

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НА УЧАСТКАХ РАЗРЕЗА «НАЗАРОВСКИЙ» С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Л.С. Миков<sup>1</sup>, Е.Л. Счастливцев<sup>1</sup>, В.А. Андроханов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
Кемерово, Россия, e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru

<sup>2</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Важнейшей проблемой ведения горных работ открытым способом является разрушение и уничтожение не только плодородного слоя почвы, но и растительных сообществ. Вынос глубинных пород на земную поверхность усугубляет условия последующей рекультивации нарушенных земель. Рекультивация является наиболее эффективным методом вовлечения нарушенных земель в хозяйственный оборот. Одним из наиболее эффективных способов контроля их состояния является дистанционный (космический) мониторинг с использованием мультиспектральных спутниковых изображений. На примере разреза «Назаровский» рассмотрены вопросы применения дистанционных методов мониторинга для оценки состояния рекультивированных, нарушенных горными работами земель. В результате исследования на основе данных за июль и август 2020 г. с космического аппарата Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м/пиксель были построены карты индексов, таких как нормализованный относительный индекс растительности, индекс растительности с коррекцией по почве, а также карты различий между этими индексами за разные даты съемки и графики их значений по профилю для каждого района исследования. Кроме того, для уточнения результатов дополнительно были рассчитаны показатели содержания хлорофилла и влаги в листе.

**Ключевые слова:** разрез «Назаровский», рекультивация, данные дистанционного зондирования, беспилотный летательный аппарат, Normalized Difference Vegetation Index, Soil-Adjusted Vegetation Index, Chlorophyll content in the leaf, Canopy Water Content.

**Для цитирования:** Миков Л. С., Счастливцев Е. Л., Андроханов В. А. Оценка эффективности рекультивации на участках разреза «Назаровский» с помощью данных дистанционного зондирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 70–83. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_70.

### Reclamation efficiency assessment at Nazarovo open pit mine using remote sensing

L.S. Mikov<sup>1</sup>, E.L. Schastlivtsev<sup>1</sup>, V.A. Androkhonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center for Information and Computational Technologies,  
Kemerovo, Russia, e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru

<sup>2</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The major concern in open pit mining is damage and destruction of rich soil layer and plant communities. Removal of deep-seated rocks to ground surface exacerbates reclamation of mining-disturbed land later on. Reclamation is the most effective approach to returning the damaged land to the economic activity. The optimum method of land monitoring is the remote (space) sensing monitoring using the multispectral satellite images. The application of the remote monitoring in mining-damaged and reclaimed land assessment is discussed as a case-study of Nazarovo open pit mine. Using the Sentinel-2 satellite data with spatial resolution of 10 m/pixel for July and August 2020, the maps of the normalized difference vegetation index and the soil adjusted vegetation index are plotted together with the maps of difference between these indexes per survey dates and with the profile graphs of these indexes per each test site. Furthermore, the contents of chlorophyll and moisture in leaves are additionally calculated.

**Key words:** Nazarovo open pit mine, reclamation, remote sensing data, unmanned air vehicle.

**For citation:** Mikov L. S., Schastlivcev E. L., Androkhonov V. A. Reclamation efficiency assessment at Nazarovo open pit mine using remote sensing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):70-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_70.

## Введение

ЗАО «Разрез «Назаровский» — угледобывающее предприятие города Назарово Красноярского края, разрабатывает месторождение бурых углей. Сдан в эксплуатацию в 1951 г. с производственной мощностью 1,5 млн т угля в год. Сегодня объем добычи на предприятии составляет более 4 млн т. В настоящее время разрез ориентирован в основном на одного потребителя — Назаровскую

ГРЭС, направляя станции 95 — 98% добытого угля. В среднем это 4,5 млн т в год.

В связи с этим горные работы оптимизированы: законсервирован Чулымский участок, остановлена гидровскрыша, которая производилась на нем, Центральный блок отработан в конце 1980-х годов и рекультивирован. Разработка этого участка проводилась открытым способом более 35 лет. В ходе разработки



1 – Ачинский участок; 2 – Чулымский участок; 3 – Центральный блок Назаровского разреза

Рис. 1. Разрез «Назаровский». Подложка Google Maps (2020 г.)

Fig. 1. Nazarovo open pit mine. Google Map Base Layer (2020)

данного участка месторождения были сформированы отвалы вскрышных пород, которые в основном размещались в отработанной карьерной выемке железнодорожным транспортом и по бестранспортной схеме отвалообразования [1]. Сегодня добыча угля осуществляется только на Ачинском участке месторождения (рис. 1) [1].

Разрез «Назаровский» проводит рекультивацию с 1976 г. За это время почти 3,5 тыс. га земли вернули в биологический и хозяйственный оборот. На месте карьеров появились леса, искусственные водоемы, например, озеро «Зеркальное», сельскохозяйственные угодья, пастбища и пашни. В 2013 г. совхоз «Ададымский» вспахал, посеял траву, внес удобрение на площади 12 га, на которых сформированы искусственные почвы — техноземы [2]. Также выполнено лесонасаждение на площади порядка 50 га.

В настоящее время по итогам проведенных рекультивационных работ по различным направлениям на территории Центрального блока Назаровского разреза сформировались участки с различной растительностью и видом использования. В ходе лесной рекультивации, которая широко распространена в Сибири [3], созданы лесные насаждения — сосняки. На выровненных участках проведена отсыпка плодородного слоя почвы (ПСП) и сформированы рекультивированные почвы — техноземы [4], на которых естественным образом сформировался злаково-разнотравный фитоценоз.

Часть нарушенной территории оставлена под естественное восстановление растительности и почв — санитарное направление рекультивации. На участках самовосстановления сформировались травянистые фитоценозы с присутствием кустарников и древесных видов. Почвенный покров представлен техноземами и эмбриоземами, молодыми почвами,

свойства которых значительно отличаются от контроля [4–5].

Целью данной работы является оценка состояния растительности на разных участках рекультивации с использованием мультиспектральных снимков, информации, полученной с беспилотного летящего аппарата (БПЛА), и специальных алгоритмов обработки космических снимков.

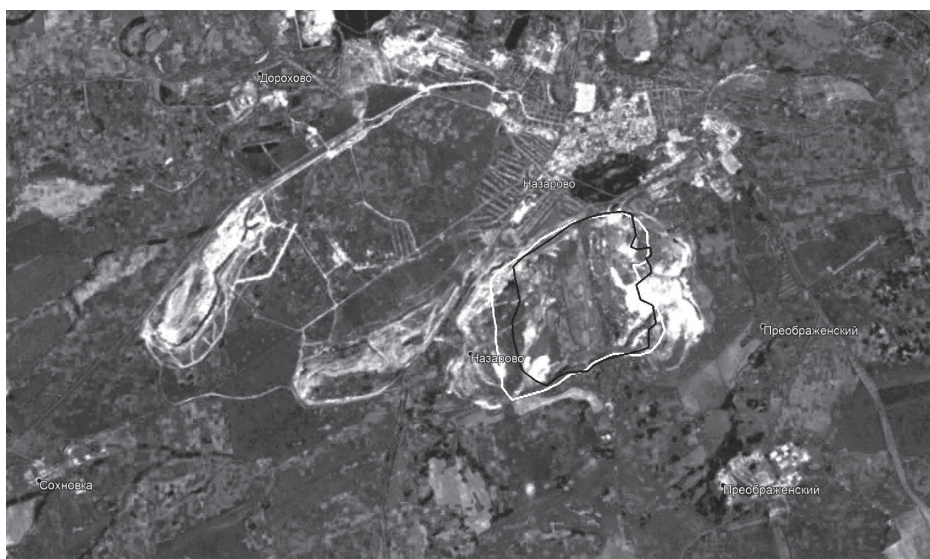
### **Методы**

Исследование проводилось на участках рекультивации Центрального блока разреза «Назаровский» (рис. 2). В мае 2021 г. на этом участке авторами был произведен визуальный контроль территории с помощью БПЛА. В настоящее время на данной территории в результате рекультивационных мероприятий сформированы участки в соответствии с направлением рекультивации: посадки сосны, пастбища и сенокосы, водоемы, участки с самозарастанием.

Для того чтобы понять, как меняется этот участок со временем, были использованы три архивных спутниковых изображения с датами 21.07.1975, 15.06.1980 и 15.07.1989 с космических аппаратов Landsat-2, Landsat-3 и Landsat-4 соответственно. На рис. 2 видны горные работы на разных участках Назаровского разреза, при этом на участке 3 отчетливо выделяется отвал в восточной части участка, а карьерная выемка — в западной.

В настоящее время для мониторинга состояния объектов угледобычи активно используются данные дистанционного зондирования. Об этом свидетельствуют работы российских [6–9] и зарубежных авторов [10–13]. Все это позволяет относительно быстро и эффективно проводить необходимые исследования на больших площадях.

В качестве исходных данных для оценки современного состояния раститель-



Черной и белой линиями выделены примерные границы  
 Рис. 2. Участки Назаровского разреза 1, 2, 3. Снимок Landsat-4 от 15-07-1989  
 Fig. 2. Nazarovo OPM sites 1, 2 and 3. Landsat-4 image as of 15 July 1989

ности на Центральном участке использовалось два оптико-электронных изображения с космического аппарата Sentinel-2 с датами 02.07.2020 и 11.08.2020 [14]. Так как исходное изображение покрывает большую территорию, то при помощи инструмента «Subset» в прог-

рамме SNAP производилась вырезка интересующего участка.

Дополнительно в ходе экспедиции для исследования состояния растительного покрова были выделены точки 1, 2, 3, 4, 5 с учетом сформировавшихся фитоценозов [15] (рис. 3).



1 – точка контроля, чернозем; 2 – край обрыва, переход от лесных посадок к переувлажненному участку; 3 – естественное зарастание, эмбриозем – молодая почва без рекультивации; 4 – технотем – рекультивированная почва с отсыпкой (ПСП); 5 – посадки сосны на поверхности спланированного отвала

Рис. 3. Точки для исследования состояния растительного покрова  
 Fig. 3. Vegetation cover test points

## Результаты

Для первоначальной оценки состояния растительности были произведены расчеты индексов NDVI и SAVI для каждого из исходных изображений. Вся обработка производилась в программе SNAP.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный относительный индекс растительности — простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом) [16–17]. Этот индекс вычисляется по поглощению и отражению растениями лучей красной и ближней инфракрасной зоны спектра. Значения индекса для растительности лежат в диапазоне от 0,20 до 0,95. Чем лучше развита растительность во время вегетации, тем выше значение NDVI. Таким образом, NDVI — это индекс, по которому можно судить о развитии зеленой массы растений во время вегетации.

Индекс растительности с коррекцией по почве (Soil-Adjusted Vegetation Index,

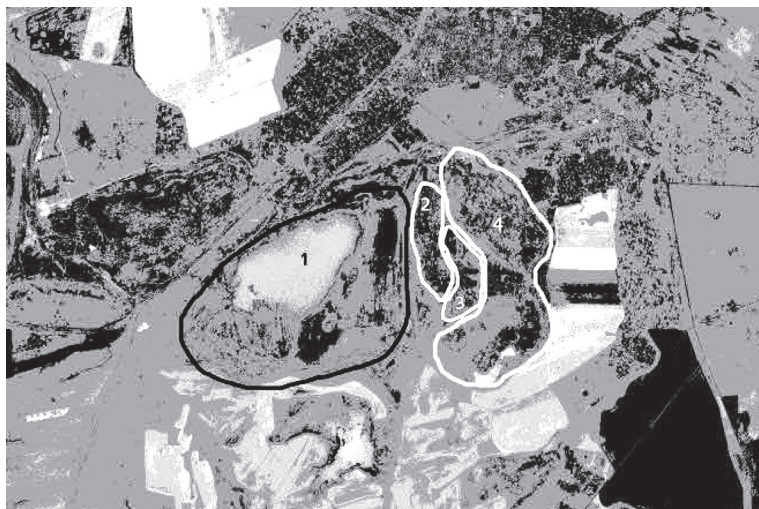
SAVI) — это индекс, который минимизирует влияние яркости почвы с помощью коэффициента коррекции яркости почвы [18–19].

Для оценки динамики изменения состояния растительности за период между съемками были построены карты различий (рис. 4, 5).

Как видно из рис. 4, 5, в основном положительная и отрицательная динамика регистрируются на полях, где активно проводятся сельскохозяйственные работы. Рассмотрим состояние растительности на участке 3 (Центральный блок) подробнее.

Для этого выделим несколько районов исследований (см. рис. 6, 7): 1 — территория карьера (рис. 7, а); 2 — лесные насаждения (рис. 7, б); 3 — технозем, засыпанная часть отвала (рис. 7, в); 4 — часть территории отвала (рис. 7, г).

На рис. 8 представлен график значений NDVI по профилю (толстая черная линия, протянутая слева направо на изображении NDVI) для территории бывшего карьера (район исследований № 1,

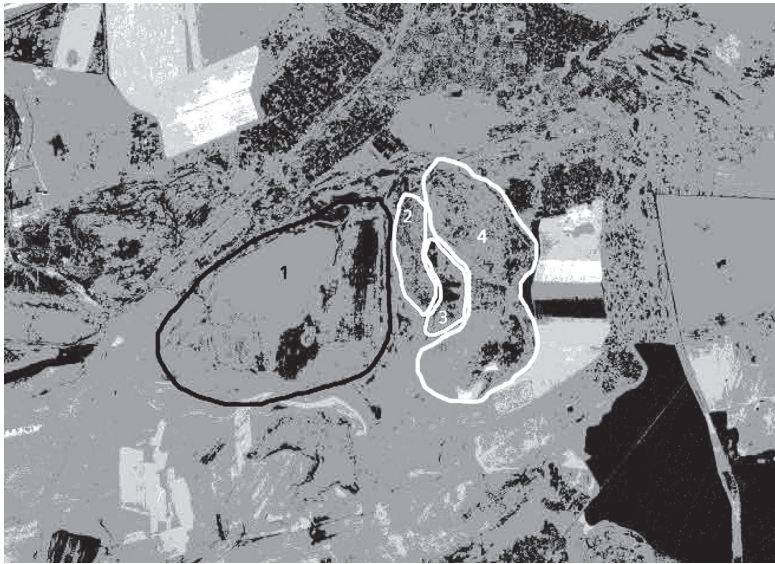


1 — территория карьера; 2 — лесные насаждения; 3 — технозем, засыпанная часть отвала; 4 — часть территории отвала

Области черного цвета — положительная динамика, области белого цвета — отрицательная динамика

Рис. 4. Карта различий NDVI 02.07.2020 и 11.08.2020

Fig. 4. Difference map of NDVI on 2 July 2020 and 11 August 2020



1 – территория карьера; 2 – лесные насаждения; 3 – технозем, засыпанная часть отвала; 4 – часть территории отвала

Области черного цвета – положительная динамика, области белого цвета – отрицательная динамика

Рис. 5. Карта различий SAVI 02.07.2020 и 11.08.2020

Fig. 5. Difference map of SAVI on 2 July 2020 and 11 August 2020

рис. 6). Следует отметить, что на картах индексов профили были проведены так, чтобы они проходили через все типы растительности, находящиеся в данных участках исследований.

Максимальные значения (более 0,8 – соответствуют мощной растительности) регистрируются в юго-западной части бывшего карьера. Это связано с тем, что там находятся плотные лесные насажде-



Рис. 6. Районы исследований на участке 3 (Центральный блок)

Fig. 6. Test areas at site 3 (Central Block)

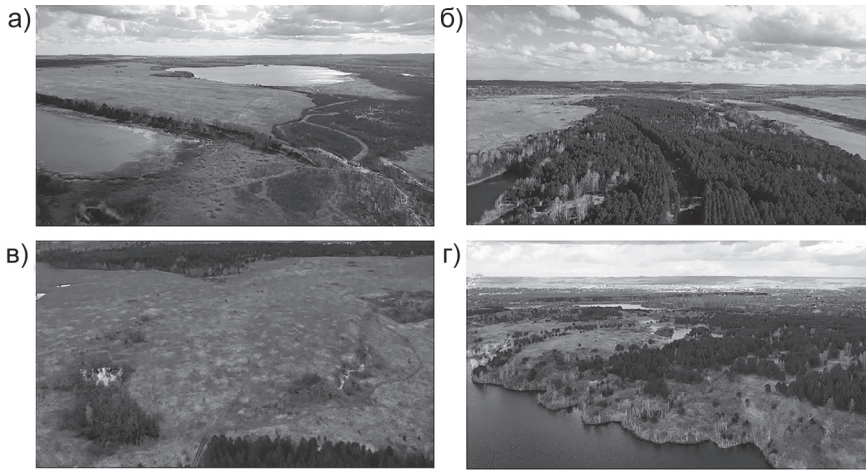


Рис. 7. Виды территории выбранных участков исследований: территория карьера (а); лесные насаждения на отвале (б); технозем, засыпанная ПСП часть отвала (в); бывший отвал, естественное зарастание (г)  
 Fig. 7. Selected test areas: open pit mine (a); forest stock on waste dump (b); man-made soil, waste dump area covered with rich soil layer (v); former waste dump, natural healing (g)

ния и участок с отсыпкой ПСП, который используется под сенокос. Минимальные значения (около 0,5 — умеренный уровень растительности) регистрируются на участках, представленных полями и пастбищами с естественным зарастанием. Здесь растительность представлена в виде травы (сухой прошлогодней и свежей).

На рис. 9 представлен график значений NDVI по профилю (черная толстая линия, протянутая сверху вниз на изоб-

ражении NDVI) для территории лесных насаждений (район интереса № 2, рис. 6).

Максимальные значения (более 0,8 — соответствуют мощной растительности) регистрируются почти на всей территории хвойного леса, лишь в южной части леса имеется небольшой участок с сухими деревьями, о чем свидетельствует резкий провал в конце графика (значения менее 0,4 — слабый уровень растительности). Это вызвано прошедшим здесь пожаром, и поэтому лесные

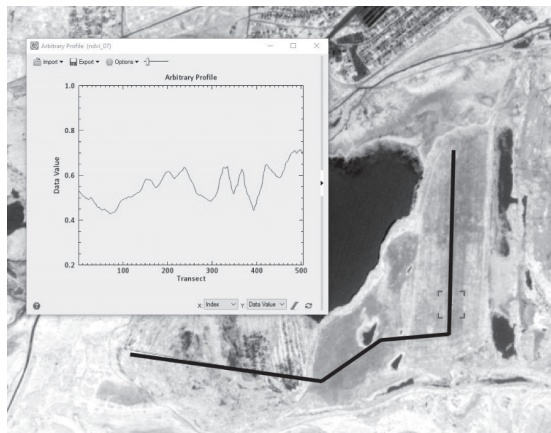


Рис. 8. График значений NDVI по профилю. Территория бывшего карьера. 02.07.2020  
 Fig. 8. NDVI profile graph. Former open pit area. 02.07.2020

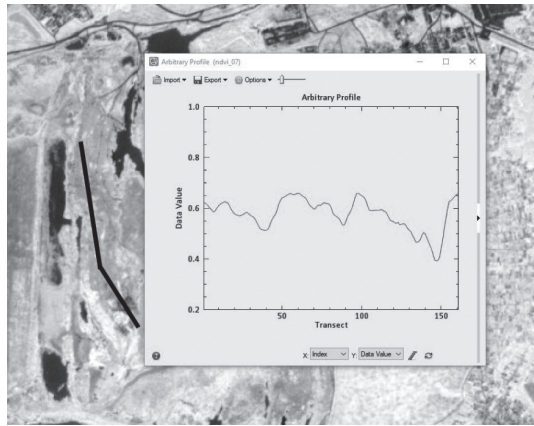


Рис. 9. График значений NDVI по профилю. Территория лесных насаждений. 02.07.2020  
 Fig. 9. NDVI profile graph. Forest stock area. 02.07.2020

культуры характеризуются пониженными показателями NDVI.

На рис. 10 представлен график значений NDVI по профилю (черная толстая линия, протянутая сверху вниз на изображении NDVI) для территории технозема с отсыпкой ПСП (район исследований № 3, рис. 6).

Значения NDVI на этой территории лежат в пределах 0,6–0,75, что соответствует сильному уровню растительности, которая представлена здесь в виде травы и невысоких кустарников.

На рис. 11 представлен график значений NDVI по профилю (черная тол-

стая линия, протянутая сверху вниз на изображении NDVI) для территории бывшего отвала (район исследований № 4, рис. 6).

Значения NDVI в этом районе лежат в пределах 0,7–0,85, что соответствует мощному уровню растительности. В северной части бывшего отвала растительность представлена в виде травы и кустарников (значения NDVI 0,7–0,75), а в южной — в виде лесных насаждений (значения 0,8–0,85).

На рис. 12 представлен график значений NDVI по профилю (черная толстая линия, протянутая сверху вниз на изоб-

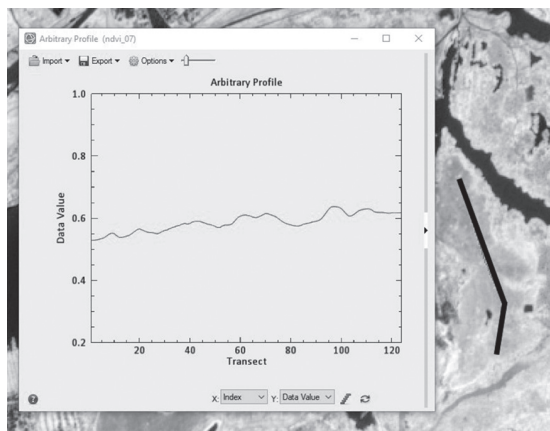


Рис. 10. График значений NDVI по профилю. Технозем, засыпанная часть отвала. 02.07.2020  
 Fig. 10. NDVI profile graph. Man-made soil. 02.07.2020



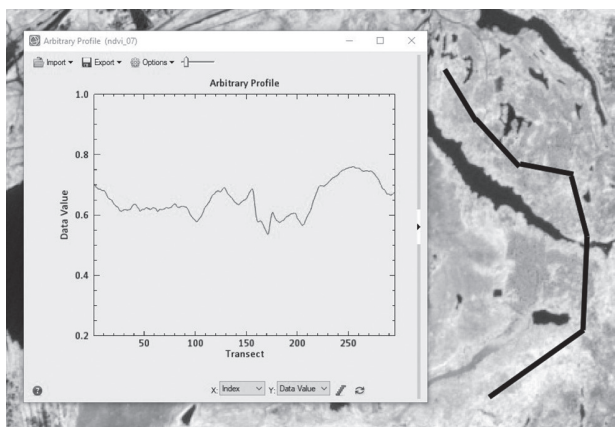


Рис. 11. График значений NDVI по профилю. Территория бывшего отвала, естественное зарастание. 02.07.2020

Fig. 11. NDVI profile graph. Former waste dump, natural healing. 02.07.2020

ражении NDVI) для территории контроля (чернозем), находящейся западнее действующего участка горных работ (точка 1 на рис. 3).

Из графика на рис. 12 видно, что значения NDVI на этой территории находятся в переделе 0,6 – 0,75 (растительность представлена в виде травы и единичных кустарников). Эти значения примерно такие же, как и на рекультивированной части отвала (рис. 10).

Поскольку индекс NDVI является общим случаем расчета содержания биомассы, то проведено исследование с

целью получения более тонких параметров состояния растительности. В качестве инструмента использовался процессор вычисления биофизических величин с космического аппарата Sentinel-2 (Biophysical Processor в пакете SNAP). Данный алгоритм специально разработан для обработки данных с этого спутника, учитывает все спектральные каналы, особенно инфракрасного склона. Процессор использует алгоритмы нейронной сети, которые оценивают параметры спектра отражательных характеристик вместе с заданными соответ-

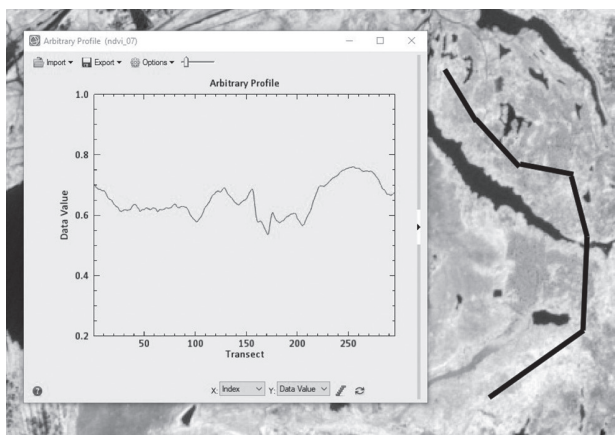
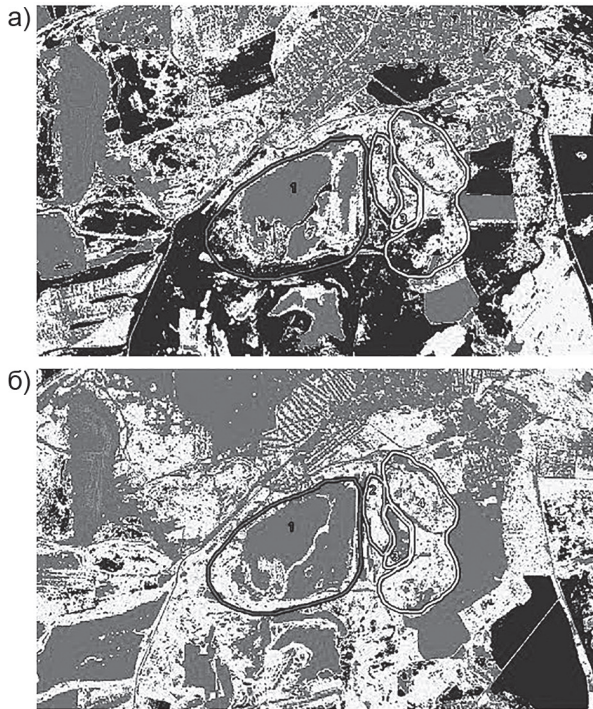


Рис. 12. График значений NDVI по профилю. Территория контроля (чернозём). 02.07.2020

Fig. 12. NDVI profile graph. Check area (chernozem). 02.07.2020

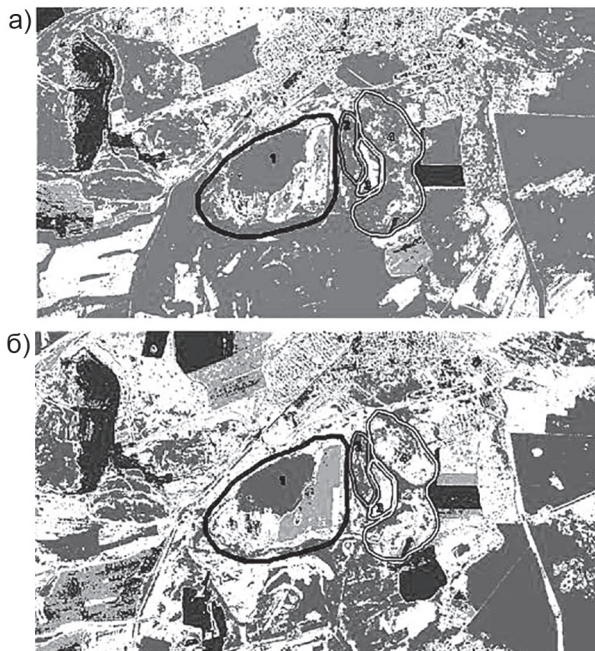


Значения (цвет):  
 серый – от 0 до 50,  
 белый – от 50 до 100,  
 черный – более 100

Цифры от 1 до 4 –  
 районы исследований  
 (рис. 6)

Рис. 13. Индекс САВ: 02.07.2020 (а); 11.08.2020 (б)

Fig. 13. CAB index: 02.07.2020 (a); 11.08.2020 (b)



Значения (цвет):  
 черный – от 0 до 0,01,  
 белый – от 0,01 до 0,05,  
 серый – более 0,05

Цифры от 1 до 4 –  
 районы исследований  
 (рис. 6)

Рис. 14. Индекс CW: 02.07.2020 (а); 11.08.2020 (б)

Fig. 14. CW CAB index: 02.07.2020 (a); 11.08.2020 (b)

вующими углами, определяющими конфигурацию съемки.

В результате обработки исходных снимков рассчитаны следующие индексы и получены соответствующие тематические карты на исследуемую область:

1. Cab (Chlorophyll content in the leaf) – содержание хлорофилла в листе (рис. 13) [20];

2. CW (Canopy Water Content) – содержание влаги в листе (рис. 14) [21].

### **Заключение**

Используя те же районы исследования, что и на рис. 6, отметим следующее:

1. На территории бывшего карьера (район 1, рис. 6) содержание хлорофилла в листе в июле 2020 г. имеет слабую концентрацию, концентрация увеличивается до умеренного и обычного уровней в августе 2020 г. Содержание влаги в листе также увеличивается с июля по август со слабых.

2. На территории лесных насаждений (район 2, рис. 6), содержание хлорофилла в листе в июле 2020 г. имеет слабую концентрацию, а в августе 2020 г. – обычную и большую концентрацию. Значения содержания влаги в листе меняются от умеренных (в июле) до сильных (в августе).

3. На территории засыпанной части отвала (район 3, рис. 6, технозем) значения концентрации хлорофилла в листе меняются с очень слабых (в июле) до умеренных (в августе). Значения содержания влаги в листе меняются от сла-

бых и умеренных (в июле) до обычных и сильных (в августе).

4. На территории бывшего отвала (район 4, рис. 6) значения концентрации хлорофилла в листе меняются с очень слабых (в июле) до умеренных и обычных (в августе). Значения содержания влаги в листе меняются от слабых и умеренных (в июле) до обычных (в августе).

5. На территории контроля (чернозем) значения содержания хлорофилла в листе меняются от слабых (в июле) до обычных (в августе). Значения содержания влаги в листе меняются от слабых (в июле) до умеренных (в августе).

6. Полученные данные свидетельствуют о разном состоянии растительного покрова на разных участках. При этом они незначительно отличаются от контрольного варианта, что показывает достаточно высокий уровень почвенно-экологической эффективности восстановления почвы и растительности на нарушенных участках.

Таким образом, использование методов ДДЗ и обработка данных с БПЛА позволяет оценить влагообеспеченность и состояние растительности на рекультивированных участках. Полученные результаты показали незначительные отличия состояния растительного покрова на бывших нарушенных землях и контрольного варианта, что свидетельствует о постепенном восстановлении растительности и почв на отработанном участке Назаровского угольного разреза до средне зонального.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Андроханов В. А., Госсен И. Н., Уфимцев В. Н. Итоги рекультивации на Назаровском угольном разрезе / Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием. – Сатка: Принтотоника, 2022. – С. 16–19.

2. Андроханов В. А., Овсянникова С. В., Курачев В. М. Техноземы: свойства, режимы, функционирование. – Новосибирск: Наука, 2000. – 200 с.

3. Уфимцев В. И., Стрельникова Т. О., Куприянов О. А. Структура живого напочвенного покрова в сосняках на участках рекультивации Кузбасса // Вестник Томского государственного университета. Биология. — 2018. — № 44. — С. 36–58. DOI: 10.17223/19988591/44/3.
4. Курачев В. М., Андроханов В. А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. — 2002. — № 3. — С. 255–261.
5. Соколов Д. А., Андроханов В. А., Абакумов Е. В. Почвообразование в техногенных ландшафтах: тренды, результаты и отражение в современных классификациях (обзор) // Вестник Томского государственного университета. Биология. — 2021. — № 56. — С. 6–32. DOI: 10.17223/19988591/56/1.
6. Корчагина Т. В., Потапов В. П., Счастливец Е. Л. Цифровой мониторинг природно-техногенной среды для обеспечения экологической безопасности предприятий горнодобывающей отрасли // Уголь. — 2022. — № 6 (1155). — С. 59–67. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-59-67.
7. Гиниятуллина О. Л., Потапов В. П., Миков Л. С. Метод оценки геодинамического и геоэкологического состояния угледобывающих предприятий на основе комплексной обработки радарных и мультиспектральных снимков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S23. — С. 510–516. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-510-516.
8. Зеньков И., Ижмулкина Е., Маглинец Ю., Юронен Ю., Вокин В., Юрковская Г., Логинова Е. Результаты исследования формирования экосистемы на угольных разрезах в западной части центральных районов Кузбасса с использованием ресурсов ДЗЗ // Экология и промышленность России. — 2018. — № 22(2). — С. 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-2-40-45.
9. Гиниятуллина О. Л., Счастливец Е. Л., Ковалев В. А. Опыт применения дистанционного зондирования земли в задачах геоэкологического мониторинга угледобывающего района / Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы V Международной научной конференции. — Красноярск: СФУ, 2018. — С. 283–287.
10. Ali N., Fu X., Ashraf U., Chen J., Thanh H. V., Anees A., Riaz M. S., Fida M., Hussain M. A., Hussain S., Hussain W., Ahmed A. Remote sensing for surface coal mining and reclamation monitoring in the Central Salt Range, Punjab, Pakistan // Sustainability. 2022, vol. 14, article 9835. DOI: 10.3390/su14169835.
11. Alden M. Remote sensing techniques for monitoring coal surface mining and reclamation in the Powder River basin. Environmental Studies, 2009, 70 p.
12. Juanda E. T. Analysis vegetation change on coal mine reclamation using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2021, vol. 716, no. 1, article 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/716/1/012035.
13. Buczyńska A. Remote sensing and GIS technologies in land reclamation and landscape planning processes on post-mining areas in the Polish and world literature / AIP Conference Proceedings. 2020, vol. 2209, article 040002. DOI: 10.1063/5.0000009.
14. Gatti A., Bertolini A. Sentinel-2 products specification document. Cannes, Thales Alenia Space, 2015, 496 p.
15. Ufimtsev V. I., Androkhonov V. A., Ovsyannikova S. V. The impact of a reclamation layer on the restoration of plant communities / VI International Scientific Conference «Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions». 2021, article 00030.
16. Dwivedi R. S. Geospatial technologies for land degradation assessment and management. Boca Raton, CRC Press, 2019, 391 p.
17. Черепанов А. С. Вегетационные индексы // Геоматика. — 2011. — № 2. — С. 98–102.
18. Акиянова Ф. Ж., Ткач К. А. Особенности изменений проективного покрытия растительности по анализу вегетационного индекса SAVI в пределах международного транспортно-коридора на казахстанском участке «Коргас, Достык – порт Актау» // Гидрометеорология и экология. — 2017. — № 4. — С. 32–43.

19. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. 1988. № 25. С. 295 – 309.

20. Jay S., Goretta N., Morel J., Maupas F., Bendoula R. Estimating leaf chlorophyll content in sugar beet canopies using millimeter- to centimeter-scale reflectance imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2017, vol. 198, pp. 173 – 186. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.008.

21. Zhang F., Zhou G. Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: a comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize // *BMC Ecology*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 1 – 12. DOI: 10.1186/s12898-019-0233-0. **WAS**

## REFERENCES

1. Androkhanov V. A., Gossen I. N., Ufimtsev V. N. The results of reclamation at the Nazarovsky coal mine. *Biologicheskaya rekultivatsiya i monitoring narushennykh zemel': materialy XI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Biological reclamation and monitoring of land monitoring: materials of the XI All-Russian Scientific Conference with international participation], Satka, Printonika, 2022, pp. 16 – 19. [In Russ].

2. Androkhanov V. A., Ovsyannikova S. V., Kurachev V. M. *Tekhnozemy: svoystva, rezhimy, funktsionirovanie* [Technozems: properties, modes, functioning], Novosibirsk, Nauka, 2000, 200 p.

3. Ufimtsev V. I., Strel'nikova T. O., Kupriyanov O. A. Structure of the living ground cover in pine forests on dumps of Kuzbass. *Tomsk State University. Journal of Biology*. 2018, no. 44, pp. 36 – 58. [In Russ]. DOI: 10.17223/19988591/44/3.

4. Kurachev V. M., Androkhanov V. A. Classification of soils in technogenic landscapes. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2002, no. 3, pp. 255 – 261. [In Russ].

5. Sokolov D. A., Androkhanov V. A., Abakumov E. V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (review). *Tomsk State University. Journal of Biology*. 2021, no. 56, pp. 6 – 32. [In Russ]. DOI: 10.17223/19988591/56/1.

6. Korchagina T. V., Potapov V. P., Schastlivtsev E. L. Digital monitoring of the natural and man-made environment to ensure the environmental safety of mining enterprises. *Ugol'*. 2022, no. 6 (1155), pp. 59 – 67. [In Russ]. DOI:10.18796/0041-5790-2022-6-59-67.

7. Giniyatullina O. L., Potapov V. P., Mikov L. S. Method for assessing the geodynamic and geocological state of coal mining enterprises based on the integrated processing of radar and multispectral images. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S23, pp. 510 – 516. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-510-516.

8. Zenkov I., Izhmulkina E., Maglinets Yu., Yuronen Yu., Vokin V., Yurkovskaya G., Loginova E. Results of the study of ecosystem formation in coal mines in the western part of the central regions of Kuzbass using remote sensing resources. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, no. 22(2), pp. 40 – 45. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-2-40-45.

9. Giniyatullina O. L., Schastlivtsev E. L., Kovalev V. A. Experience in the use of remote sensing of the earth in the tasks of geocological monitoring of a coal-mining area. *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Regional problems of remote sensing of the Earth: Proceedings of the V International Scientific Conference], Krasnoyarsk, SFU, 2018, pp. 283 – 287. [In Russ].

10. Ali N., Fu X., Ashraf U., Chen J., Thanh H. V., Anees A., Riaz M. S., Fida M., Hussain M. A., Hussain S., Hussain W., Ahmed A. Remote sensing for surface coal mining and reclamation monitoring in the Central Salt Range, Punjab, Pakistan. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 9835. DOI: 10.3390/su14169835.

11. Alden M. *Remote sensing techniques for monitoring coal surface mining and reclamation in the Powder River basin*. Environmental Studies, 2009, 70 p.

12. Juanda E. T. Analysis vegetation change on coal mine reclamation using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 716, no. 1, article 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/716/1/012035.

13. Buczyńska A. Remote sensing and GIS technologies in land reclamation and landscape planning processes on post-mining areas in the Polish and world literature. *AIP Conference Proceedings*. 2020, vol. 2209, article 040002. DOI: 10.1063/5.0000009.

14. Gatti A., Bertolini A. *Sentinel-2 products specification document*. Cannes, Thales Alenia Space, 2015, 496 p.

15. Ufimtsev V. I., Androkhanov V. A., Ovsyannikova S. V. The impact of a recultivation layer on the restoration of plant communities. *VI International Scientific Conference «Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions» 2021*. 2021, article 00030.

16. Dwivedi R. S. *Geospatial technologies for land degradation assessment and management*. Boca Raton, CRC Press, 2019, 391 p.

17. Cherepanov A. S. Vegetation indices. *Geomatica*. 2011, no. 2, pp. 98–102. [In Russ].

18. Akiyanova F. Zh., Tkach K. A. Features of vegetative cover changes analyzing on SAVI within Kazakhstan section (from Khorgas and Dostyk to Aktau) of the international transport corridor. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. 2017, no. 4, pp. 32–43. [In Russ].

19. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988, no. 25, pp. 295–309.

20. Jay S., Goretta N., Morel J., Maupas F., Bendoula R. Estimating leaf chlorophyll content in sugar beet canopies using millimeter- to centimeter-scale reflectance imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2017, vol. 198, pp. 173–186. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.008.

21. Zhang F., Zhou G. Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: a comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. *BMC Ecology*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1186/s12898-019-0233-0.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Миков Леонид Сергеевич<sup>1</sup> — младший научный сотрудник, e-mail: mikov@ict.sbras.ru,

Счастливец Евгений Леонидович<sup>1</sup> — д-р техн. наук, e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru,

Андроханов Владимир Алексеевич — д-р биол. наук, директор Института почвоведения и агрохимии СО РАН, e-mail: androhan@yandex.ru,

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение информатических и вычислительных технологий.

**Для контактов:** Счастливец Е.Л., e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.S. Mikov<sup>1</sup>, Junior Researcher,

e-mail: mikov@ict.sbras.ru,

E.L. Schastlivtsev<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru,

V.A. Androhanov, Dr. Sci. (Biol.),

Institute of Soil Science and Agrochemistry,

Siberian Branch of Russian Academy

of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia,

e-mail: androhan@yandex.ru,

<sup>1</sup> Federal Research Center for Information and Computational

Technologies, 650025, Kemerovo, Russia.

**Corresponding author:** E.L. Schastlivtsev, e-mail: schastlivtsev@ict.sbras.ru.

Получена редакцией 18.07.2022; получена после рецензии 09.09.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 18.07.2022; received after the review 09.09.2022; accepted for printing 10.12.2022.