

Вегетационные и почвенные индексы для спутникового мониторинга земель в районах открытой разработки угля

П.П. Маневич¹✉, В.В. Антошин², К.С. Коликов³

¹ Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва, Российская Федерация

² ООО НГК «Горный», г. Москва, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ polina.manevich@yandex.ru

Резюме: Эксплуатация угольных карьеров оказывает комплексное негативное воздействие на прилегающие природные территории. Непрерывный мониторинг земель является основой для разработки эффективных стратегий восстановления и рекультивации горнопромышленных и природных ландшафтов в районах угледобычи. Для этой цели активно используются спутниковые миссии. В статье представлен анализ почвенных и вегетационных индексов, применяемых для мониторинга земель в районах открытой разработки угля, с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены теоретические основы и практическое применение спутниковых индексов, таких, которые позволяют выполнять оценку состояния растительного покрова и почвы. Особое внимание уделено возможности использования этих индексов для выявления деградационных процессов и оценки эффективности рекультивационных мероприятий на нарушенных территориях. Методология расчета вегетационных индексов основана на анализе спектральных характеристик растительности и почвы, особенности которых отражают их внутреннюю структуру и состав. В статье приводятся примеры применения индексов для анализа территорий с маловыраженной растительностью и высокими показателями почвенного фона, характерными для угледобывающих регионов. Обсуждаются ограничения индексов и возможные способы их коррекции для повышения точности спутникового мониторинга.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, вегетационные индексы, почвенные индексы, спутниковый мониторинг, открытая угледобыча, рекультивация земель, спектральные данные

Для цитирования: Маневич П.П., Антошин В.В., Коликов К.С. Вегетационные и почвенные индексы для спутникового мониторинга земель в районах открытой разработки угля. *Горная промышленность*. 2025;(1):118–122. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-118-122>

Vegetation and soil indices for satellite monitoring of lands in areas of surface coal mining

P.P. Manevich¹✉, V.V. Antoshin², K.S. Kolikov³

¹ PLC "Roskadastr", Moscow, Russian Federation

² LLC NGK "Gorny", Moscow, Russian Federation

³ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ polina.manevich@yandex.ru

Abstract: The operation of coal mines has a complex negative impact on adjacent natural areas. Continuous land monitoring is essential for developing effective strategies for restoration and reclamation of mining and natural landscapes in the coal mining regions. Satellite missions are actively used for this purpose. The article presents an analysis of soil and vegetation indices employed for land monitoring in areas of surface coal mining using Earth remote sensing data. It discusses the theoretical foundations and practical applications of satellite indices that enable the assessment of vegetation and soil conditions. A special attention is given to the potential use of these indices in identifying the degradation processes and evaluating the effectiveness of reclamation efforts in the disturbed areas. The methodology for calculating the vegetation indices is based on analyzing spectral characteristics of the vegetation and soils, reflecting their internal structure and composition. The article provides examples of the index application in analyzing areas with sparse vegetation and high soil background levels, typical of the coal mining regions. Limitations of the indices are discussed, along with the possible correction methods to enhance the accuracy of satellite monitoring.

Keywords: earth remote sensing, vegetation indices, soil indices, satellite monitoring, open-pit coal mining, land reclamation, spectral data

For citation: Manevich P.P., Antoshin V.V., Kolikov K.S. Vegetation and soil indices for satellite monitoring of lands in areas of surface coal mining. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):118–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-118-122>

Введение

В настоящее время наблюдаются тенденции к увеличению объемов угля, добываемых открытым способом, что приводит к увеличению площади нарушенных земель [1–3]. Данная проблема на протяжении долгого времени неизменно присутствует и будет присутствовать в Кузбассе – одном из наиболее развитых регионов России в сфере промышленности и крупнейшем регионе России по добыче угля. В распределении земельного фонда региона по угольям за 2021 г. нарушенные земли составляют 98 тыс. га, что значительно превышает среднероссийские показатели¹. В связи с этим необходим оперативный и качественный способ систематического мониторинга состояния растительного и почвенного покрова. Перспективными для решения данной задачи являются методы дистанционного зондирования Земли из космоса [4; 5]. Этому способствуют интенсивное развитие спутниковых и ГИС-технологий, высокий временной и пространственный охват спутниковой съемки и свободный доступ к данным спутниковых миссий.

Нарушенные земли – это земли, потерявшие изначальную хозяйственную ценность в результате нарушения и вызывающие негативное воздействие на окружающую среду. По государственному стандарту ГОСТ Р 59070–2020², под нарушением земель понимается процесс, происходящий при добыче полезных ископаемых, выполнении геологоразведочных, изыскательных, строительных и других работ и приводящий к нарушению почвенного покрова, гидрологического режима местности, образованию техногенного рельефа и другим качественным изменениям земель.

Для оценки состояния растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используются феноботанические, почвенные и геоморфологические индексы. Эти индексы обеспечивают площадную масштабность мониторинга экосистем в условиях интенсивного использования земель. Преимущество спутниковых индексов заключается в возможности непрерывного и оперативного наблюдения за состоянием земель, что важно для оперативного выявления деградиционных процессов и проведения рекультивационных мероприятий. Таким образом, цель настоящей статьи – обобщить опыт использования феноботанических и вегетационных индексов с точки зрения их использования для мониторинга рекультивированных земель в угледобывающих районах.

Методология

Вегетационные индексы, разрабатываемые на основе данных ДЗЗ, представляют собой эмпирические зависимости, характеризующие состояние растительного и почвенного покрова. Они получаются в результате применения математических операций над спектральными каналами спутниковых снимков и количественных оценок состояния растительности и почвы. Данные спутниковых снимков представляют собой значения коэффициентов спектральной яркости, которые фиксируют меру отраженной солнечной энергии. В контексте оптического дистанционного зондирования спектральная яркость характеризует интенсивность отражения солнечного света от поверхности Земли в различных диапазонах спектра.

Вегетационные индексы, как эмпирически выведенные показатели, основаны на характеристиках отражательной способности растений (солнечно-индуцированная флуоресценция), которая напрямую связана с процессами фотосинтеза. Флуоресценция хлорофилла представляет собой процесс, при котором молекулы хлорофилла начинают излучать свет после поглощения им энергии солнечного света (рис. 1) [6]. Пигменты растений определяют их цвет за счет избирательного поглощения света в определенных диапазонах спектра. Они играют ключевую роль в процессах фотосинтеза, а их оптические свойства обуславливают взаимодействие растений с солнечной радиацией, что позволяет спутниковым системам фиксировать состояние растительности и их изменения. Хлорофилл А и В являются ключевыми пигментами, участвующими в поглощении света и преобразовании его внутренней энергии в химическую, которая используется растением для синтеза органических веществ. Хлорофилл А, основной пигмент, отвечает за первичное поглощение света и передачу его

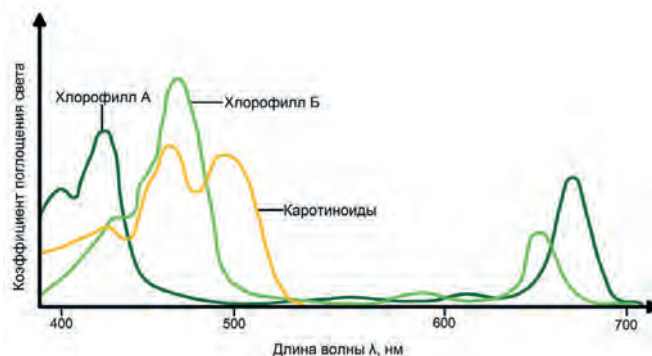


Рис. 1
Характеристический график поглощения света хлорофиллом
Источник: [6]

Fig. 1
A characteristic plot of light absorption by chlorophyll
Source: [6]

¹ Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2021 году. Кемерово; 2022. 240 с. Режим доступа: https://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2022/04/doclad_2021.pdf (дата обращения: 18.12.2024).

² ГОСТ Р 59070–2020 «Охрана окружающей среды. Рекультивация нарушенных и нефтезагрязненных земель». М.: Стандартинформ; 2020. 16 с. Режим доступа: <http://gost.gtsever.ru/Data/752/75239.pdf> (дата обращения: 18.12.2024).

энергии в фотосистемы. Хлорофилл В, в свою очередь, выполняет вспомогательную функцию, расширяя спектральный диапазон поглощения за счет увеличения эффективности поглощения света в синей области. Каротиноиды, такие как β-каротин и лютеин, являются вспомогательными пигментами. Они защищают клетки растений от окислительного стресса, вызванного избыточным солнечным светом, и передают поглощенную энергию на молекулы хлорофилла.

Хлорофилл А и хлорофилл В, являясь основными фотосинтетическими пигментами, активно поглощают свет в синем (около 400–500 нм) и красном (600–700 нм) диапазонах спектра, отражая зеленую область (500–600 нм). Именно поэтому здоровая растительность выглядит зеленой. Каротиноиды, в свою очередь, дополняют спектральную активность хлорофиллов, поглощая свет в синем и зеленом диапазонах и отражая желто-оранжевые длины волн. Таким образом, каротиноиды создают характерные оттенки растений в периоды стресса, изменения сезона или старения, когда уровень хлорофилла снижается.

Вегетационные индексы, такие как NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс), отражают соотношение между отражением света в ближнем инфракрасном (NIR) и красном диапазонах. Хлорофилл активно поглощает красный свет, в то время как здоровая клеточная структура растений обеспечивает высокую отражательную способность в ближнем инфракрасном спектре (рис. 2). Уровень содержания хлорофилла и его соотношение с каротиноидами напрямую влияют на значения индексов. Например, снижение хлорофилла и рост каротиноидов в условиях стресса изменяют спектральное соотношение, что фиксируется спутниковыми системами.

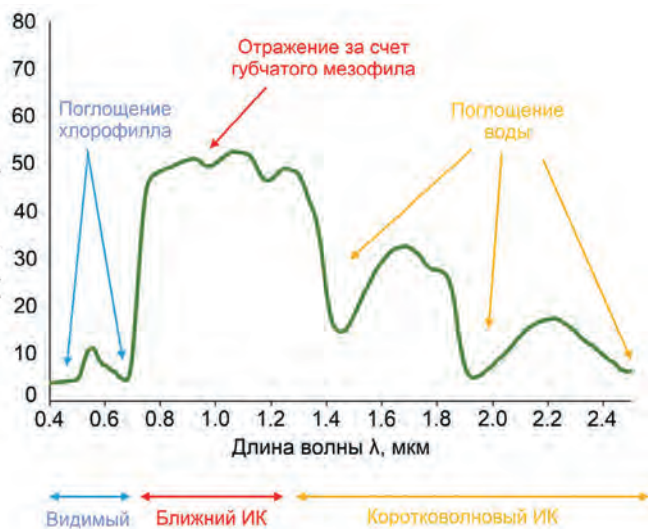


Рис. 2
Характеристическая кривая спектральной отражательной способности растительности
Источник: [7]

Fig. 2
A characteristic curve of the vegetation spectral reflectance
Source: [7]

Энергетический баланс растений зависит от их фотосинтетической активности, которая определяется взаимодействием этих пигментов. Хлорофилл обеспечивает основное поглощение и преобразование солнечной энергии, в то

время как каротиноиды играют защитную роль и повышают устойчивость растительности к неблагоприятным условиям. Эти процессы оказывают влияние на спектральные и оптические свойства растений. Таким образом, взаимодействие пигментов, их оптические свойства и роль в фотосинтетической активности формируют спектральную сигнатуру растительности, которая используется для расчета вегетационных индексов на основе данных ДЗЗ.

Результаты

Логика разработки вегетационных индексов основывается на физиологических и биофизических процессах, протекающих в растительности. Однако при интерпретации вегетационных индексов важно учитывать не только характеристики растительного покрова, но и влияние почвы. Почвенные индексы, разработанные для анализа свойств подстилающей поверхности, помогают скорректировать влияние почвенного фона на значения вегетационных индексов. Это особенно актуально для ландшафтов с маловыраженной растительностью, где отражательная способность почвы влияет на точность расчетов (к примеру, в условиях горнопромышленных ландшафтов, где нарушенные земли характеризуются высокой яркостью в видимом диапазоне).

Индексы, ориентированные на идентификацию содержания хлорофилла, такие как NDVI или EVI, особенно эффективны для густой растительности с высоким уровнем фотосинтетической активности. Эти индексы дают наиболее точные результаты при изучении лесов, сельскохозяйственных угодий с высокой продуктивностью или других экосистем с интенсивным фотосинтезом. Они позволяют оценивать биомассу, степень здоровья растений и темпы их роста. Для разреженной растительности или покрова с низкорослыми растениями, где значительная часть спектрального сигнала формируется почвой, используются специализированные индексы, учитывающие эти помехи. Например, SAVI (вегетационный индекс, скорректированный по почве) или MSAVI (модифицированный индекс SAVI) разработаны для компенсации влияния почвы на спектральное отражение растительности. Такие индексы включают коррекционные параметры, позволяющие уменьшить искажения, вызванные различиями в яркости почвенных покровов, их влажностью и текстурой. Их применение необходимо на рекультивированных, засушливых территориях, в регионах, где растительность разрежена и открытые участки почвы оказывают влияние на спектральные измерения.

Вегетационные индексы (табл. 1) [7–10] имеют различные области применения, определяемые их функциональной направленностью. NDVI используется для оценки плотности и состояния растительности, показывая фотосинтетическую активность. TSAVI применяется в условиях разреженной растительности для минимизации влияния почвы, особенно в засушливых регионах. ARVI адаптирован для коррекции атмосферных помех, таких как аэрозоли, и подходит для загрязнённых территорий. EVI разработан для густой растительности, избегая насыщения сигнала. GNDVI предназначен для оценки содержания азота в растениях, что важно для сельского хозяйства. LAI служит для измерения площади листового покрова и часто используется в климатологии и агрономии. ARI помогает выявлять стрессовые состояния растений, анализируя содержание антоцианов. PVI минимизирует влияние почвы,

Таблица 1
Вегетационные феноботанические спутниковые индексы

Table 1
Vegetation phenobotanical satellite indices

Индекс	Применение	Формула расчета	Диапазон	Показатели для здорового растения
NDVI	Оценка уровня фотосинтетической активности биомассы	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	-1...1	>0,5 Высокая степень развития зеленой биомассы
TSAVI	Вегетационный индекс с учетом почвы	$TSAVI = \frac{s(NIR - s \cdot RED - a)}{a \cdot NIR + RED - a \cdot s + X(1 + s^2)}$ где s и a – параметры наклона и пересечения почвенной линии, X – корректирующий фактор	-1..1	>0,5 Зеленая приповерхностная растительность (ростки до 10 см высотой)
ARVI	Вегетационный индекс с коррекцией атмосферы	$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}$ $Rb = RED - a(RED - BLUE)$ где a – корректирующий коэффициент (обычно принимается $a = 2$)	-1..1	>0,5 Высокая степень развития зеленой биомассы
EVI	Индекс для плотной растительности с коррекцией почвы и атмосферы	$EVI = \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L}$ где C_1 и C_2 – коэффициенты корректировки, L – фактор сглаживания	0...1	0,2...0,8 Зеленая растительность
GNDVI	Оценка зелени с учетом хлорофилла	$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	-1...1	>0,6 Густая зеленая растительность
LAI	Индекс, отражающий листовую поверхность	$LAI = \frac{S_{листья}}{S_{почвы}}$	0...8	>3 Густая зеленая растительность
ARI	Оценка антоциановой активности	$ARI = \frac{1}{GREEN} - \frac{1}{RED}$	0..0,2	0,001...0,1 Зеленая растительность
PVI	Оценка состояния растительной биомассы	$PVI = \sin(a) \cdot NIR - \cos(a) \cdot RED$	-1...1	>0 Зеленая растительность
SAVI	Коррекция показателей растительности с учетом влияния почвы	$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L) \cdot (L + 1)}$ где L – коэффициент поправки на почву	-1...1	>0,3 Густая зеленая растительность
MSAVI	Уменьшение влияния яркости почвы на расчеты растительности	$MSAVI = \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - RED)}}{2}$	-1...1	>0,3 Густая зеленая растительность

улучшая точность оценки растительного покрова. SAVI также корректирует влияние почвы и применяется в условиях засушливых территорий с низкой растительностью. Шкала значений каждого индекса варьируется, отражая плотность, состояние растительности или уровень стресса, что делает их универсальными инструментами для мониторинга растительности в разных экосистемах.

Выводы

Вегетационные индексы являются инструментами для анализа состояния растительности, объединяя в себе данные о спектральных свойствах растительного покрова и фундаментальных процессах фотосинтеза. Их разработка и применение требуют понимания взаимодействия солнечной энергии с объектами на поверхности Земли, а также учета влияния почвенного фона и специфики ландшафтов. Такой подход позволяет создавать точные и интерпретируемые модели растительности, которые находят широкое применение в экологическом мониторинге, сель-

ском хозяйстве и планировании мероприятий по рекультивации земель. Выбор конкретного индекса зависит от типа растительного покрова и задач исследования. Различные индексы ориентированы либо на анализ густой и высокорослой растительности, либо на изучение разреженного покрова и низкорослой растительности, где спектральные сигналы сильно зависят от влияния почвы и других внешних факторов.

Вегетационные индексы демонстрируют высокую гибкость в применении, что позволяет учитывать различия в типах растительности и условиях местности. Для густого покрова акцент делается на спектральных особенностях, связанных с хлорофиллом, тогда как для разреженной растительности необходимы методы, позволяющие учитывать дополнительные факторы, такие как спектральные свойства почвы. Это позволяет исследователям эффективно использовать спутниковые данные в задачах мониторинга, управления ресурсами и оценки экологического состояния различных территорий.

Список литературы / References

1. Петренко И.Е., Шинкин В.К. Итоги работы угольной промышленности России за январь–март 2022 года. *Уголь*. 2022;(6):6–16. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-6-16>
Petrenko I.E., Shinkin V.K. Russia's coal industry performance for January – March, 2022. *Ugol'*. 2022;(6):6–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-6-16>
2. Соколовский А.В., Гончар Н.В. Оценка направлений использования техногенных ресурсов при отработке различных видов минерального сырья. *Горная промышленность*. 2023;(5):102–107. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-102-107>
Sokolovsky A.V., Gonchar N.V. Assessment of directions to use man-made resources in the development of various types of mineral raw materials. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):102–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-102-107>
3. Акматов Д.Ж., Евлоев Х.Ю., Меллер А.Д., Манукян Т.А., Чадин В.Н. Методика численного моделирования полей напряжений в районе размещения угольных шахт. *Горная промышленность*. 2023;(1):39–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>
Akmatov D.Zh., Evloev H.Y., Meller A.D., Manukyan T.A., Chadin V.N. Methodology for numerical modeling of stress fields in vicinities of coal mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):39–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>
4. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017;202:18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
5. Naghibi S.A., Pourghasemi H.R., Dixon B. GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016;188:44. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5049-6>
6. Huete A.R., Jackson R.D., Post D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*. 1985;17(1):37–53. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7)
7. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988;25(3):295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
8. Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Merzlyak M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1996;58(3):289–298. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00072-7)
9. Kaufman Y.J., Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;30(2):261–270. <https://doi.org/10.1109/36.134076>
10. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002;83(1-2):195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)

Информация об авторах

Маневич Полина Павловна – главный редактор отдела научно-технической информации Управления научно-технического развития и инноваций в сфере геодезии, картографии и геоинформационных технологий, Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: polina.manevich@yandex.ru

Антошин Владислав Викторович – директор управления по промышленной безопасности, охраны труда и охраны окружающей среды, ООО НГК «Горный», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: antoshinVV@ngk-gornyi.ru

Коликов Константин Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности и экологии горного производства Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8831-1927>; e-mail: kolikovks@mail.ru

Information about the authors

Polina P. Manevich – Chief Editor of the Department of Scientific and Technical Information at the Department of Scientific and Technical Development and Innovations in the Field of Geodesy, Cartography, and Geoinformation Technologies, PLC “Roskadastr”, Moscow, Russian Federation; e-mail: polina.manevich@yandex.ru

Vladislav V. Antoshin – Director of Industrial Safety, Health and Environment Safety Department, LLC NGK “Gornyi”, Moscow, Russian Federation; e-mail: antoshinVV@ngk-gornyi.ru

Konstantin S. Kolikov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of the Safety and Ecology of Mining, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8831-1927>; e-mail: kolikovks@mail.ru

Article info

Received: 17.11.2024

Revised: 09.01.2025

Accepted: 13.01.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.11.2024

Поступила после рецензирования: 09.01.2025

Принята к публикации: 13.01.2025