

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Маневич Полина Павловна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ ЗЕМЕЛЬ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ НА
ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА**

Специальность 1.6.21 – «Геоэкология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Коликов Константин Сергеевич

Москва – 2025

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивная разработка угольных месторождений оказывает значительное воздействие на состояние окружающей среды. Негативное воздействие охватывает не только зону разработки, но и прилегающие городские, сельскохозяйственные и природные территории. Проблема влияния открытой добычи угля на прилегающие территории исследуется уже десятилетиями, и по мере роста добычи угля её актуальность лишь усиливается. Повышенный уровень загрязнения в санитарно-защитных зонах и в прилегающих территориях приводит к загрязнению, и как следствию – деградации растительного покрова.

Рост угледобычи в России и мире в последние годы лишь усугубляет экологическую ситуацию. В 2023 году в России было добыто 438 миллионов тонн угля, что на 1,26% меньше, чем в 2022 году, когда объем добычи составил 443,6 миллиона тонн. Однако экспорт угля в 2023 году увеличился на 1%, достигнув 213 миллионов тонн по сравнению с предыдущим годом. В последние годы уровень добычи угля остается относительно стабильным. Однако нормативные документы (включая энергетическую стратегию развития РФ и долгосрочную программу развития угольной отрасли РФ) предусматривают либо рост угледобычи, либо сохранение текущего уровня при одновременном увеличении площадей рекультивируемых земель и внедрении экологических мероприятий. Экологическая ситуация в регионах угледобычи остаётся крайне напряжённой из-за постоянных выбросов загрязняющих веществ, которые остаются на высоком уровне.

При оценке состояния растительного покрова рекультивируемых земель в угледобывающих районах необходим комплексный подход, направленный на обеспечение эффективного контроля как со стороны недропользователей, так и государства. Рекультивация земель представляет собой сложный процесс восстановления почвенного покрова, растительности и гидрологического режима, что требует постоянного мониторинга для обеспечения его результативности.

Наземные полевые методы и лабораторные исследования, безусловно, остаются необходимыми в подобных исследованиях. Однако они требуют значительных финансовых и людских ресурсов, а также затруднены в труднодоступных районах. А при этом стратегия научно-технического развития РФ закрепляет развитие новых методов экологического мониторинга. Использование методов дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) позволяет оперативно и с высокой точностью отслеживать состояние растительности, почвы и водных ресурсов на рекультивируемых территориях, что помогает минимизировать затраты на выполняемые работы и оценить их эффективность.

Для государства задача контроля рекультивированных территорий имеет важное значение в рамках экологического надзора и контроля. Мониторинг рекультивационных мероприятий с использованием космических снимков и технологий ДЗЗ позволяет осуществлять удаленную диагностику состояния растительного покрова рекультивированных земель на больших территориях. Такие данные могут быть использованы для обоснования решений о необходимости корректировки программ рекультивации, а также для формирования заключений о соблюдении природоохранных норм и требований. С развитием цифровых технологий методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся всё более важными инструментами для решения различных задач. Совершенствование аппаратуры для съемки и увеличение частоты сбора данных значительно расширяют возможности этих методов, позволяя эффективно охватывать разнообразные области применения и предоставляя ценные решения для множества проблем.

Экологический мониторинг с использованием ДЗЗ становится эффективным инструментом отслеживания состояния экосистем в районах с высокой техногенной нагрузкой. Оперативный мониторинг, основанный на данных ДЗЗ, позволяет выявлять закономерности во временных и пространственных изменениях, что может служить основой для классификации земельных участков по степени нарушения и последующего планирования мер по их восстановлению. Методы экологического мониторинга на основе ДЗЗ позволяют проводить глубокий анализ территорий, в том числе густо покрытых лесом, и обеспечивают регулярное обновление данных. Полученные данные можно использовать для разработки проектов биологического этапа рекультивации, направленных на адаптацию и восстановление растительного покрова, а также для экологического контроля в производственных, общественных и природоохранных сферах.

Цель работы состоит в разработке методики оценки состояния растительного покрова рекультивируемых земель угледобывающих районов с учетом лимитирующих факторов растительности по данным дистанционного зондирования Земли из космоса.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих технологий оценки и мониторинга состояния растительного покрова в районах угледобычи. Проанализировать методики, применяемые для оценки качества земель, растительности или нарушенных земель в районах угледобычи.
2. Исследовать феноботанические вегетационные и почвенные индексы, чтобы определить их оптимальный набор для пространственно-временной оценки состояния растительности в районах угледобычи.

3. Изучить факторы, которые ограничивают продуктивность растительного покрова в районах угледобычи.
4. Разработать и обосновать методику оценки состояния растительного покрова рекультивируемых земель в районах угледобычи, используя данные дистанционного зондирования Земли с учетом лимитирующих факторов.
5. Провести динамический анализ вегетационной активности и дать комплексную оценку состояния растительности в районе Талдинского угольного разреза.
6. Разработать предложения по использованию новой методики состояния рекультивируемых земель в рамках государственного, общественного и промышленного экологического контроля.

Идея работы заключается оценке состояния растительного покрова интегральным показателем, с учетом лимитирующих факторов, выраженных в виде нормированного показателя определенного набора спутниковых вегетационно-почвенных индексов, основанных на особенностях спектральных свойств почвы и растений в районах угледобычи.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Вегетационные индексы как геоэкологические характеристики природно-техногенной среды, позволяют оценивать изменение состояния растительного покрова рекультивируемых земель в районах открытой добычи угля.

2. Разработанная методика оценки состояния растительного покрова рекультивированных земель в районах открытой добычи угля базируется на основе использования выявленных эмпирических зависимостей между показателями спектральных свойств растительного и почвенного покрова.

3. Алгоритм вычисления интегрального показателя состояния растительного покрова рекультивированных земель в виде нормированного определенного набора спутниковых вегетационно-почвенных индексов, позволяет выполнять пространственно-временную оценку вегетационной активности при экологическом мониторинге в районах открытой добычи угля

Научная новизна работы заключается в следующем:

– впервые обоснован набор лимитирующих показателей состояния растительного покрова в районах разработки угольных месторождений и выделен набор спутниковых индексов, которые являются показателями факторов, лимитирующих продуктивность растительного покрова в районах добычи угля (индексы NDMI, BSI, NSMI, NDBI);

- разработана новая методика оценки состояния растительности в районах открытой добычи угля, которая позволяет создавать картографические модели, отражающие воздействие природных и антропогенных факторов;

- впервые разработанный интегральный показатель качества состояния растительности относительно лимитирующих факторов в виде набора спутниковых индексов, позволяет проводить оценку состояния растительности единственным показателем;

- предложенная модель и алгоритм расчета интегрального показателя позволяет выполнять оценку эффективности биологического этапа рекультивации в автоматизированном формате геоинформационных систем.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается:

- анализом результатов международных и отечественных исследований;
- применением современных подходов оценки состояния растительного покрова по данным ДЗЗ, с достоверностью до 5–12% относительного изменения регистрируемых показателей;
- анализом данных, полученных в результате моделирования;
- воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных результатов;
- апробацией результатов на международных конференциях и симпозиумах.

Методы исследований включают: Анализ и обобщение научно-технических данных, методы вегетативного анализа растительности, оценка состояния растительного покрова с применением данных дистанционного зондирования Земли, инженерно-экологические исследования, методы обработки данных с использованием ГИС-технологий, методы статистической обработки измерений. Вычисления и визуализация результатов проводились с применением программных средств Google Earth Engine, QGIS и языка программирования JavaScript.

Практическое значение и реализация результатов работы определяется стратегией развития угольной отрасли, в рамках которой планируется увеличение площадей рекультивируемых территорий, при сохранении (или увеличении) объемов добычи угля. Практическое значение результатов работы состоит в расширении возможностей оперативного анализа состояния растительного покрова горнопромышленных объектов по имеющимся спутниковым данным, агрегируемым с помощью платформы Google Earth Engine. Разработанная методика и программные

средства могут быть составной частью государственного, общественного и производственного экологического мониторинга.

Личный вклад автора выразился в непосредственном участии на всех этапах исследований: при планировании работ, сборе и обобщении научно-технической информации; выборе используемых геоинформационных систем; анализ данных дистанционного зондирования земли; расчеты вегетационных индексов; анализе полученных данных и оценки состояния растительного покрова вблизи исследуемой территории; обосновании методических рекомендаций по использованию данных ДЗЗ при экологической оценке нарушенных земель горными работами.

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы были доложены: на Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, ВГУ, 2020); Международной научно-практической конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования: партнерство в целях устойчивого развития и экологической безопасности» (Москва, РУДН, 2020); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, НИТУ «МИСиС», 2018, 2020, 2021, 2022, 2023); Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2022, 2024). Результаты работы докладывались на семинарах кафедры Безопасность и экология горного производства НИТУ МИСИС.

Благодарности. Диссертант выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, доктору технических наук, доценту Коликову К.С. за постоянные консультации, внимание к работе на всех ее этапах и моральную поддержку. Автор также признателен за предоставление данных, консультации и всестороннюю помощь старшему преподавателю Удаловой Н.П., доктору технических наук, профессору Куликовой Е.Ю. Автор выражает благодарность всем сотрудникам кафедры Безопасность и экология горного производства Горного института НИТУ МИСИС за содействие в работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены современные подходы к экологическому мониторингу растительного покрова на территориях, затронутых открытой угледобычей. Оценено воздействие угольных разрезов на окружающую среду. Проанализированы текущие технологии, используемые для наблюдения за состоянием растительности в районах, где ведётся открытая добыча угля. Также изучены методы дистанционного зондирования Земли для экологического мониторинга земных экосистем.

Воздействие на окружающую среду угольных разрезов характеризуется значительным многообразием показателей. Добыча угля открытым способом приводит к существенным изменениям в структуре ландшафта и вызывают деградацию экосистем. Несмотря на сложные экологические проблемы, связанные с добычей угля открытым способом, в России эта отрасль динамично развивается. Развитие открытой разработки угля в Российской Федерации основано на государственных стратегиях и программах развития.

Мониторинг негативного воздействия на окружающую среду в районах горнодобывающих карьеров представляет сложную задачу, особенно в условиях большой площади территории Российской Федерации и высокой концентрации горнодобывающих объектов. Организация постоянных полевых наблюдений в таких условиях требует значительных ресурсов, как человеческих, так и технических, что часто становится барьером для систематического мониторинга. Использование традиционных методов наблюдения может быть ограничено из-за высокой стоимости, времени, необходимого для сбора данных, а также сложности доступа к удаленным районам.

Дистанционное зондирование Земли представляет собой один из наиболее перспективных инструментов для мониторинга окружающей среды и широко используется в различных научных и практических областях. На данный момент наблюдается огромный рост количества данных ДЗЗ, появляются новые платформы обработки данных. Одним из ключевых преимуществ ДЗЗ является способность охватывать большие территории и получать актуальную информацию о состоянии ландшафта, водных ресурсов, растительности и других элементов экосистемы. С учетом этого необходимо развивать специализированные методики, которые позволят выполнять оценку влияния карьеров на окружающую среду. Это может включать в себя разработку новых алгоритмов обработки данных, адаптированных для задач мониторинга НВОС, а также внедрение систем автоматического сбора и анализа данных, способных идентифицировать локальные изменения, вызванные горнодобывающими работами.

Текущие исследования и разработки в области ДЗЗ направлены на создание более точных методов мониторинга и автоматизированных систем, способных анализировать

состояние окружающей среды в районах добычи угля. Это позволит снизить риски негативного воздействия на экосистемы, оперативно реагировать на изменения и улучшать методы восстановления земель после завершения добычи.

На основании результатов анализа сформулирована цель и идея диссертационной работы и основные задачи.

Во второй главе рассмотрены теоретические и практические аспекты биоиндикации состояния растительности с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Произведен анализ различных методов оценки качества земель, включая полевые и лабораторные исследования. Проведена сравнительная характеристика вегетационных индексов, применяемых для оценки состояния растительного покрова, с акцентом на угольные разрезы. Также обсуждены методы обработки спутниковых изображений, используемые для решения поставленных задач.

Методики оценки качества земель играют важную роль в понимании и управлении земельными ресурсами. Одним из основных преимуществ этих методик является их способность предоставить информацию о состоянии земель в числовой или качественной форме, что упрощает анализ и позволяет сравнивать результаты между разными участками или временными периодами (к примеру модель RUSLE, рис. 1). Такой подход обеспечивает объективное измерение, которое можно использовать для отслеживания изменений со временем, выявления проблем и принятия обоснованных решений. Методики позволяют анализировать состояние растительного покрова в контексте экосистемного подхода. Вместо того чтобы рассматривать землю как изолированный ресурс, они могут включать анализ биологических показателей, климатических показателей и взаимодействия с другими компонентами экосистемы.

Методы и данные ДЗЗ позволяют наблюдать обширные территории без необходимости физического присутствия на месте. Это особенно ценно при мониторинге удалённых или труднодоступных районов. При этом нужно учитывать комплекс показателей, включая топографию и сезонные изменения, что может затруднять анализ. Для обеспечения точности требуется калибровка и валидация спутниковых данных, основанные на наземных измерениях, что может быть затруднено из-за недостаточного объема данных.

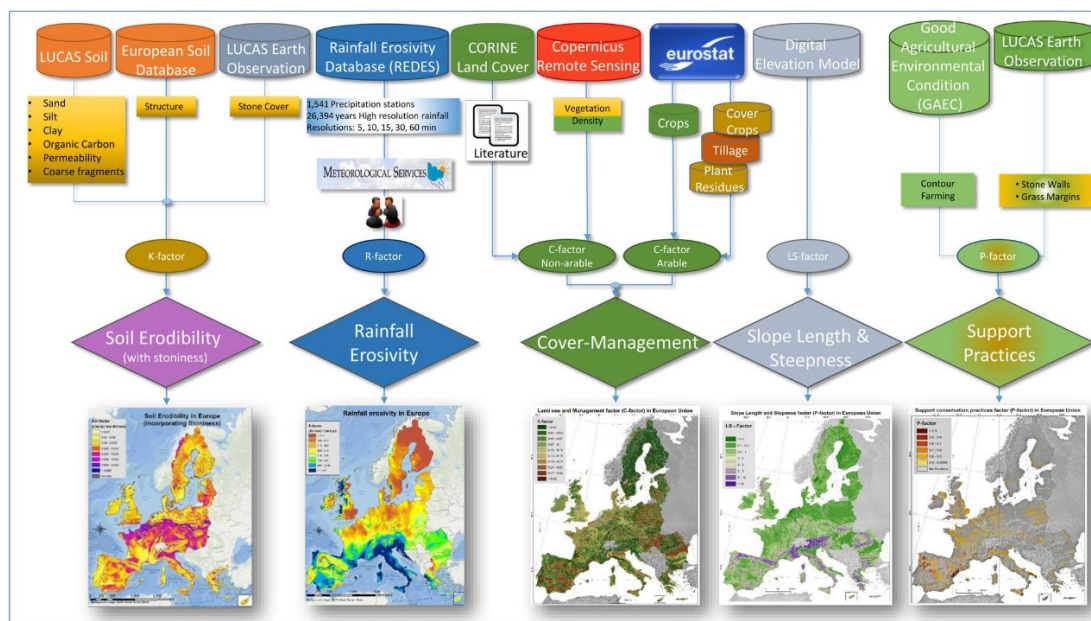


Рисунок 1 – Модель эрозии почвы по методике RUSLE

Вегетационные индексы, разрабатываемые на основе данных ДЗЗ (табл. 1), представляют собой эмпирические соотношения спектральных каналов, характеризующих состояние растительного и почвенного покрова. Они получаются в результате применения математических операций над спектральными каналами спутниковых снимков и качественных 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. 2). 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 состояния 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 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.

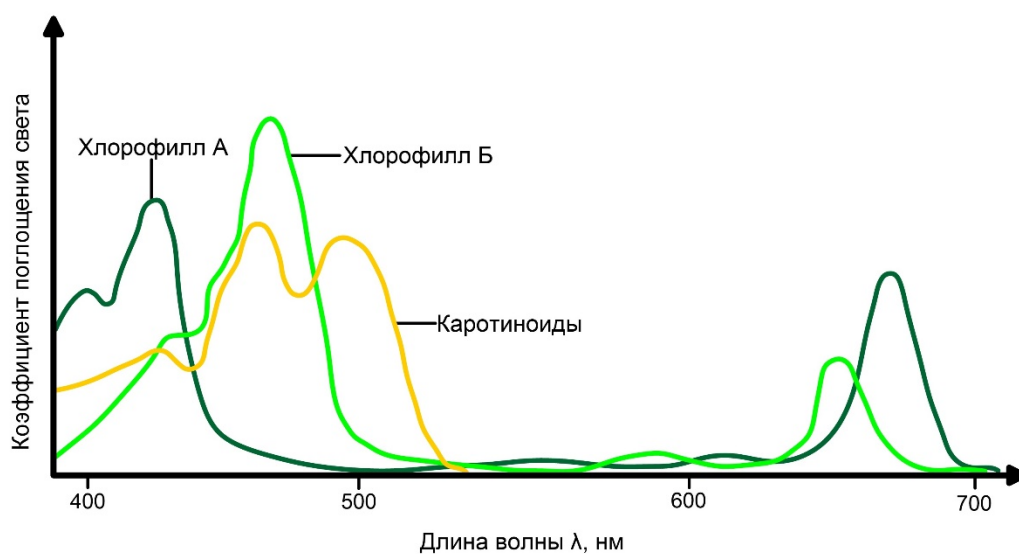


Рисунок 2 – Спектральные характеристики поглощения света хлорофилла а и b, отражающие максимальную фотосинтетическую активность в красном и синем диапазонах спектра

Таблица 1 – Используемые вегетационные индексы

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	$TSAVI = \frac{s \cdot (NIR - s \cdot RED - a)}{a \cdot NIR + RED - a \cdot s + X(1 + s^2)}$ где s и a – параметры наклона и пересечения почвенной линии, X – корректирующий показатель.	-1..1	>0,5 Зеленая приповерхностная растительность (ростки до 10 см высотой)
ARVI	Вегетационный индекс с коррекцией атмосферы	$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}$ $Rb = RED - a \cdot (RED - BLUE)$ 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 — показатель 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	$LAI = \frac{S_{\text{листьев}}}{S_{\text{почвы}}}$	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

Вегетационные индексы являются инструментом для анализа состояния растительности, объединяя в себе данные о спектральных свойствах растительного покрова и 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, сельском хозяйстве и планировании мероприятий биологического этапа 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 спектральные особенности, связанные с хлорофиллом, тогда как для разреженной растительности необходимы методы, позволяющие учитывать дополнительные показатели, такие как спектральные свойства почвы.

Таким образом учет специфики угледобывающих районов в методике оценки состояния растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли заключается в следующем:

1. Спектральные характеристики районов добычи угля и их влияние на интерпретацию данных дистанционного зондирования. Угледобывающие районы обладают уникальными спектральными свойствами в оптическом и инфракрасном диапазонах. Эти поверхности характеризуются низкой отражательной способностью, высокой абсорбцией солнечного излучения по сравнению с естественными экосистемами. Кроме того, угольные массивы обладают высокой тепловой инерцией, что позволяет учитывать температурные контрасты при анализе многоспектральных данных. Игнорирование этих особенностей может привести к некорректной интерпретации данных аэрокосмического мониторинга, поскольку стандартные вегетационные индексы, такие как NDVI, могут давать искаженные значения в условиях наличия значительных площадей с низкоотражающими поверхностями.

2. Оценка деградации почвы и ее влияние на продуктивность растительности в районах угледобычи. Процессы рекультивации нарушенных земель сопровождаются формированием почв с низким содержанием гумуса, высокой плотностью и сниженной водоудерживающей способностью, что значительно ограничивает продуктивность

растительного покрова. В отличие от естественных почвенных условий, восстановление биологического потенциала в угольных разрезах требует длительного времени и специальных агротехнических мероприятий. Т.е. необходимо учитывать как почвенные индексы, с одной стороны, так и учитывать более слабую временную динамику во времени состояния растительного покрова.

3. Геоморфологические особенности угольных разрезов и их учет при анализе растительного покрова. Разработка угольных месторождений сопровождается формированием антропогенного рельефа, включая отвалы, угольные разрезы, дренажные системы и нарушенные участки с измененной экспозицией склонов. Такие геоморфологические особенности могут приводить к вариациям в спектральной отражательной способности поверхности, обусловленным углом падения солнечного света, различиями в температурных характеристиках и изменениями в распределении почвенной и растительной массы. Включение в методику параметров рельефа, таких как крутизна склонов и экспозиция поверхности, позволяет учитывать специфические условия роста растительности в угледобывающих районах, корректируя возможные погрешности при интерпретации спутниковых данных.

4. Влияние антропогенного загрязнения и пылевой нагрузки на отражательные свойства растительности. Эксплуатация угольных разрезов сопровождается значительным выбросом угольной пыли, аэрозолей и продуктов сгорания, что приводит к изменению оптических характеристик растительного покрова. Осаждение пыли на листовой поверхности снижает коэффициент отражения в ближнем инфракрасном диапазоне, что влияет на точность расчета вегетационных индексов. Кроме того, техногенные выбросы могут изменять химический состав почв, что в свою очередь сказывается на физиологическом состоянии растений. Включение в методику индексов, учитывающих степень загрязнения и влияние аэрозолей на спектральные характеристики растительности, позволяет корректировать данные ДЗЗ и более точно оценивать состояние растительного покрова в угледобывающих районах.

В третьей главе описаны основные составляющие разработанной методики оценки состояния растительного покрова в районах добычи угля на основе определения показателей лимитирующих факторов по данным ДЗЗ. Выполнен анализ показателей, лимитирующих продуктивность растительного покрова в районе разработки угольных месторождений. Обоснована методика оценки состояния растительного покрова по данным ДЗЗ на основе показателей лимитирующих факторов. Представлен алгоритм расчетов в рамках указанной методики. На основе выбранных показателей состояния растительного

покрова, предложена модель, которая позволяет выполнять оценку состояния растительности, в том числе на биологическом этапе рекультивации земель.

Одним из перспективных направлений в контексте ДЗЗ является использование показателей лимитирующих факторов для оценки состояния растительного покрова. Они представляют собой характеристики или показатели, которые ограничивают рост, развитие или общее состояние растительности. В рамках ДЗЗ эти показатели могут быть выявлены на основе спектральных данных, вегетационных индексов и их композитов. Идентификация лимитирующих факторов помогает определить, какие именно условия ограничивают вегетационную активность растительного покрова в районах разработки угольных разрезов. Это позволяет классифицировать растительный покров по степени воздействия лимитирующих факторов, таких как загрязнение, влажность, рельеф и качество почвы.

Разработана методика с учетом биогеохимических процессов в растительном покрове, позволяющая оценивать состояние растительности путем выявления показателей лимитирующих факторов с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Определение этих показателей происходит через анализ флуоресценции растительности, что возможно благодаря высокой спектральной чувствительности спутниковых сенсоров. Методика позволяет создавать картографические модели, отражающие воздействие природных и антропогенных условий на качество растительности. Присваивая каждому пикселю соответствующий технический класс, можно планировать мероприятия на биологическом этапе рекультивации земель, учитывая показатели лимитирующих факторов, которые ограничивают вегетационную активность растительного покрова.

Методика, учитывающая биогеохимические показатели растительного покрова, может быть автоматизирована и интегрирована в ГИС, такие как QGIS и Google Earth Engine. Такой подход позволяет выполнять большие объемы вычислений и анализировать данные за различные временные промежутки. Таким образом, использование автоматизированной методики в ГИС-среде обеспечивает более эффективный и масштабируемый способ оценки состояния растительного покрова.

Биогеохимический цикл растительного покрова включает в себя различные процессы, такие как фотосинтез, дыхание, транспирация, рост и отмирание растений. В процессе разработки угольных разрезов происходит нарушение этого цикла, что приводит к деградации растительного покрова. Все эти процессы возможно детектировать с помощью данных дистанционного зондирования Земли из космоса на основе изменения флуоресценции растений. На основании этого предлагается следующая методика оценки состояния растительного покрова по данным ДЗЗ:

1. Определение показателей качества вегетационной активности растительного покрова. В качестве показателя выбирается феноботанический индекс, характеризующий исследуемое состояние растительного покрова, в частности для заданного вектора диссертационного исследования – это в первую очередь индексы, характеризующие именно фотосинтетическую активность растительного покрова.
2. Определение показателей лимитирующих факторов растительного покрова в исследуемой области. В качестве показателей принимается комплекс геоэкологических характеристик (см. предыдущий раздел), выраженных в виде феноботанических, почвенных, геоморфологических и геологических индексов и признаков, отражающих основные свойства исследуемой природно-технической системы и потенциально ограничивающей показатели качества из п. 1.
3. В случае, если показатели имеют отличающуюся метрику (вычисляются в разных шкалах или размерностях) – необходимо их нормировать относительно показателей качества из п. 1.
4. Вычисление показателя лимитирующего фактора, относительно выбранного показателя качества нормализованным дифференциальным индексом (в шкале от 1 до +1). Такое соотношение показывает по сути своей то, как показатель качества зависит (ограничивается) от показателя лимитирующего фактора.
5. Последующий анализ (динамический, статический, корреляционный) и картографическая интерпретация данных. В результате будет получена количественная относительная оценка того, как показатель качества потенциально может быть лимитирован местными природными или антропогенными условиями, и в какой степени.

Последовательность проведения расчетов.

1. *Определение показателей качества растительного покрова.* В качестве показателей качества, отвечающих целям и задачам мониторинга растительного покрова в районах разработки угля целесообразно использовать вегетационный индекс NDVI (характеризующий общую фотосинтетическую способность растительного покрова) и индекс TSAVI (нацеленный больше на приповерхностную растительность) (рис. 3). В случае наличия густого растительного покрова вокруг месторождения, целесообразно использовать единственный показатель – GNDVI.

2. *Определение показателей лимитирующих факторов.* В качестве показателей лимитирующих факторов используются определяющие местные условия продуктивности растительного покрова и имеющие изменчивость на территории исследований. К примеру,

такие показатели как – солнечная радиация (количество энергии), количество осадков и др. невозможно измерить на локальной территории 100 км² с шагом сетки 30-50 м. Поэтому в данном случае они являются условно постоянными для выполняемых расчетов и относительно них показатели качества не вычисляются. К группе факторов относятся: влагонасыщенность почвы и растительности (определяется индексом NDWI), температура поверхности (определяется индексом LST), засоленность почв (определяется индексом NDSI), коэффициент уклона поверхности, коэффициент экспозиции поверхности, коэффициент яркости (рис. 3).

3. *Приведение показателей качества и показателей лимитирующих факторов к единой шкале измерений.* Приведение показателей качества и показателей лимитирующих факторов к единой шкале измерений методом нормализации значений ключевой этап в анализе данных, позволяющий сопоставлять и сравнивать различные показатели, которые изначально могут иметь разные единицы измерения и диапазоны значений. Процедура нормализации значений включает несколько этапов:

1й этап – нормирование исходных показателей качества и показателей лимитирующих факторов. На первом этапе все полученные выше характеристики приводятся к единой шкале безразмерных измерений в интервал от 0 до 1. Для этого выполняется min-max нормализация:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

где X – исходное значение параметра в ячейке раstra;

X_{norm} – нормализованное значение параметра в ячейке раstra в диапазоне от 0 до 1;

X_{min} – минимальное значение параметра раstra;

X_{max} – максимальное значение параметра раstra.

Минимальные и максимальные значения вычисляются в виде зональных статистик раstra в ГИС.

2й этап – вычисление разностного индекса нормированных показателей качества относительно показателей лимитирующих факторов. На втором этапе оценивается влияние лимитирующего фактора на показатель качества растительного покрова в шкале от -1 до 1. Для этого вычисляется нормализованный разностный дифференциальный индекс:

$$Lim_f = \frac{Qual_{norm} - Lim_{norm}}{Qual_{norm} + Lim_{norm}}$$

где Lim_f – индекс показателя качества, лимитированного фактором f в ячейке раstra, в диапазоне от -1 до 1;

$Qual_{norm}$ – нормализованное значение показателя качества в ячейке раstra в диапазоне от 0 до 1;

Lim_{norm} – нормализованное значение показателя лимитирующего фактора в ячейке раstra в диапазоне от 0 до 1.

Таким образом Lim_f показывает то насколько сильно лимитирующий фактор Lim_{norm} ограничивает показатель качества $Qual_{norm}$ (рис. 4).

3й этап – вычисление интегрального показателя состояния растительного покрова. На третьем этапе определяется интегральный показатель всех значений Lim_f . Интегральный показатель предлагается рассчитывать в виде среднего арифметического:

$$I_{lim} = \sum_{i=1}^n \frac{Lim_f^i}{n}$$

где I_{lim} – интегральный показатель показателя состояния растительного покрова по выбранному показателю качества в ячейке раstra, в диапазоне от -1 до 1;

n – количество нормализованных показателей лимитирующих факторов Lim_{norm} ;

i – порядковый номер нормализованного показателя лимитирующего фактора Lim_{norm} .

4й этап – построение картографических моделей I_{lim} , их последующий анализ в ГИС, интерпретация и анализ данных (рис. 5).

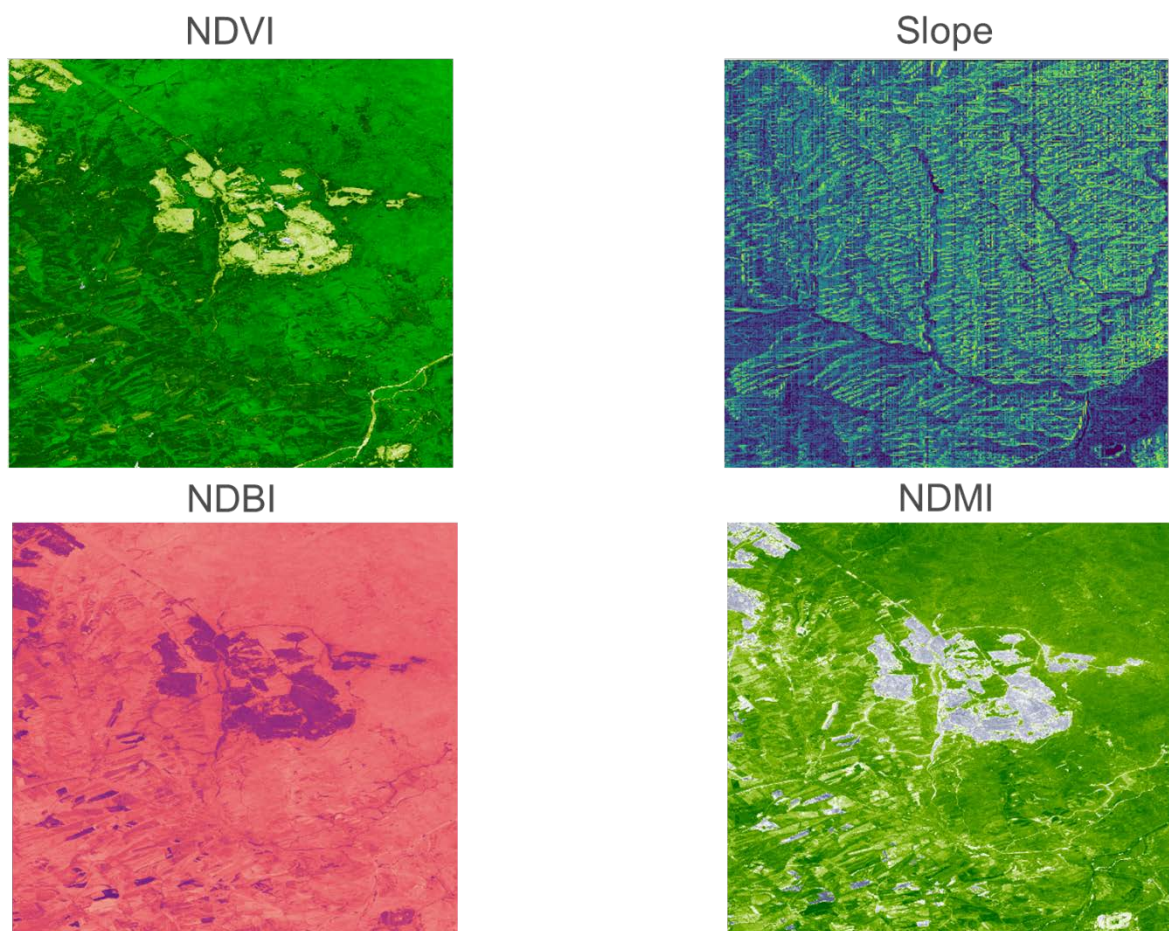


Рисунок 3 – Исходные данные для тестового расчета

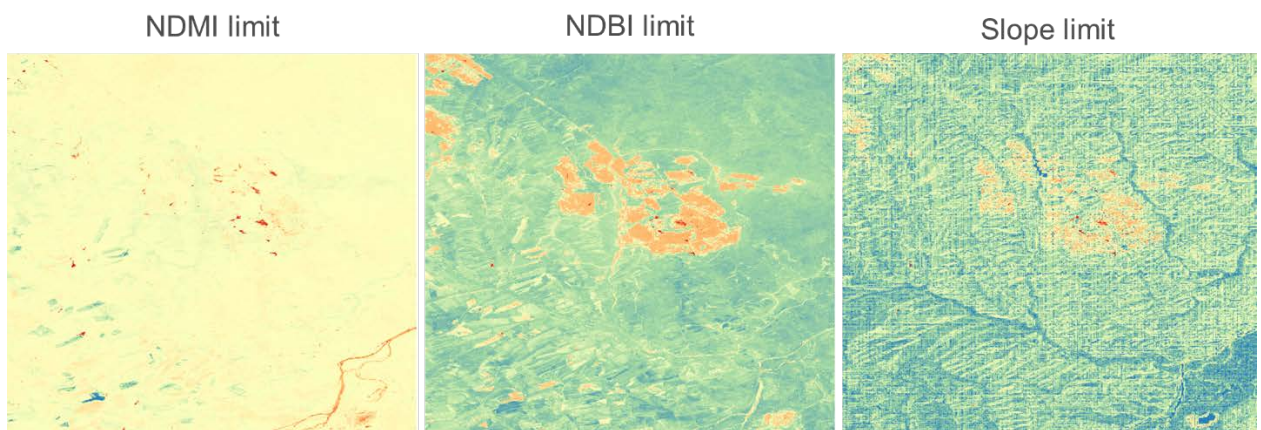


Рисунок 4 – Нормализованный разностный дифференциальный индекс показателей лимитирующих факторов относительно NDVI

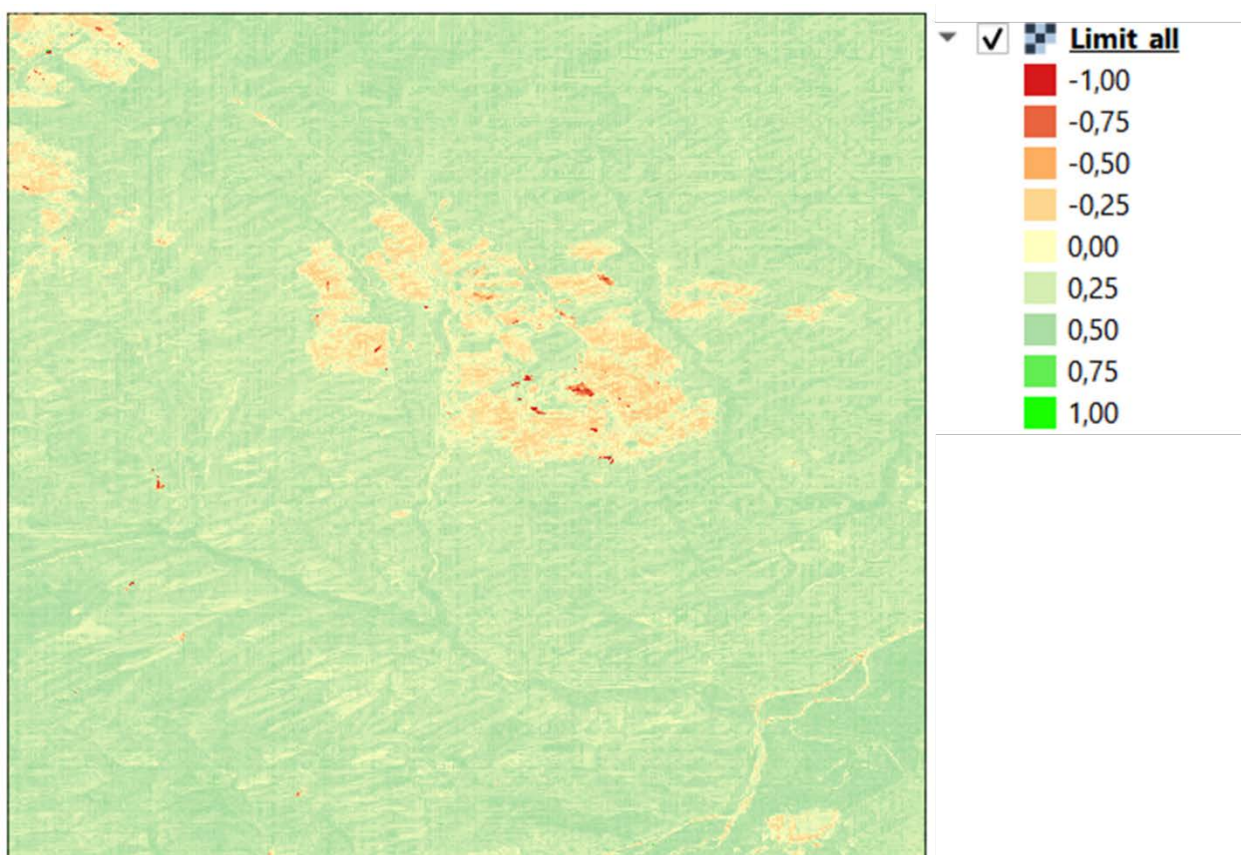


Рисунок 5 – Интегральный показатель состояния растительного покрова относительно NDVI. Index < 0 – За пределами устойчивости, отсутствие условий для вегетации. Index = 0 – Предел устойчивости растений. Index > 0 – Диапазон устойчивости, наличие возможности вегетации. 0 < Index < 0.2 – Диапазон деструктивного воздействия и угнетения растительности. 0.2 < Index < 0.4 – Диапазон продуктивного воздействия. Index > 0.4 – Диапазон оптимума вегетации

В четвертой главе представлены результаты апробации разработанной методики, полученные путем анализа пространственно-временной изменчивости состояния растительного покрова в районе Талдинского угольного месторождения. В этой части работы представлен анализ спутниковых данных, а также обоснование выбора метода для оценки влияния угольного разреза на вегетационную активность растительности, основанного на данных дистанционного зондирования Земли. Проведен анализ состояния растительного покрова на Талдинском угольном месторождении, а также предложены рекомендации по внедрению разработанного подхода в систему экологического контроля, включая государственный, общественный и промышленный уровни, с применением данных ДЗЗ.

Талдинское каменноугольное месторождение расположено в центральной части Ерунаковского геолого-экономического района Кузбасса. Площадь рассматриваемого

участка составляет 25,62 км². Географические границы месторождения в значительной степени определяются высокой угленосностью разреза, превосходящей соседние площади, а также геолого-тектонической обособленностью региона. Основными объектами рекультивации на территории являются отвалы породы, которые на момент завершения эксплуатации участка открытых горных работ занимают значительную площадь.

Для анализа антропогенного воздействия угольного разреза на растительность были выбраны участки, расположенные в аналогичных физико-географических условиях, но отличающиеся по уровню антропогенного воздействия. Эти участки включают полигоны А, В, С и D (см. рис. 6). При этом учитывались такие параметры, как высотное положение, местный рельеф, а также близость к водным объектам. В каждой из выбранных пар участков были использованы идентичные классы растительности: низкорослая растительность на полигонах В и С и древесная растительность на полигонах А и D, что позволило стабилизировать природные факторы, влияющие на продуктивность растительности. Для анализа антропогенного воздействия полигоны А и В были выбраны как расположенные на минимальном расстоянии от угольного разреза, в основном направлении преобладающего ветра (что позволяет им находиться в зоне воздействия воздушного загрязнения и в радиусе депрессионной воронки разреза), в то время как полигоны С и D были выбраны на расстоянии до 10 км от разреза, в наименее подверженных направлениях ветра.

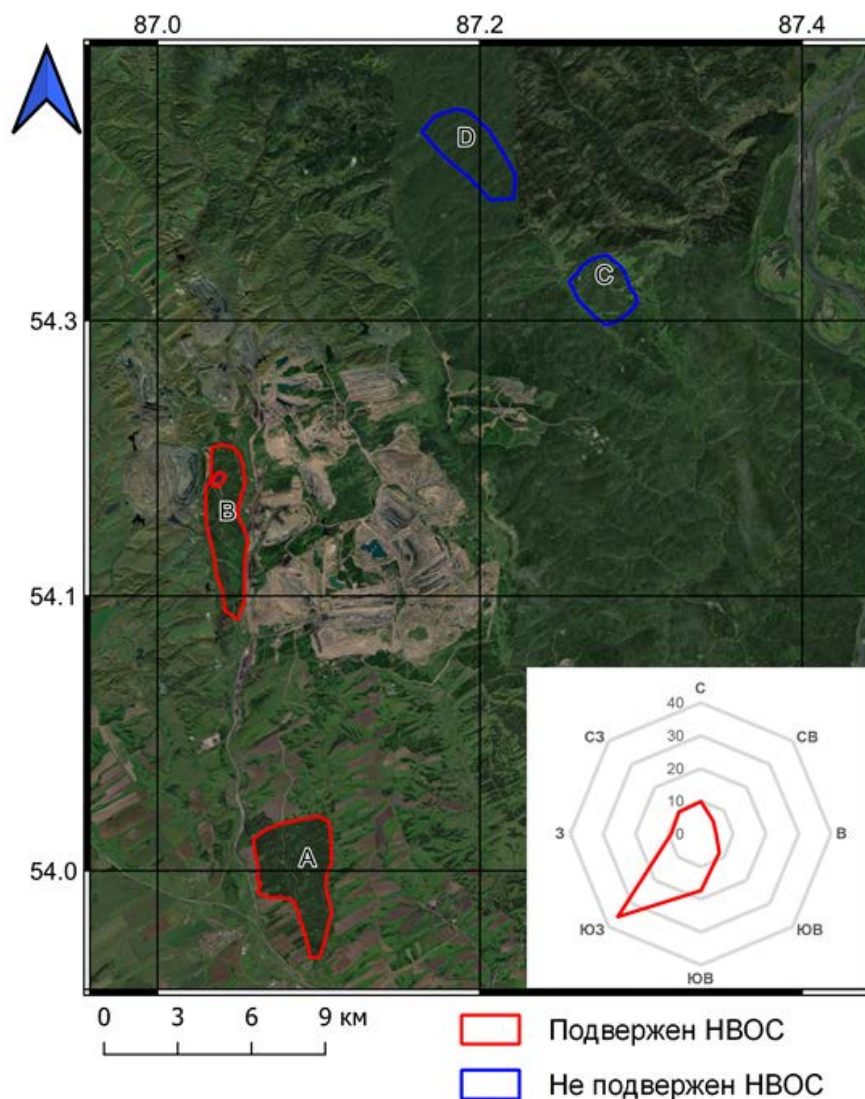


Рисунок 6 – Положение тестовых участков потенциально подверженных и не подверженных негативному воздействию Талдинского угольного месторождения

Детальное сопоставление временного хода NDVI для выбранных участков показало, что растительный покров около разреза в среднем имеет более низкие (от 0.08 до 0.12) по отношению к значениям индекса на участках, не подверженных негативному воздействию угольного разреза. На основе аппроксимации данных и анализа полученных результатов установлена связь деградации растительности с антропогенным воздействием угольного разреза (рис. 7). Обоснованность применения данных ДЗЗ подтверждается анализом десятилетней динамики показателя NDVI. Исследование показало, что деятельность угольного разреза приводит к изменениям в значении NDVI в пределах 0,1 единицы. Такой уровень вариации, обусловленный эксплуатацией разреза, различим спутниковыми сенсорами, что свидетельствует о возможности инструментальной регистрации изменений в растительности (рис. 7). Применение данных ДЗЗ для мониторинга экологических

последствий горнодобывающих работ является обоснованным, поскольку позволяет выявлять и отслеживать даже незначительные изменения в экосистемах. Этот подход позволяет оценить влияние угольных разрезов на окружающую среду.

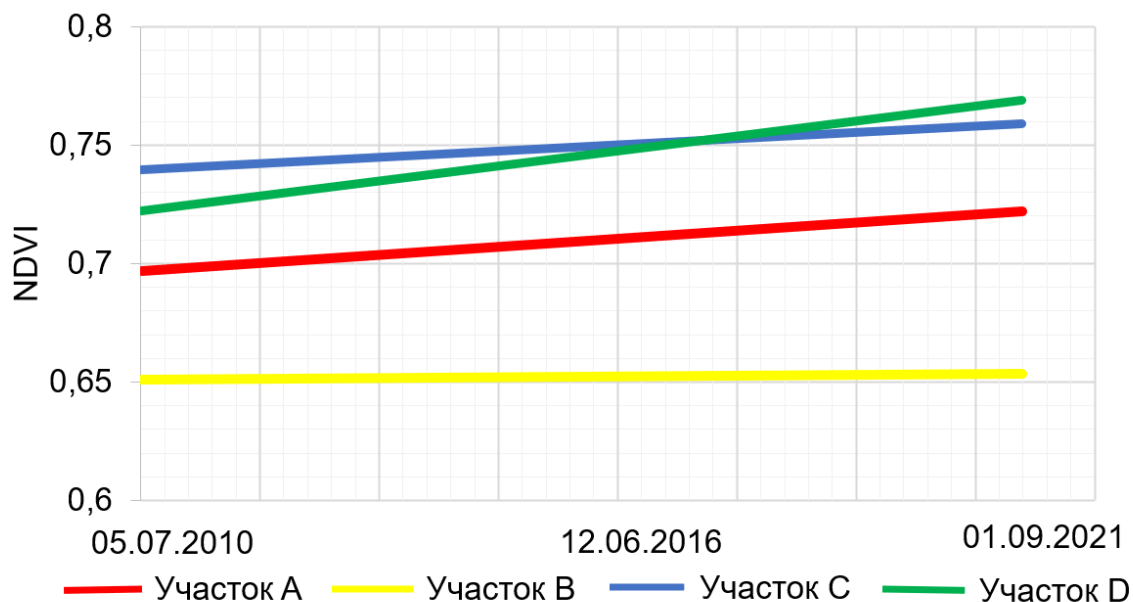


Рисунок 7 – Линейная аппроксимация временного хода превышения NDVI участков, потенциально не подверженных негативному воздействию над участками в зоне негативного воздействия угольного разреза

Согласно разработанной методике, была проведена оценка состояния растительности в районе Талдинского угольного разреза за период с 2019 по 2024 год в летний сезон (с мая по сентябрь). Рассчитан обобщённый показатель состояния растительного покрова на основе индекса NDVI. Для анализа использовались спутниковые изображения с Landsat-8 и модель рельефа SRTM в качестве исходных данных. В результате получен набор из 30 картографических моделей (рис. 8–9). Сезонные изменения показателя позволяют выявить состояние растительного покрова и влияние антропогенной нагрузки на экосистему в целом. В весенние месяцы наблюдается низкий уровень продуктивности растительного покрова, что связано с началом вегетационного периода. Летние месяцы (июнь, июль и август) характеризуются повышением продуктивности растительного покрова, однако локально интегральный показатель может снижаться, что обусловлено активной хозяйственной деятельностью, особенно в период интенсивной эксплуатации угольных месторождений. За шесть лет наблюдений (2019–2024 гг.) отмечено постепенное увеличение зон деградации, особенно в 2023 и 2024 годах. Это может быть связано с увеличением масштабов добычи угля и усилением техногенного

влияния на окружающую среду. Несмотря на временные улучшения интегрального показателя в конце сезонов, общее состояние растительности остаётся неудовлетворительным.

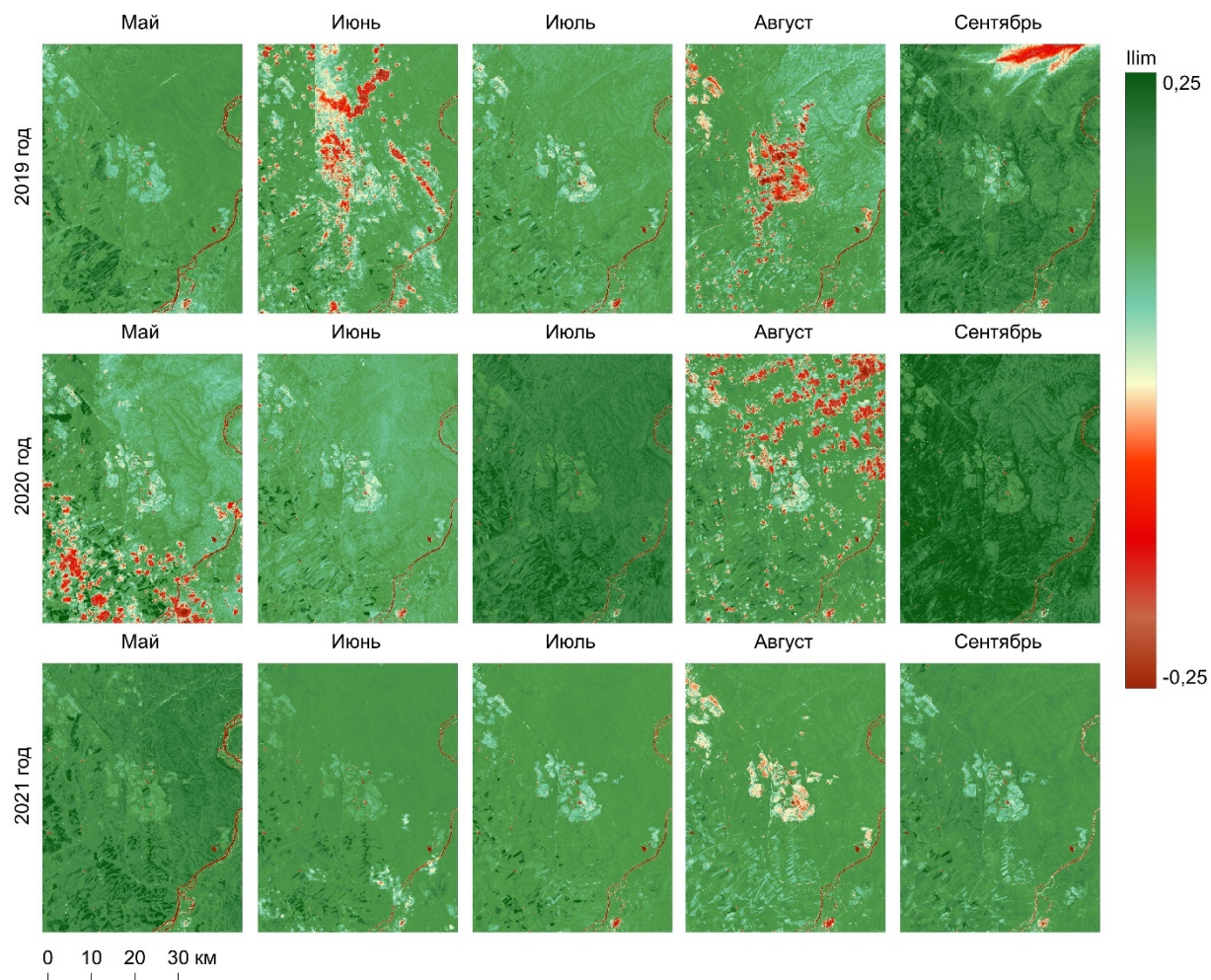


Рисунок 8 – Результаты расчетов интегрального показателя состояния растительного покрова относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2019–2021 гг.

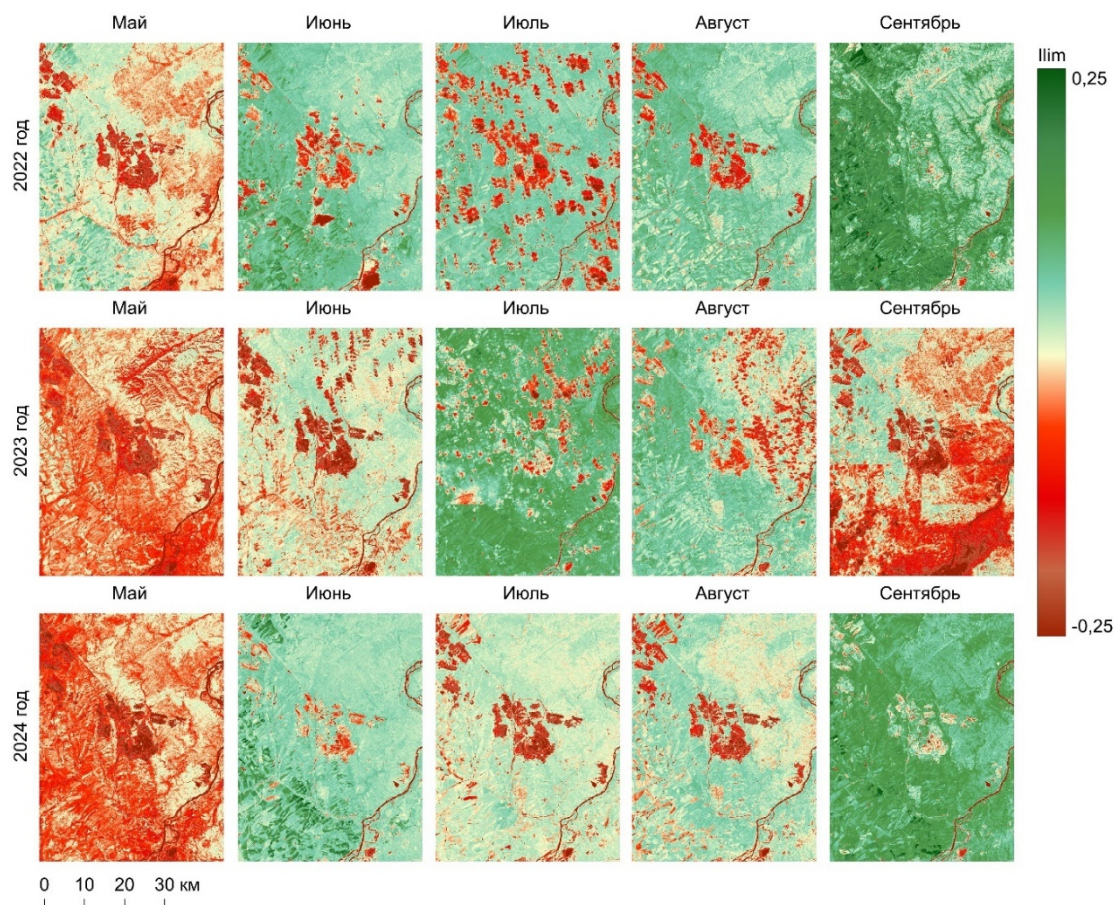


Рисунок 9 – Результаты расчетов интегрального показателя состояния растительного покрова относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2022–2024 гг.

На отвалах растительный покров остаётся в критическом состоянии. В летние месяцы качество состояния растительности на отвалах значительно снижается, что может быть связано как с воздействием добычи, так и с интенсивным иссушением почвы. Пропуски данных, вызванные облачностью, вносят некоторую неопределённость в анализ, однако основные тенденции остаются очевидными.

При этом не для каждого временного интервала была возможность отобрать безоблачный снимок. Это приводит к наличию артефактов на спутниковых снимках. Характерные модели приведены на рис. 10. Они включают в себя модели с высокой облачностью, которые исключались из анализа (рис. 10а), модели с низким уровнем вегетации из-за метеорологических условий (характерно для месяцев мая и сентября некоторых лет, рис. 10б) и модели без артефактов расчетов (рис. 10в).

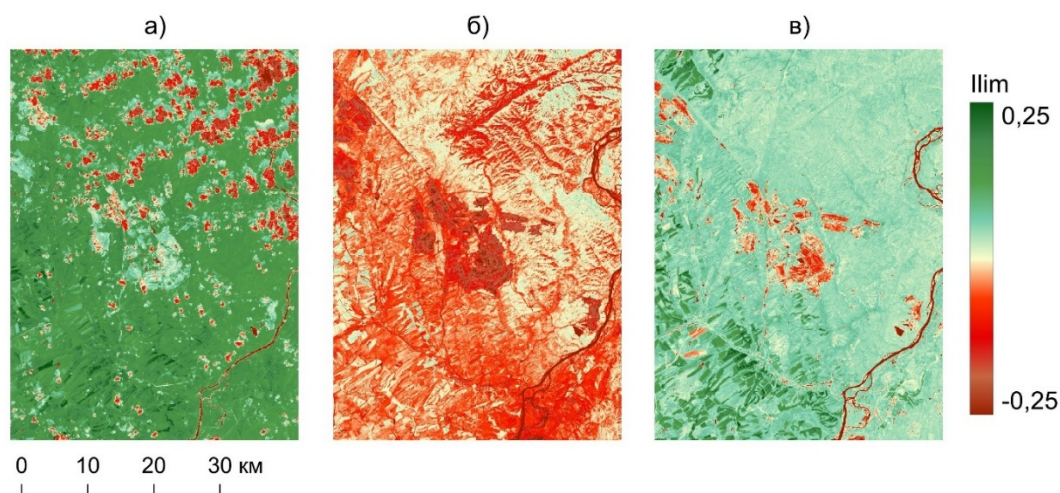


Рисунок 10 – Иллюстрация артефактов моделирования. а – модели с высокой облачностью; б – модели с низким уровнем вегетации из-за метеорологических условий; в – модели без артефактов расчетов.

Таким образом часть снимков при детальном изучении территории Талдинского угольного месторождения следует исключить из анализа (при облачности снимка более 35%). Мелкомасштабные модели представлены на рис. 11–12. Рассмотрим сезонные изменения и динамику растительного покрова, с акцентом на состояние рекультивированных земель и территорий вокруг отвалов. Исследование изменений интегрального показателя состояния растительности, основанного на индексе NDVI, за период с 2019 по 2024 годы, указывает на неблагоприятную экологическую ситуацию в районе Талдинского угольного месторождения. Рекультивированные земли демонстрируют частичное восстановление растительного покрова, особенно в конце вегетационного периода (август–сентябрь). Однако восстановление идёт медленными темпами, что связано как с техногенными нагрузками, так и с природными факторами. В частности, погодные условия, включая засухи и сезонные колебания влажности, оказывают значительное влияние на состояние растительности. Эти изменения чётко прослеживаются в годах с особенно неблагоприятными климатическими условиями, такими как 2020 и 2023 годы, когда на картах зафиксировано увеличение площади деградированных участков.

Динамика показателя состояния растительного покрова экосистемы показывает, что восстановление растительности возможно, но требует контроля соответствующих восстановительных мероприятий. Необходим контроль мероприятий на биологическом этапе рекультивации, включая посадку устойчивых к климатическим условиям видов растений, и проводить регулярный мониторинг состояния растительного покрова. Важно

учитывать природные факторы и адаптировать подходы к восстановлению экосистемы с учётом климатических условий, чтобы повысить эффективность мероприятий по восстановлению нарушенных территорий.

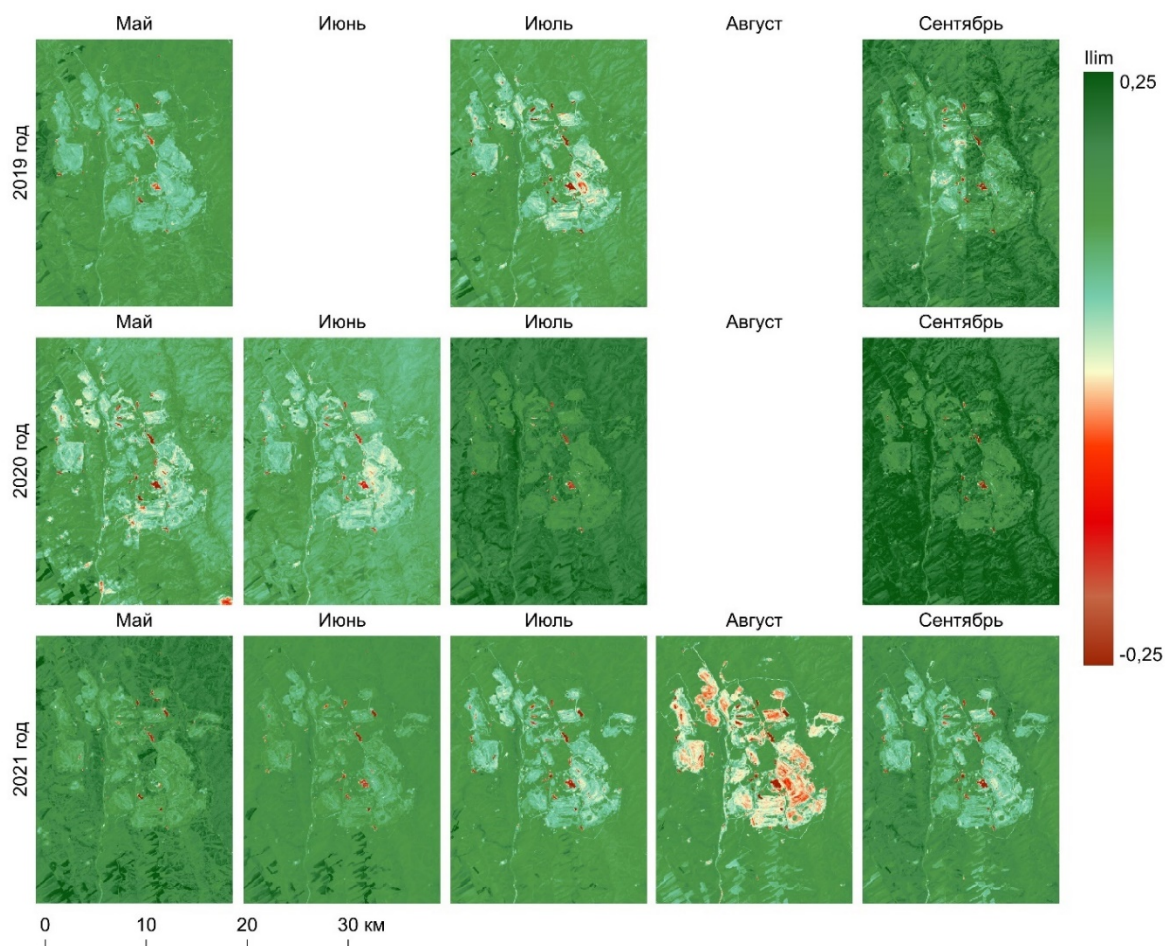


Рисунок 11 – Результаты расчетов интегрального показателя состояния растительного покрова относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2019–2021 гг.

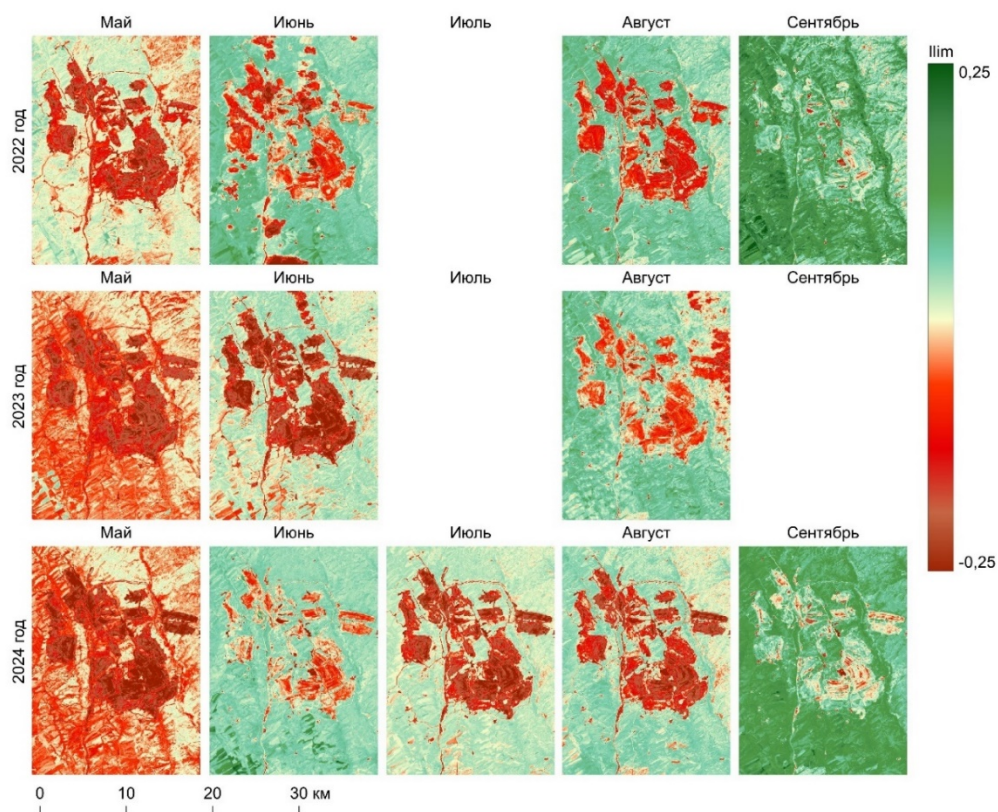


Рисунок 12 – Результаты расчетов интегрального показателя состояния растительного покрова относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2022–2024 гг.

С точки зрения современного экологического законодательства, методика может быть успешно применена для государственного, общественного и промышленного экологического контроля, поскольку она обеспечивает достоверные данные для мониторинга экологических показателей, выявления отклонений от нормативов и оценки эффективности наилучших доступных технологий.

Методика, базирующаяся на данных ДЗЗ, может служить основой для долгосрочного мониторинга, позволяя отслеживать динамику изменений в экосистемах и реагировать на негативные тенденции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, на основе комплекса исследований решена задача разработки и обосновании методики оценки состояния растительного покрова в районах открытой разработки угля с применением данных ДЗЗ и учетом лимитирующих факторов, выраженных в виде нормированных показателей определенного набора спутниковых вегетационно-почвенных индексов. Предлагаемая методика позволяет реализовывать мониторинг состояния растительного покрова, основанный на особенностях спектральных свойств почвы и растений, что имеет больше значение для задач оценки состояния растительного покрова на биологическом этапе рекультивации нарушенных земель в районах угледобычи.

Получены следующие основные результаты:

1. В результате проведенных исследований установлено, что применение существующих методик оценки качества земель в районах разработки месторождений угля открытым способом приводит к высоким эксплуатационным, временным и экономическим затратам в рамках выполнения регулярных мониторинговых мероприятий, особенно в условиях труднодоступных территорий и больших площадей исследований. Регулярные лабораторные и полевые исследования требуют значительных человеческих и материальных ресурсов, что делает его затруднительным для реализации в больших масштабах. Эти факторы указывают на необходимость совершенствования методов оценки и мониторинга состояния растительного покрова при открытой добыче угля.

2. Анализ фенотаботанических вегетационных и почвенных индексов, используемых в дистанционном зондировании Земли, выявил их ограниченную эффективность в качестве самостоятельных методик для оценки качества земель. Несмотря на то, что вегетационные индексы являются основным инструментом для мониторинга растительности, они не обеспечивают многофакторного анализа состояния земель, особенно в районах с разреженной или скудной растительностью, где показатели могут зависеть от спектральных характеристик почвы. Анализ показал, что данные дистанционного зондирования Земли из космоса позволяют качественно оценивать изменение состояния рекультивируемых земель в районах разработки угольных разрезов в пределах до 5-12% относительного изменения вегетационных индексов.

3. Анализ показателей лимитирующих факторов, выполненный с применением дистанционного зондирования Земли, позволил выявить ключевые показатели, которые ограничивают рост и продуктивность растительности в районах разработки угольных разрезов. Спутниковые данные и вычисляемые из них показатели дают возможность учитывать такие показатели, как загрязнение, влажность, рельеф и качество почвы. Такой

анализ позволяет классифицировать растительность по степени ограничения и создавать картографические модели, отражающие воздействие природных и антропогенных факторов.

4. Разработана методика оценки состояния растительного покрова земель в районах открытой разработки угля с применением данных дистанционного зондирования Земли, основанная на биогеохимических процессах растительности. Результат ее применения заключается в вычислении интегрального показателя качества состояния растительности относительно лимитирующих факторов в виде набора спутниковых индексов и позволяет оценить состояние растительности единственным показателем. На основе выбранных показателей предложена модель, которая позволяет выполнять оценку состояния растительности, в том числе на биологическом этапе рекультивации земель. Методика позволяет создавать картографические модели, отображающие влияние природных и антропогенных факторов. Данная методика может быть автоматизирована и интегрирована в геоинформационные системы, что обеспечивает более эффективный анализ и масштабируемый мониторинг.

5. Динамический анализ вегетационной активности, выполненный с использованием данных дистанционного зондирования Земли для территории Талдинского угольного разреза, выявил негативную динамику изменения интегрального показателя. Это указывает на ухудшение состояния растительности, вызванное воздействием открытых угледобывающих работ. Наблюдается снижение плотности растительности, а также признаки деградации почвы.

6. На основе проведенных исследований разработан алгоритм реализации новой методики оценки состояния земель в рамках геоинформационных систем. Методика использует данные ДЗЗ для мониторинга земного покрова, что позволяет выполнять оперативный анализ состояния растительности и определять области с резкой отрицательной вегетационной динамикой. Этот подход соответствует современному экологическому законодательству и может служить инструментом для эффективного мониторинга в рамках государственного, общественного и производственного контроля.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы:

В научных журналах рекомендованных ВАК и/или индексируемых в системе Scopus:

1. **Маневич П.П.**, Антошин В.В., Коликов К.С. Вегетационные и почвенные индексы для спутникового мониторинга земель в районах открытой разработки угля // Горная промышленность. №1. с. 120–124. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-120-124.

2. Камаев А.А., **Маневич П.П.**, Сатулабова М.С. Мониторинг состояния растительного покрова в районе разработки Кедровского угольного разреза на основе спутниковых данных // Горная промышленность. 2023. №2. с. 70–74. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-70-74.

3. **Маневич П.П.**, Коликов К.С. Обоснование метода оценки негативного воздействия угольного разреза на вегетационную активность растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли из космоса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №11. с. 109–120. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_109.

4. Гришин В.Ю., Удалова Н.П., **Маневич П.П.** Риск-ориентированный подход в экологическом надзоре при подземной разработке угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №. 6-1. с. 46–54 . DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-46-54.

5. Мазина И.Э., **Ганган П.П. (Маневич П.П.)**, Фан Туан Ань Снижение негативного воздействия на окружающую среду с использованием технологии закладки выработанного пространства при подземной разработке угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №2. с. 28–35. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-28-35.

Прочие публикации:

6. Удалова Н.П., **Ганган П.П. (Маневич П.П.)** Современные области применения породных отвалов горнодобывающем предприятии // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Vol.5. №2. с. 79–85. DOI: 10.2205/2017BS045.

7. **Manevich P.** Model for assessing vegetation condition in coal mining areas based on limiting factors and remote sensing data (1.0). Zenodo. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.14853197.