

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 528.854

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ФИТОЦЕНОЗОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ БИОТЫ ЗЕМЛИ НА ТЕРРИТОРИЯХ ДЕПОНИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ПЫЛИ ДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ю. П. Галченко¹, К. С. Цыгулев², Ю. А. Озарян³,
Т. В. Кожевникова², С. А. Орлов²

¹Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
E-mail: schtrek33@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Вычислительный центр ДВО РАН,
E-mail: kirill.tsygulev@mail.ru, ул. Ким Ю Чена, 65, 680000, г. Хабаровск, Россия

³Институт горного дела ДВО РАН,
E-mail: ozaryanigd@gmail.com, ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия

Представлен алгоритм оценки состояния растительности в области угольного пылевого загрязнения. Описывается решение двух задач: выделение области пылевого загрязнения путем расчета индекса Enhanced Coal Dust Index и последующей кластеризации данных с выбором соответствующих кластеров; расчет средних значений вегетационных индексов в кластере для анализа состояния растительности. При кластеризации применялся метод поиска восхождения к вершине. В качестве исходных данных использовались снимки со спутника Sentinel-2 за весенний и летний периоды времени. Для апробации алгоритма рассматривалась территория Ургальского угольного разреза Хабаровского края. Результаты апробации в рамках одного года показали ухудшение состояния растительности по мере приближения к области карьера.

Дистанционное зондирование Земли, спутниковый снимок, геоэкологический мониторинг, пылевое загрязнение, растительность, кластеризация, вегетационные индексы

DOI: 10.15372/FTPRPI20250319
EDN: SSBGJW

Абсолютное преобладание взрывного и механического способов дезинтеграции вещества литосферы при ведении добычных работ определяют формирование интенсивного потока минеральной пыли различного состава, формирующейся добывающими предприятиями и поступающей в природную среду. Масштаб этой экологической проблемы беспрецедентно огро-

мен, а механизмов эффективного управления не создано. Для экологизации общетехнологической парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса актуален вопрос формирования биологически обоснованной системы нормирования и контроля уровня техногенных воздействий горного производства. Большое значение приобретают исследования взаимосвязей между состоянием фитоценозов и интенсивностью пылевого загрязнения фотосинтезирующей поверхности, информация составляющая — данные дистанционного зондирования Земли с использованием спутниковых снимков. Это позволяет проводить мониторинг и анализ состояния растительности на больших территориях, выявлять зоны повышенного риска для экосистем на всей площади нарушаемых биомов.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Современные методы обработки данных и анализа изображений помогают идентифицировать участки с пылевым загрязнением, а также места с различной степенью деградации растительных сообществ. В [1] предложен индекс NDCI (Normalized Difference Coal Index) для характеристики пылевого загрязнения в районах добычи угля. Определение угольного загрязнения по индексу NDCI затруднительно, так как он дополнительно содержит информацию о почвенном покрове. В этой связи разработан индекс ECDI (Enhanced Coal Dust Index), позволяющий лучше выделять угольное пылевое загрязнение [2].

С целью оценки уровня пылевого загрязнения анализируются спектральные характеристики снежного покрова [3–6]. Для этого берутся пробы снега с разным содержанием угольной пыли, затем с помощью спутниковых снимков в точках отбора проб определяется спектральный профиль. Эти данные необходимы для установления зависимости между уровнем загрязнения снега и степенью его отражательной способности в различных спектральных диапазонах. Помимо анализа спектральных характеристик снега, проводится ранговая корреляция между индексами снежного покрова Normalized Difference Snow Index, Snow Contamination Index, S3 и его физико-химическими характеристиками [7]. Еще один способ оценки пылевого загрязнения — анализ изменений оптической глубины аэрозоля, определяемой с помощью алгоритма густой темной растительности [8].

В [9] разработан индекс ICDI (Index-based Coal Dust Index) для количественной оценки степени загрязнения угольной пылью. В его основе лежит набор отдельных индексов Coal Dust Index, Reverse Coal Dust Index, Normalized Difference Vegetation Index и Modified Normalized Difference Water Index, содержащих информацию о различных типах поверхности. Это позволяет отделять участки с угольным пылевым загрязнением от других объектов, например водоемы или застроенные территории с низкой отражающей способностью.

Оценка и мониторинг состояния растительности в зоне пылевого загрязнения осуществляется различными методами, а именно: визуальное дешифрирование снимков; расчет вегетационных индексов [10, 11]. Рассчитывается корреляция между индексами и характеристиками растительности [12]. Проводится анализ содержания различных вредных веществ в почве, получаемых от распространения угольной пыли [13]. Используются другие методики, разработанные с помощью актуальных индексов, например CMEI (Coal-mine Ecological Index) для оценки экологического состояния территории. Он основан на применяемом к набору из нескольких индексов алгоритме анализа главных компонент. Значению CMEI соответствует первый главный компонент.

Обзор литературы показал большое разнообразие методов определения области пылевого загрязнения и оценки состояния растительности территории [1 – 8, 10 – 13]. Зачастую упор делается на решение одной из этих задач. В [9] рассмотрены обе задачи, но решались они обособлено друг от друга.

В настоящей работе предложен алгоритм оценки состояния растительности в области угольного пылевого загрязнения в заданный период времени на основе разных вегетационных индексов. Алгоритм формировался методом натурного эксперимента по данным снимков со спутника Sentinel-2 второго уровня обработки (с атмосферной коррекцией) в пределах природного блока на территории Хабаровского края, включающего зону техногенного воздействия угольного разреза “Правобережный” (Ургальское месторождение). В снимках содержалось 13 каналов (разрешение 10–60 м). Для работы брались каналы видимого и инфракрасного спектра (таблица).

Каналы снимка с Sentinel-2

Канал	Разрешение, м	Длина волны, нм	Спектр	Аббревиатура
B2	10	490	Синий	BLUE
B3	10	560	Зеленый	GREEN
B4	10	665	Красный	RED
B8	10	842	Ближний инфракрасный	NIR
B11	20	1610	Коротковолновой инфракрасный	SWIR1
B12	20	2190		SWIR2

Исследовался период 2018–2023 гг. В каждом году рассматривались два сезона: весенний (конец марта – начало апреля, в это время область пылевого загрязнения видна наиболее отчетливо); летний — для оценки состояния растительности (рис. 1).



Рис. 1. Пылевое загрязнение весной (а) и состояние растительности летом (б)

Индекс ECDI позволил идентифицировать участки, загрязненные угольной пылью, с разделением их от других объектов. В его расчете брались ближний инфракрасный и коротковолновые инфракрасные диапазоны:

$$ECDI = \frac{B11 - B8 + B12}{B11 + B8 - B12}.$$

Состояние растительности оценивалось с помощью следующих вегетационных индексов:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — известный и часто используемый числовой показатель количественной оценки растительного покрова; вычисляется по поглощению и отражению растениями лучей красной и ближней инфракрасной зоны спектра:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4};$$

• EVI (Enhanced Vegetation Index) — усовершенствованный индекс [14], разработан как улучшение NDVI путем оптимизации сигнала растительности в областях с высоким индексом листовой поверхности; использует синюю область отражения для коррекции фоновых сигналов почвы и уменьшения атмосферных воздействий, в том числе аэрозольного рассеяния:

$$EVI = 2.5 \frac{B8 - B4}{B8 + 6 \cdot B4 - 7.5 \cdot B2 + 1};$$

• SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index) применяется для оценки состояния растительности, обладает устойчивостью к влиянию почвы (почвы имеют разные спектры отражения) и атмосферы (воздушная прослойка поглощает/рассеивает некоторое количество солнечного света) [15]:

$$SARVI = \frac{B8 - Rb}{B8 + Rb + L}(1 + L), \quad Rb = B4 - a(B4 - B2).$$

Здесь $L = 0.5$ — коэффициент коррекции яркости почвы; $a = 0.5$ — отражение атмосферы в синем и красном диапазонах. Для выделения зоны пылевого загрязнения использовалась кластеризация методом поиска восхождением к вершине [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена блок-схема предлагаемого алгоритма, относящегося к локальному поиску такой комбинации параметров, при которой целевая функция максимальна или минимальна. Сначала определяются зоны пылевого загрязнения вблизи области добычи для каждого рассматриваемого года, затем рассчитывается вегетационный индекс для последующего анализа состояния растительности.

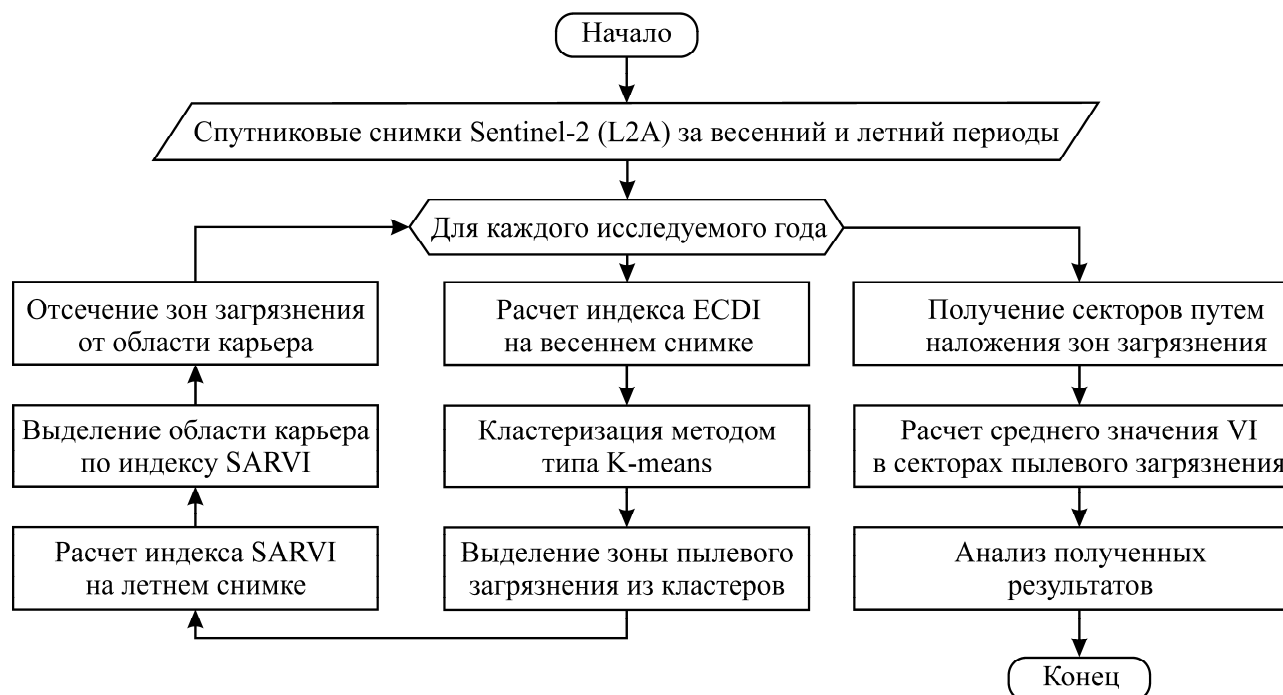


Рис. 2. Алгоритм оценки состояния растительности

При апробации алгоритма рассчитывался индекс ECDI на спутниковом снимке в начале весны (рис. 3а). Затем проводилась кластеризация на шесть групп методом поиска восхождения к вершине (рис. 3б). Такое количество кластеров оптимально для выделения зоны пылевого загрязнения (выявлено эмпирически). Среди полученных кластеров отбирались те, которые охватывают пылевое загрязнение (рис. 3в). Далее вычислялся индекс SARVI на спутниковом снимке за летний период (рис. 3г) и выполнялась бинаризация по порогу < 0.2 для выделения области карьера (рис. 3д). Найденная область карьера отсекалась от кластеров, описывающих пылевое загрязнение, тем самым получена зона пылевого загрязнения (рис. 3е).

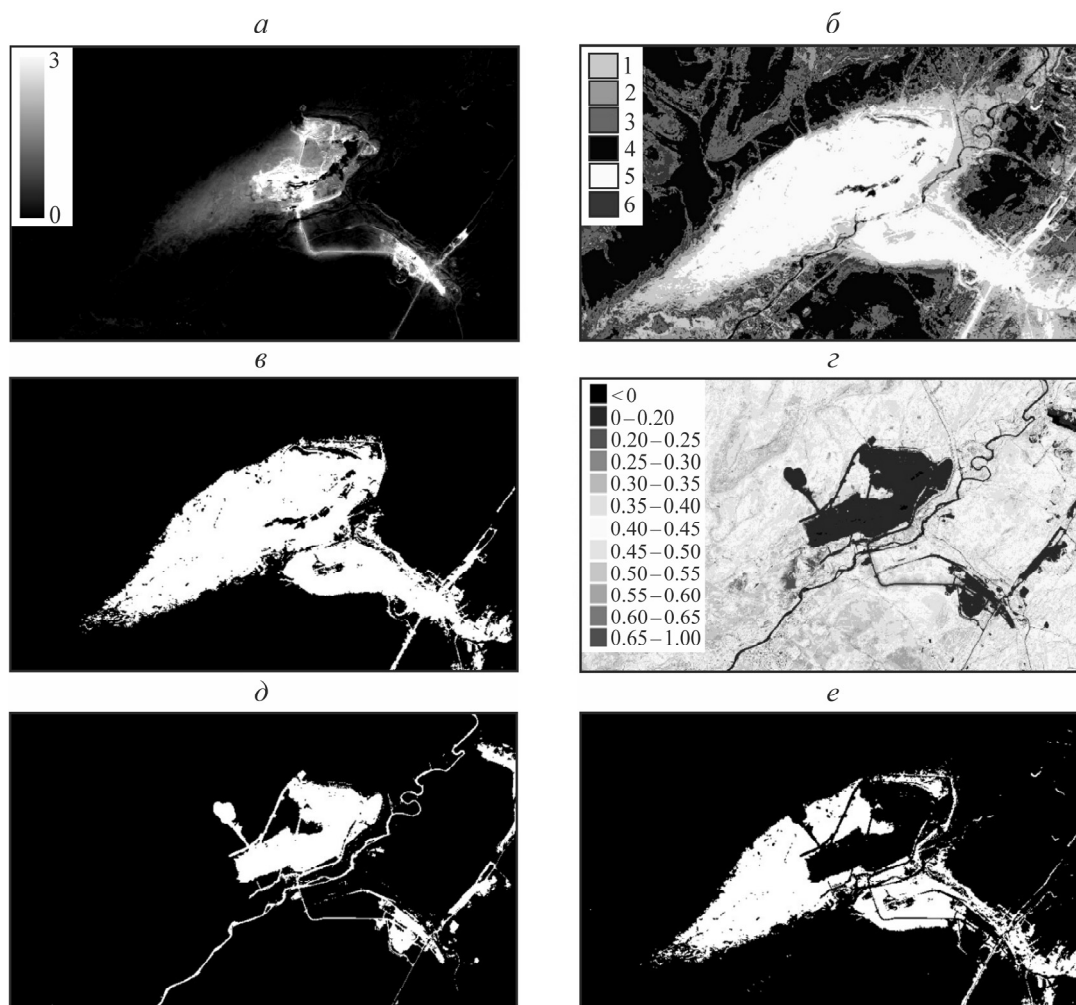


Рис. 3. Получение секторов пылевого загрязнения: а — расчет индекса ECDI; б — кластеризация методом восхождения к вершине; в — определение зон пылевого загрязнения; г — расчет индекса SARVI; д — определение области карьера; е — отсечение зон загрязнения от области карьера

На втором этапе проводится наложение зон пылевого загрязнения за каждый год. В результате формируются сектора, в которых пылевое загрязнение обозначено определенное количество раз. В соответствии с этим отмечаются номера этих секторов. Наложение выполняется для каждого года с учетом предыдущих. Затем в секторах рассчитываются средние вегетационные индексы (рис. 4). С приближением к области карьера наблюдается ухудшение состояния растительности в рамках одного года, что характерно для всех исследуемых лет. Ухудшение незначительно, так как средние индексы меняются в пределах сотых долей, исключение составил 2021 г., где индекс возрос десятикратно. Если рассматривать изменение состо-

яния растительности в течение нескольких лет, то ухудшения не наблюдается. Это объясняется тем, что съемка со спутников осуществляется в разных условиях, что может генерировать неконтролируемые и сложно фиксируемые погрешности.

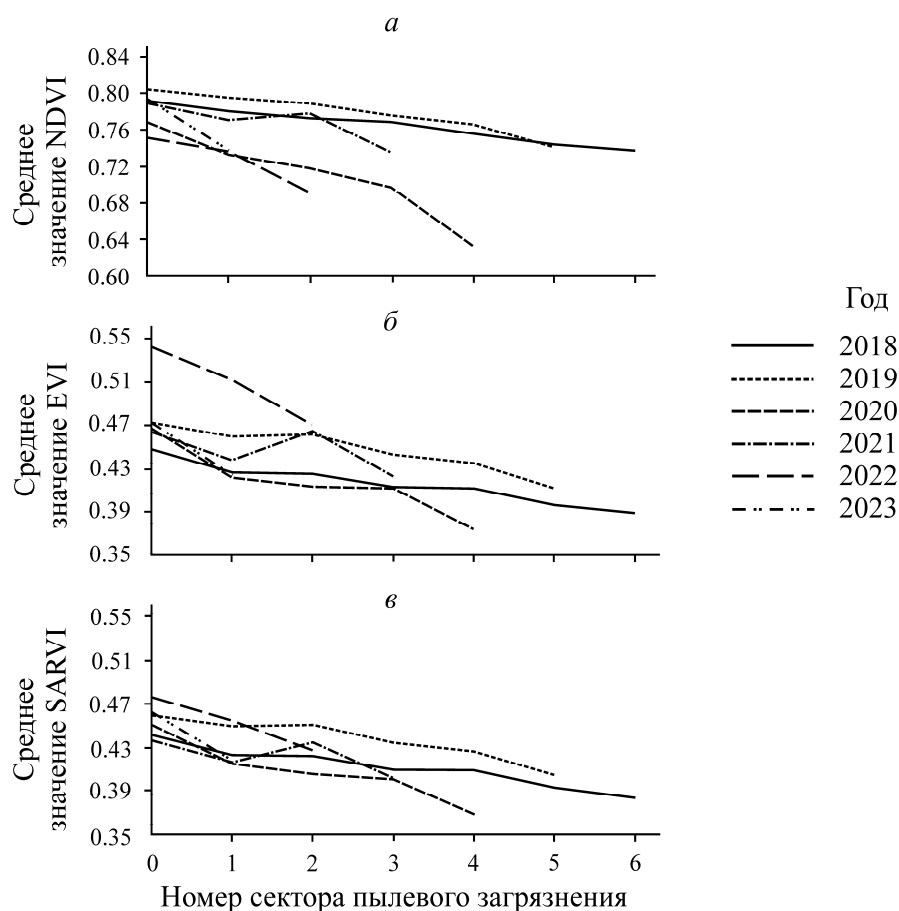


Рис. 4. Средние индексы NDVI (а), EVI (б) и SARVI (в) в секторах пылевого загрязнения

ВЫВОДЫ

Отличие предлагаемого алгоритма оценки состояния растительности в области пылевого загрязнения состоит в комплексном подходе к решению двух обозначенных задач и учете фактора времени. На основании расчетов с помощью данных дистанционного зондирования Земли возможно принимать решение о проведении комплексного анализа и определять необходимость проведения полевых исследований с целью подтверждения полученных результатов.

Результаты апробации показали ухудшение состояния растительности по мере приближения к области карьера в рамках одного года. При исследовании всего периода ухудшения состояния растительного покрова не выявлено. Запланирована валидация полученных результатов на основе данных полевых исследований специалистами в области экологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mao Y., Baodong M., Liu S., Wu L., Zhang X., and Yu M. Study and validation of a remote sensing model for coal extraction based on reflectance spectrum features, Canadian J. Remote Sensing, 2014, Vol. 40, No. 5. — P. 327–335.

2. Xia N., Hai W., Song G., and Tang M. Identification and monitoring of coal dust pollution in Wucaiwan mining area, Xinjiang (China) using Landsat derived enhanced coal dust index, Plos one, 2022, Vol. 17, No. 4. — e0266517.
3. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В., Счастливцев Е. Л., Быков А. А. Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов Кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования Земли // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 126–137.
4. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Быков А. А., Счастливцев Е. Л. Комплексный мониторинг техногенной нагрузки на атмосферу горнопромышленного региона // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 162–168.
5. Стручкова Г. П., Крупнова Т. Г., Тихонова С. А., Капитонова Т. А. Исследование загрязнения снежного покрова угледобывающих районов с использованием спектральных характеристик // ГИАБ. — 2021. — № 12-1. — С. 195–203.
6. Михайлюкова П. Г., Петраков Д. А., Тутубалина О. В., Зимин М. В., Викулина М. А. Анализ загрязненности снежного покрова арктических городов на основе спутниковых измерений альбедо // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2021. — Т. 27. — Ч. 1. — С. 394–408.
7. Тигеев А. А., Аксенов Н. В., Московченко Д. В., Пожитков Р. Ю. Оценка пылевого загрязнения атмосферы наземными и дистанционными методами (на примере г. Тобольск) // Географ. вестн. — 2021. — № 2 (57). — С. 121–134.
8. Yu H. and Zahidi I. Environmental hazards posed by mine dust, and monitoring method of mine dust pollution using remote sensing technologies: An Overview, Science of the Total Environment, 2023, Vol. 864. — 161135.
9. Nie X., Hu Z., Ruan M., Zhu Q., and Sun H. Remote-sensing evaluation and temporal and spatial change detection of ecological environment quality in coal-mining areas, Remote Sensing, 2022, Vol. 14, No. 2. — 345.
10. Зеньков И. В., Хунг Ч. Л., Анищенко Ю. А. Исследование горных работ и процессов восстановительной экологии на месторождениях угля во Вьетнаме по данным дистанционного зондирования // Уголь. — 2022. — № 7 (1156). — С. 21–24.
11. Озарян Ю. А., Васянович Ю. А. Основные экологические аспекты технологии освоения угольного месторождения (на примере Буреинского угольного разреза) // ГИАБ. — 2020. — № 1. — С. 15–25.
12. Ma B., Yang X., Yu Y., Shu Y., and Che D. Investigation of vegetation changes in different mining areas in Liaoning Province, China, using multisource remote sensing data, Remote Sensing, 2021, Vol. 13, No. 24. — 5168.
13. Yang X., Lei S., Zhao Y., and Cheng W. Use of hyperspectral imagery to detect affected vegetation and heavy metal polluted areas: A coal mining area, China, Geocarto Int., 2022, Vol. 37, No. 10. — P. 2893–2912.
14. Liu H. Q. and Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise, IEEE Transactions on Geosci. and Remote Sensing, 1995, Vol. 33, No. 2. — P. 457–465. <https://doi.org/10.1109/36.377946>.
15. Huete A., Justice C., and Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS, Remote Sensing Environment, 1994, Vol. 49, No. 3. — P. 224–234.
16. Hernando L., Mendiburu A., and Lozano J. A. Hill-Climbing algorithm: let's go for a walk before finding the optimum, IEEE Congress Evolutionary Computation (CEC), IEEE, 2018. — P. 1–7.

Поступила в редакцию 20/III 2025

После доработки 05/V 2025

Принята к публикации 16/V 2025