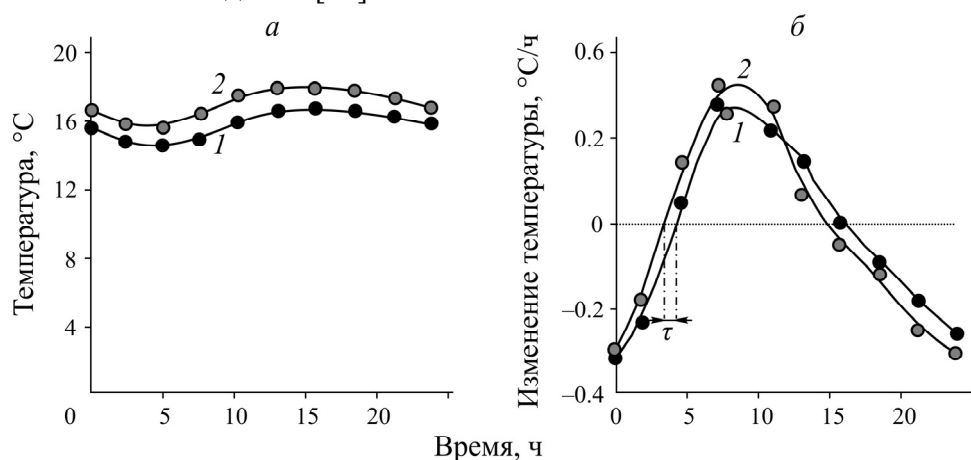


Рис. 2. Температурный режим поверхности складированных отходов рудообогащения по данным наземных наблюдений в присутствии (1) и без растительного покрова (2): а — температура поверхности; б — производная температуры поверхности

Наличие растительного покрова уже на стадии сеяного злакового фитоценоза проявляется в снижении температуры поверхности на 1.2–1.6 °C в течение суток (рис. 2а). Это объясняется одновременно несколькими обстоятельствами: увеличением испарения воды за счет транспирации растений, приводящей к снижению теплового потока в субстрат; изменением альбедо поверхности; изменением конвективной и радиационной теплопроводности на границе с приземным слоем воздуха. Более позднее достижение температурных минимума и максимума при наличии растительного покрова объясняется изменением условий теплопередачи на границе с приземным слоем воздуха, что видно по расхождению во времени нулевых значений производной на $\tau \approx 1$ ч (рис. 2б). Различия температур поверхности при наличии и без растительного покрова корректно измерять в одной фазе суточного хода, оно составляет около 2 °C.

Динамика формирования фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта в ходе сукцессии сеяного без нанесения плодородного слоя злакового фитоценоза на откосе ограждающей дамбы хвостохранилища (мониторинговый полигон) в сравнении с фитоценозом окружающего природного ландшафта изучалась по изменению значений вегетационного индекса и температуры поверхности за период наблюдений с 2000 по 2021 г. (рис. 3).

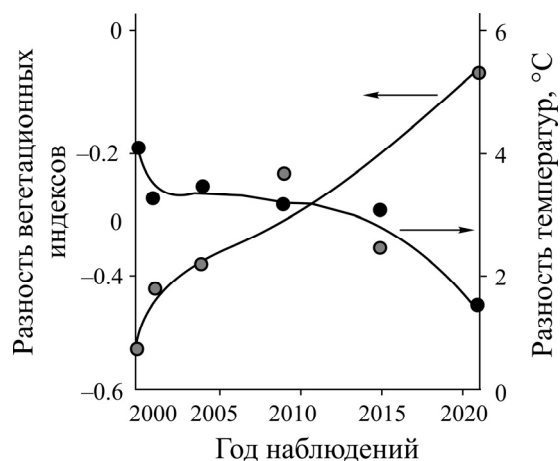


Рис. 3. Динамика изменения вегетационного индекса и температуры поверхности фитоценоза, формирующегося на мониторинговом полигоне ограждающей дамбы хвостохранилища, в сравнении с фитоценозом окружающего природного ландшафта по данным спутниковых наблюдений

Динамика восстановления природных экосистем созданием биологически активной среды характеризуется уменьшением со временем различий вегетационного индекса и температуры поверхности в сравнении с фитоценозом окружающего природного ландшафта. Отдельно следует отметить, что различие температуры на луговой стадии сукцессии сеяного злакового фитоценоза на мониторинговом полигоне с фитоценозом окружающего природного ландшафта выше измеренных в ходе полевых исследований на 3–4 °C. Это хорошо согласуется с данными [10].

Из рис. 3 видно, что исследуемые параметры фитоценоза, формирующегося на ограждающей дамбе хвостохранилища, близки фитоценозу окружающего природного ландшафта в течение всего времени наблюдений. Для наглядности полученные в ходе исследования данные сведены на один график (рис. 4).

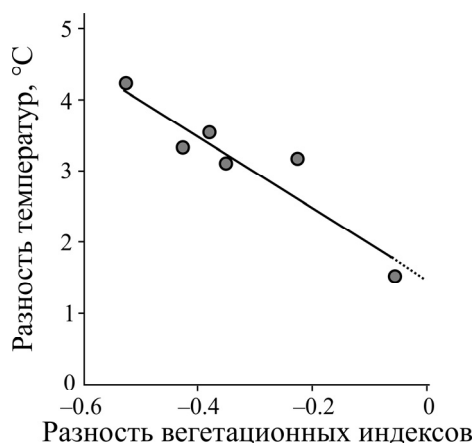


Рис. 4. Корреляция вегетационного индекса и температуры поверхности фитоценоза, формирующегося на мониторинговом полигоне ограждающей дамбы хвостохранилища, в сравнении с фитоценозом окружающего природного ландшафта по данным спутниковых наблюдений

В рамках предлагаемого решения динамика формирования фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта при восстановлении нарушенных земель обуславливает наличие очень сильной (по шкале Чеддока) антибатной корреляции (коэффициент 0.93) вегетационного индекса и температуры поверхности мониторингового полигона.

Текущее состояние формирующегося фитоценоза на мониторинговом полигоне характеризуется минимальным различием вегетационного индекса с фитоценозом окружающего природного ландшафта, что хорошо согласуется с результатами наземных наблюдений видового состава растений, свидетельствующими о формировании фитоценоза со структурой окружающего природного ландшафта [14, 15]. При этом следовало ожидать минимального превышения температуры поверхности мониторингового полигона над температурой поверхности окружающего природного ландшафта.

Температура поверхности мониторингового полигона выше температуры окружающего природного ландшафта на 1.5 °C (рис. 4). Это объясняется совокупным проявлением нескольких разнонаправленных факторов: температурным режимом гидротехнического сооружения, различием фаз суточного цикла температуры поверхности техногенного и природного ландшафта, топографией откоса ограждающей дамбы хвостохранилища, микроклиматическими условиями.

В условиях Арктики температурный режим земной поверхности является одним из факторов, определяющих биологическую активность растений. В этой связи представляет интерес изучение по спутниковым данным теплового поля исследуемых объектов при восстановлении природных экосистем.

ВЫВОДЫ

Для оценки состояния фитоценоза, формирующегося при восстановлении природных экосистем созданием биологически активной среды, разработан алгоритм комплексной оценки состояния фитоценоза по данным оптических наблюдений отражающей способности (вегетационный индекс), а также согласно регистрации теплофизических изменений поверхности по собственному тепловому излучению (температура).

Разработана процедура паншарпенинга, обеспечивающая согласование пространственного разрешения данных Landsat с конструктивными размерами ограждающей дамбы гидротехнического сооружения, что позволяет использовать уникальную по длительности накопления информацию дистанционных наблюдений земной поверхности в оптическом и тепловом диапазонах для мониторинга динамики восстановления природных экосистем.

Согласование информации пяти из восьми спектральных каналов, формирующих спутниковый многоканальный снимок, при расчете параметров динамики восстановления природных экосистем характеризует информационную достаточность результатов для повышения верифицируемости предлагаемых решений.

В результате проведенного анализа ретроспективных спутниковых данных установлен быстрый выход параметров формирующегося в арктических условиях фитоценоза на показатели фитоценоза окружающего природного ландшафта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **О состоянии** и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ имени М. В. Ломоносова, 2021. — 864 с.
2. **Наумов И. В.** Исследование пространственных диспропорций в процессах нарушения и рекультивации земельных ресурсов в России // Изв. УГГУ. — 2019. — № 4. — С. 142 – 151.
3. **Иванов А. Н., Игнатьева М. Н., Юрак В. В., Пустохина Н. Г.** Проблемы восстановления земель, нарушенных при разработке месторождений полезных ископаемых // Изв. УГГУ. — 2020. — № 4. — С. 218 – 227.

4. **Wulder M. A., White J. C., Loveland T. R., Woodcock C. E., Belward A. S., Cohen W. B., Fosnight E. A., Shaw J., Masek J. G., and Roy D. P.** The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sensing Env.*, 2016, Vol. 185. — P. 271–283.
5. **Yengoh G. T., Dent D., Olsson L., Tengberg A. E., and Tucker III C. J.** Use of the normalized difference vegetation index (ndvi) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations, Springer, 2016. — 110 p.
6. **Калабин Г. В.** Количественная экологическая оценка техногенных воздействий на территорию размещения горнодобывающих предприятий по ответной реакции биоты // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 168–177.
7. **Месяц С. П., Остапенко С. П.** Прогноз техногенного воздействия горнопромышленных предприятий на состояние природной среды по данным спутниковых наблюдений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 181–187.
8. **Ле Хунг Чинь, Зеньков И. В., Тхи Тху Нга Нгуен, Юронен Ю. П.** Исследование изменения состояния растительного покрова в районе открытой разработки месторождения медных руд Шинь Куен во Вьетнаме по данным спутниковой съемки // Горн. журн. — 2022. — № 2. — С. 88–92.
9. **Ковда В.А.** Проблемы защиты почвенного покрова и биосферы планеты. — Пушино, 1989. — 155 с.
10. **Li Y., Zhao M., Motesharrei S., Mu Q., Kalnay E., and Li S.** Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations, *Nature Communications*, 2015, No. 6, Article ID 6603.
11. **Mildrexler D. J., Zhao M., Heinsch F. A., and Running S. W.** A new satellite-based methodology for continental scale disturbance detection, *Ecol. Appl.*, 2007, Vol. 17. — P. 235–250.
12. **Landsat 7 Data Users Handbook.** EROS Sioux Falls, South Dakota. — 2019. — 139 p.
13. **Грищенко М. Ю., Михайлюкова П. Г.** Сопоставление наземных и космических данных для исследования пространственной дифференциации теплового поля природной территории (на примере острова Кунашир, Большая Курильская гряда) // Геодезия и картография. — 2022. — № 3. — С. 35–43.
14. **Vlassova L., Fernando P.-C., Hector Nieto, and Pilar Martín** Assessment of methods for land surface temperature retrieval from landsat-5 tm images applicable to multiscale tree-grass ecosystem modeling, *Remote Sensing*, 2014, No. 6. — P. 4345–4368.
15. **Месяц С. П., Новожилова М. Ю., Румянцева Н. С., Волкова Е. Ю.** Научное обоснование восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов // Горн. журн. — 2019. — № 6. — С. 77–83.
16. **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 // Горн. пром-сть. — 2021. — № 6. — С. 87–91.
17. **Farzaneh Dadrass Javan, Farhad Samadzadegan, Soroosh Mehravar, Ahmad Toosi, Reza Khatami, and Alfred Stein** A review of image fusion techniques for pan-sharpening of high-resolution satellite imagery, *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing*, 2021, Vol. 171. — P. 101–117.
18. **Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., and Deering D. W.** Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Proc. Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium NASA. Greenbelt SP-351*, 1974. — P. 309–317.
19. **Nill L., Ullmann T., Kneisel C., Sobiech-Wolf J., and 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, Vol. 11. — Article ID 2329.
20. **Jimenez-Munoz J. C., Cristobal J., Sobrino J. A., Barres G. S., Ninyerola M., and Pons X.** Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data, *Geosci. Remote Sens.*, 2009, Vol. 47. — P. 339–349.

21. **Van de Griend A. A. and Owen M.** On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface, *Int. J. Remote Sensing*, 1993, Vol. 14. — P. 1119–1131.
22. **Hulley G. C. and Hook S. J.** Generating consistent land surface temperature and emissivity products between ASTER and MODIS data for earth science research. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 4. — P. 1304–1315.
23. **QGIS Development Team.** **QGIS Geographic Information System**, Software Version 3.18.1. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
24. **R. R Development Core Team.** **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. <http://www.R-project.org>
25. **Научно-прикладной справочник по климату СССР.** Многолетние данные. Мурманская область. — Л.: Гидрометиздат, 1988. — 314 с.

Поступила в редакцию 21/VII 2022

После доработки 12/IX 2022

Принята к публикации 21/IX 2022