

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

На правах рукописи

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

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Коликов Константин Сергеевич

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ современного состояния методов экологического мониторинга состояния земного покрова в районах добычи угля открытым способом.....	9
1.1 Негативное воздействие угольных разрезов на окружающую среду.....	9
1.2 Экологический мониторинг состояния земель в районах открытой добычи угля.....	15
1.3 Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса для экологического мониторинга земного покрова.....	22
1.4 Выводы по главе 1	31
2 Биоиндикационная оценка состояния растительного покрова на основе данных дзз из космоса	33
2.1 Анализ методик оценки качества земель	33
2.1.1 Анализ физико-химических показателей почвы	33
2.1.2 Индексы загрязнения почвы.....	36
2.1.3 Биотестирование почвы	44
2.2 Вегетационные индексы для оценки состояния растительного покрова...52	
2.3 Цветовой синтез изображений и композитирование каналов.....	69
2.4 Выводы по главе 2	73
3 Разработка и обоснование методики оценки состояния земель при открытой разработке угля на основе определения лимитирующих факторов по данным дзз.....	75
3.1 Факторы, лимитирующие продуктивность растительного покрова в районе разработки угольных месторождений	75
3.2 Методика оценки состояния растительного покрова по данным ДЗЗ на основе лимитирующих факторов.....	86
3.3 Алгоритм расчетов и программная реализация.....	88
3.4 Выводы по главе 3	92

4	Анализ пространственно-временной изменчивости состояния земель по комплексному индексу лимитирующего фактора	94
4.1	Обзор используемых данных спутниковых миссий	94
4.2	Обоснование метода оценки негативного воздействия угольного разреза на вегетационную активность растительного покрова по данным ДЗЗ из космоса	103
4.3	Оценка состояния растительного покрова Талдинского угольного месторождения.....	109
4.4	Государственный, общественный и производственный экологический контроль на основе данных ДЗЗ	116
4.5	Выводы по главе 4	120
	Заключение.....	121
	Список использованной литературы	123
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1	140

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.

Объем и структура работы. Научно-квалификационная работа содержит 140 страниц машинописного текста, 44 рисунка, 12 таблиц. Она состоит из: введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы из 198 наименований.

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.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОГО ПОКРОВА В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ УГЛЯ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

1.1 Негативное воздействие угольных разрезов на окружающую среду

Уголь является одним из наиболее широко используемых источников энергии в мире, и его добыча с каждым годом растет. В соответствии с Программой развития угольной промышленности России на период до 2025 года планируется увеличение ввода мощностей добычи угля, повышение доли добычи угля открытым способом до 83%, достижения уровня рекультивации земель от годового нарушения до 66–99% и снижения сбросов и выбросов загрязняющих веществ при добыче угля [*Программа...*, 2020].

Угольные разрезы оказывают значительное влияние на окружающую среду, вызывая множество негативных последствий [*Allan, 1995*]. Среди них – загрязнение воздуха, почвы и воды, уничтожение растительного и животного мира, изменение гидрологического режима территории и климатические изменения. Кроме того, выбросы от угольных разрезов могут способствовать образованию кислотных дождей и загрязнению атмосферы мелкодисперсными частицами, что ведет к росту заболеваемости и смертности среди населения. Угольная промышленность занимает одно из лидирующих мест по объему выбросов парниковых газов, что усугубляет глобальное потепление и изменение климата.

Согласно данным доклада о состоянии окружающей среды за 2022 год, идет постепенное снижение техногенной нагрузки от угольной отрасли в целом – за счет прекращения производственной деятельности шахт и разрезов в результате реструктуризации угольной промышленности и внедрении наилучших доступных технологий [*Государственный...*, 2023].

Исследования в области негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) угольных разрезов на окружающую среду обрели большое значение в связи с увеличивающимся добычей угля в различных частях мира и растущим интересом к экологической устойчивости и уменьшению негативных воздействий промышленных операций [*Куприянов, 2017*].

В последние десятилетия активно исследуются инновационные технологии и методы для уменьшения негативного воздействия угольных разрезов на окружающую среду. Это включает в себя более эффективные методы добычи, снижение выбросов и разработку устойчивых практик [*Галанина, 2012*].

Общее направление исследований в этой области - поиск компромисса между потребностью в угле в качестве источника энергии и необходимостью минимизации экологических и социальных негативных последствий. Исследователи, инженеры и экологи

работают над разработкой решений, которые позволят удовлетворить энергетические потребности общества, не нарушая экологическую устойчивость и социальное благосостояние.

Добыча угля на угольных разрезах может иметь значительное воздействие на вегетацию в прилегающих районах. Это воздействие может быть как непосредственным, так и косвенным, и оно зависит от множества факторов, включая методы добычи, масштаб добычи, меры по охране окружающей среды и климатические условия [Манаков, 2012].

Процессы, связанные с добычей, включая взрывы и использование тяжелой техники, могут привести к загрязнению воздуха и влиять на его качество. Изменения климатических условий также важны в контексте добычи угля, поскольку они могут воздействовать на типы растительности, подходящие для данного региона. Однако, в некоторых случаях угольные компании осуществляют усилия по восстановлению ландшафта после добычи угля, включая проведение процедур рекультивации, такие как посадка новых растений и деревьев, что в долгосрочной перспективе может оказать положительное воздействие на вегетацию [Шугалей, 1996].

Важно отметить, что воздействие добычи угля на вегетацию может быть местным и зависит от конкретных условий в регионе. Меры по соблюдению стандартов охраны окружающей среды и эффективной рекультивации могут помочь смягчить негативные последствия. Также существует потенциал для разработки устойчивых методов добычи, которые минимизируют воздействие на вегетацию и природные экосистемы.

Добыча угля на угольных разрезах может оказывать значительное воздействие на гидрологический режим прилегающей растительности и окружающей экосистемы [Гуримский, 2010; Голохваст, 2017]. Вот некоторые из основных способов, как это воздействие может проявляться:

- Изменение уровня грунтовых вод.

В процессе угледобычи широко применяется метод дренажа подземных вод, что необходимо для обеспечения устойчивости горных выработок и безопасности ведения работ. Однако такая техногенная активность может стать причиной существенного снижения уровня грунтовых вод в прилегающих территориях. Данный процесс приводит к сокращению водоснабжения растительных сообществ, формирующихся на этих землях, что неизбежно сказывается на их физиологическом состоянии. Ограниченный доступ к влаге становится фактором, лимитирующим рост и развитие растительности, что проявляется в ухудшении биопродуктивности и деградации экосистем.

- Изменение стока рек и ручьев.

Добыча угля может изменить сток рек и ручьев в регионе. Это может происходить из-за изменений в геологической структуре, заслонения речных русел, а также из-за оттока воды в процессе добычи. Изменения в речном стоке могут повлиять на прилегающие водные экосистемы.

- Загрязнение водных и влажных экосистем.

Добыча угля может сопровождаться выбросами загрязняющих веществ в водные экосистемы [Качурин, 2016]. Это включает в себя выбросы тяжелых металлов, нефти и других вредных веществ. Это загрязнение может вызвать вымирание водной флоры и фауны.

- Эрозия почвы.

В результате добычи угля и строительных работ на угольных разрезах может возникнуть эрозия почвы, особенно на крутых склонах и открытых участках (см. рисунок 1.1). Это может привести к потере верхнего слоя почвы, который необходим для роста растений [Глазырина, 2002].



Рисунок 1.1 – Пример эрозии почвы в районе добычи угля [Rocha-Nicoleite et al., 2017]

- Изменение водных течений и режимов наводнений.

Добыча угля может изменить геоморфологию региона, включая русла рек и ручьев [Крутских, 2019]. Это может влиять на пути дренажа и водные течения, что может вызвать наводнения в неконтролируемых областях. Периодические наводнения могут нанести ущерб растительности и земельным угодьям (см. рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Наводнение в районе разработки Кедровского угольного разреза, Кемерово

Меры по охране окружающей среды и рекультивация.

Для смягчения негативных последствий добычи угля применяются меры по охране окружающей среды и рекультивация. Это включает в себя восстановление ландшафта после завершения добычи, создание барьеров для предотвращения загрязнения водных систем, а также меры для восстановления потерянных биоразнообразных экосистем.

Важно отметить, что воздействие добычи угля на гидрологический режим и вегетацию может сильно варьироваться в зависимости от конкретных условий месторождения, принимаемых мер по охране окружающей среды и местных климатических условий [Потапов, 2005; Манаков, 2015].

Антропогенное вмешательство в сфере добычи угля часто сопровождается формированием значительных отходов, таких как шламовые отвалы, содержащие химические вещества, тяжелые металлы и другие загрязняющие элементы [Голохваст, 2017]. Эти отходы могут вызвать нежелательные последствия для окружающей среды, если недостаточно обработаны и управляемы. Примером может служить образование шламовых отвалов на территориях угольных разрезов, где они могут содержать различные токсичные элементы, такие как свинец, ртуть, цинк, и кадмий, которые могут проникать в почву и загрязнять ее, ухудшая ее качество.

Процессы обработки угольной руды могут приводить к выбросам пыли и газов, что создает риск загрязнения почвы. Процессы экстракции угля могут также способствовать утечкам нефтепродуктов и разливам химических реагентов, таких как масла, топлива и

химические растворы. Пролиты таких веществ могут проникнуть в почву, вызывая загрязнение и ухудшение ее качества.

Неоптимальное управление отходами и процессы их утилизации также могут оказывать влияние на состояние почвы в окружающих районах. Например, неконтролируемое складирование отходов может вызвать загрязнение соседних земель и почвы, что затрагивает их качество и экологическую устойчивость [Данилов, 2017]. Этот процесс также связан с потенциальной угрозой для грунтовых вод, поскольку загрязненные стоки могут проникать в грунт и вызывать загрязнение водоносных слоев.

Добыча угля на угольных разрезах может оказывать значительное воздействие на атмосферное состояние прилегающих территорий. Этот процесс связан с рядом факторов и практик, которые могут негативно повлиять на качество воздуха и здоровье окружающего населения.

В таблице 1.1 приведены некоторые из ключевых аспектов негативного воздействия горных работ на окружающую среду, которые следует учитывать.

Таблица 1.1 – Влияние технологических процессов горной добычи на окружающую среду.

Технологический процесс	Виды потенциальных вредных воздействий
Выемка угля	Разрушение горных пород, изменение литологических содержаний в пределах района, создание структурных осложнений техногенного характера, осушение подземных вод, выбросы парниковых газов и пыли в атмосферу, перемещение горной массы,
Перенос горной массы на поверхность, обогащение	Создание искусственных ландшафтов путём формирования терриконов и групповых отвалов является частью процесса строительства и эксплуатации обогатительных комплексов. Это приводит к заболачиванию территории вокруг данных отвалов, а также к выбросу в региональную атмосферу пыли и продуктов горения угля из породных отвалов (терриконов) [Киреева, 2022]. Данные действия также приводят к загрязнению промышленных площадок шахт и прилегающих земель шламами, а также загрязнению водоёмов шламовыми водами.

Выкачка шахтных вод	Изменение естественной гидрогеологической системы на обработанных территориях и смежных участках. Загрязнение водных ресурсов рек и озёр от отходов шахт. Использование плодородных почв для размещения очистных сооружений шахт.
---------------------	---

Проведение горных работ вызывает разносторонние отрицательные последствия для окружающей среды, что приводит к значительному снижению позитивного экономического влияния добычи угля [Диколенко, 2003]. Это взаимодействие приводит к следующим негативным изменениям природной среды на территориях, используемых угольными предприятиями: деформация земной поверхности, формирование трещин, оврагов и искусственных водоемов; нарушение конструкций, зданий и сооружений в зоне горных работ; масштабное загрязнение плодородных почв, подземных и поверхностных водных систем региона; загазованность близлежащей атмосферы, выброс вредных газов из шахт; исключение обширных площадей плодородных земель из сельскохозяйственного использования.

Добыча и использование угля могут приводить к выбросу парниковых газов, таких как диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄), в атмосферу. Эти газы способствуют изменению климата и усилению парникового эффекта, что может оказать долгосрочное воздействие на климат и экосистемы.

Для смягчения воздействия добычи угля на атмосферное состояние прилегающих территорий применяются различные технологии и меры. Это включает в себя использование фильтров и систем очистки выбросов, соблюдение нормативов по выбросам парниковых газов, а также контроль за выбросами тяжелых металлов и других загрязнителей [Куприянов, 2017]. Дополнительно проводятся мониторинг качества воздуха и мероприятия по снижению шумового воздействия. Среди методов немаловажную роль играют применение методов очистки выбросов из шахт, улучшение систем вентиляции и управления пылью, применение более экологически чистых методов обогащения угля, а также реализацию программ по восстановлению нарушенных земель и водных объектов после завершения добычи. Дополнительные меры могут включать в себя ландшафтные рекультивации, создание и использование современных методов обработки отходов и повышение энергоэффективности в процессах добычи и транспортировки угля [Коваленко, 2013]. Эти усилия направлены на снижение негативного воздействия добычи угля на атмосферу и окружающую среду в целом.

1.2 Экологический мониторинг состояния земель в районах открытой добычи угля

При изучении территорий, подвергшихся воздействию горнодобывающей деятельности, можно выделить три ключевых направления исследований. Первое включает экологические изыскания, направленные на анализ состояния почв, водных ресурсов и растительного покрова.

Второе направление связано с геологическими исследованиями, позволяющими определить изменения в строении и механических характеристиках грунтов под влиянием техногенных факторов. Третья группа методов основана на использовании геофизических и дистанционных технологий, таких как аэро- и космическое зондирование, что позволяет проводить мониторинг изменений в ландшафтах и оценивать динамику их трансформации. [Артаев, 2014].

1) Инженерно-экологические изыскания

Инженерно-экологические изыскания представляют собой основу для экологического проектирования, обеспечивая ключевые сведения о состоянии окружающей среды. Их цель — сбор данных о текущем состоянии земельного участка и территории, выделенной под строительство. Эти изыскания позволяют оценить соответствие экологической ситуации санитарно-эпидемиологическим требованиям и правилам, а также определить соблюдение санитарно-защитных зон согласно СП 11-102-97. На основании полученных данных проводится прогнозирование возможных экологических изменений, а также разрабатываются меры по охране окружающей среды на этапе строительства. [Куприянов, 2017].

2) Инженерно-геологические изыскания;

Инженерно-геологические исследования современного этапа направлены на анализ условий геологической среды с учетом воздействия антропогенной деятельности на территории различного масштаба [Чувакин, 2017]. Основная задача этих исследований заключается в снижении экологических рисков и предотвращении возможных негативных последствий для природы. Для этого проводится комплексное изучение, разрабатываются специализированные программы и концепции, направленные на внедрение рациональных и экономически выгодных инженерных решений. Эти меры позволяют эффективно использовать земельные участки, сохранять природные ресурсы, создавать надежные системы геологической безопасности и обеспечивать грамотное планирование территорий. Кроме того, исследования способствуют разработке долгосрочных стратегий по защите окружающей среды и поддержанию стабильности экологических процессов. [Гальперин, 2010].

Основные принципы, определяющие инженерно-геологическую структуру территории, основываются на её вариативности и неоднородности, а также на взаимодействии природных и техногенных факторов, влияющих на процессы, происходящие в данной зоне.

Инженерно-геологические изыскания включают в себя разнообразные виды исследований, чтобы оценить геологические и геотехнические условия на определенной территории [Израэль, 1979]. Эти исследования необходимы для разработки безопасных и эффективных инженерных решений при строительстве и эксплуатации объектов. Основными компонентами инженерно-геологических изысканий являются:

- Геодезические изыскания включают измерение и картографирование территории, создание топографических карт и определение координат точек на поверхности.

- Геофизические исследования основаны на методах сейсмической, радиоактивной и электромагнитной съемки, позволяя получить данные о составе горных пород и грунтов, а также их физических свойствах.

- Бурение предполагает использование буровых установок для отбора образцов грунта и пород, которые затем анализируются на физико-химические характеристики.

- Гидрогеологические исследования направлены на оценку водоснабжения и водоотведения на территории, а также изучение подземных вод и их свойств.

- Геотехнические исследования помогают определить физические и механические характеристики грунтов и пород, оценить их несущую способность и устойчивость при строительстве.

- Инженерно-геологическое моделирование применяется для прогнозирования влияния строительных работ на окружающую среду и оценки стабильности грунтов в условиях измененной нагрузки.

- Анализ и оценка рисков позволяют выявить потенциальные геологические и геотехнические угрозы, связанные с реализацией строительных проектов.

Все эти компоненты в совокупности позволяют инженерам и геологам получить полную картину геологических и геотехнических условий на территории и разработать соответствующие меры для обеспечения безопасности и эффективности строительных работ.

В состав инженерных изысканий входят:

1. Сбор, обработка и анализ опубликованных и фондовых материалов и данных о состоянии природной среды.

Инженерно-геологические изыскания широко охватывают сбор, обработку и анализ разнообразных материалов и данных о состоянии природной среды на конкретной территории. Эти данные играют важную роль в понимании геологических и геотехнических характеристик местности и являются ключевым элементом подготовки к инженерному проектированию и строительству. Сбор, обработка и анализ опубликованных и фондовых материалов и данных являются неотъемлемой частью инженерно-геологических изысканий и помогают обеспечить безопасное и успешное выполнение инженерных проектов.

2. Экологическое дешифрирование различных видов съемок.

Процесс интерпретации данных, полученных с помощью различных средств наблюдения, таких как спутники, дроны и аэрофотосъемка, с целью извлечения информации о состоянии экосистем и воздействии человеческой деятельности.

Спутниковые снимки, например, позволяют отслеживать изменения растительного покрова, уровни воды и заболачивание на больших территориях [Гермак, 2013; Выпріцкій, 2022]. Экологическое дешифрирование этих данных может выявить признаки деградации экосистем, опасности для биоразнообразия или даже несанкционированной вырубке лесов.

Аэрофотосъемка и дроны обеспечивают возможность получения более высокоразрешенных изображений, что позволяет более детально изучать территории и мониторить состояние растительности, земельного пользования и заболачивания в более ограниченных областях [Абишева, 2021]. Экологическое дешифрирование этих данных может привести к выявлению экологических проблем на более узком масштабе, что может быть полезно для принятия конкретных мер по охране окружающей среды.

В целом, экологическое дешифрирование съемок играет важную роль в научных исследованиях, позволяя лучше понимать экосистемы и принимать обоснованные решения в области охраны окружающей среды.

3. Маршрутные наблюдения за состоянием экосистем.

Этот метод используется для мониторинга и оценки экологического состояния различных экосистем, включая леса, водные бассейны, горные районы и другие природные области.

Маршруты мониторинга обычно включают в себя выборку образцов по предварительно определенным точкам или участкам, где собираются данные о разнообразии видов, составе растительности, качестве почвы, состоянии водных ресурсов и других параметрах [Артаев, 2014]. Эти данные собираются регулярно, что позволяет отслеживать изменения во времени.

4. Полевые исследования играют ключевую роль в анализе влияния антропогенных факторов на экосистемы, позволяют фиксировать экологические изменения

и принимать меры по их защите. Эти исследования также применяются для отслеживания динамики распространения различных видов и контроля за изменениями в биоразнообразии и климатических условиях.

5. Получение информации путём проходки горных выработок.

Этот процесс включает в себя физическое проникновение внутрь горных пород с целью сбора данных о их составе, структуре и характеристиках.

Во время проходки горных выработок исследователи используют специализированное оборудование и инструменты, такие как буровые машины и горные лазеры, чтобы создать проходы и скважины в горных массивах. Это позволяет собирать образцы пород, изучать их физические и химические свойства, а также определять наличие и количество полезных ископаемых.

Этот метод широко используется в горнодобывающей промышленности и геологических исследованиях для получения ценной информации о составе и качестве рудных месторождений. Точность и полнота данных, получаемых при проходке горных выработок, позволяют принимать обоснованные решения о дальнейшей разработке месторождений и оптимизации горнодобывающих процессов [Двойников, 2022].

- гидрогеологические, геохимические и почвенные исследования;
- исследование радиационной обстановки;
- риск-ориентированный подход;
- полевые исследования грунтов и химический анализ подземных вод;
- социально-экономические исследования;
- санитарно-эпидемиологические исследования;
- экологический мониторинг;

3) Геофизические методы

Рассмотрим значимость геофизических методов в экологической геофизике, начиная с формирования физико-геологической модели, которая служит основой для анализа источников экологических отклонений, как было предложено Вахромеевым Г.С. в 1995 году [Вахромеев, 1995]. Этот процесс необходим для корректной постановки задач, выбора подходящих геофизических методов и создания методики анализа собранных данных.

Попробуем сделать более глубокую переработку текста для повышения оригинальности:

Методы геофизических исследований играют ключевую роль в исследовании структуры земной коры, позволяя не только обнаруживать месторождения полезных ископаемых, но и отслеживать их дальнейшее использование. Эти методы основываются на измерении различных полей и тесно связаны с дисциплинами, изучающими строение и состав Земли, такими как геология, геохимия, тектоника и минералогия.

В зависимости от типа исследуемого поля, методы делятся на несколько групп. Так, для изучения гравитационных аномалий применяются гравиметрические методы, магнитные свойства земной коры исследуются с помощью магнитометрии, тепловые аномалии — посредством термометрии. Электромагнитные и электрические методы, включая радиолокационные исследования, позволяют глубже понять распределение электропроводности. Сейсмические методы и геоакустические исследования помогают определить упругие свойства пород. Ядерные методы геофизики дают возможность исследовать радиоактивные излучения и потоки нейтронов и других частиц [Вахромеев, 1983].

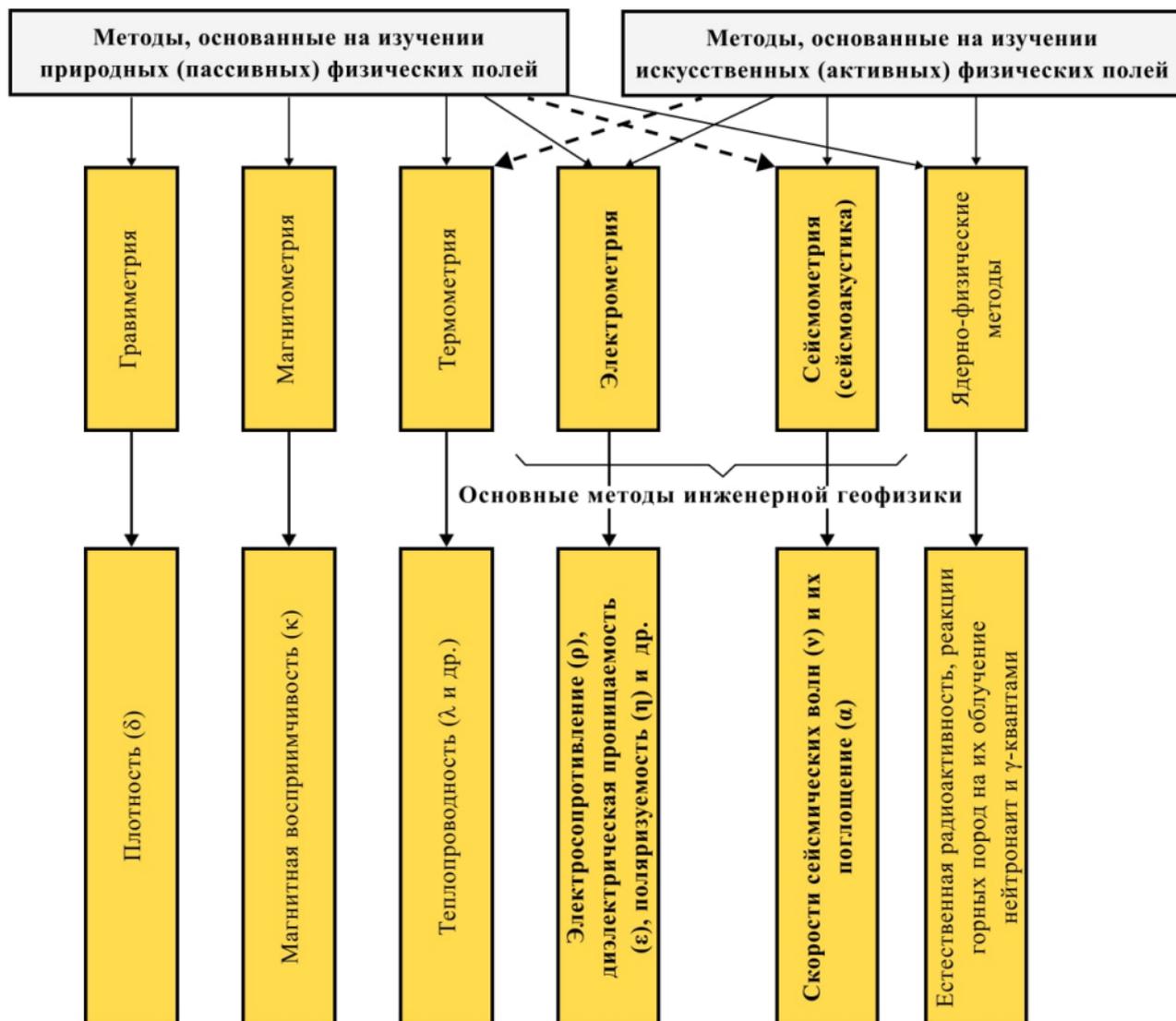


Рисунок 1.3 – Геофизические методы разведки
[\(https://gektargroup.ru/articles/inzhenernye-izyskaniya/obzor-osnovnykh-geofizicheskikh-metodov-v-reshenii-inzhenerno-geologicheskikh-zadach-/\)](https://gektargroup.ru/articles/inzhenernye-izyskaniya/obzor-osnovnykh-geofizicheskikh-metodov-v-reshenii-inzhenerno-geologicheskikh-zadach-/)

Геофизическая разведка проходит через несколько ключевых этапов. Сначала происходит сбор данных в полевых условиях, затем проводятся измерения по заранее намеченным маршрутам. Собранные данные обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения, а затем выполняется их геологическая интерпретация, что позволяет создать физико-геологическую модель исследуемого района [Соколов, 2015].

Современные технологии позволяют изучать структуры земной коры на глубинах от нескольких метров до десятков километров. Для таких исследований применяются специализированные приборы, включающие системы управления, генераторы сигналов,

приемники и вычислительные модули, которые обеспечивают обработку данных непосредственно в зоне проведения работ [Померанц, 1978].

Методы оценки состояния нарушенных и рекультивируемых земель также подразделяются на *контактные и дистанционные* [Сизов, 2012]. При контактных методах информацию о состоянии земель получают путём взятия проб, когда прибор непосредственно контактирует со средой, а данные считываются с устройства и вносятся в журналы отслеживания. К *контактным* методам относятся:

1. *Электрохимические*. Они позволяют при помощи электродной проводимости выявить загрязнённый объект окружающей среды, вещества-загрязнители и оценить степень загрязнённости во всех сферах экосистемы.
2. *Оптические*:
 - 2.1. *Атомно-эмиссионные*. Основаны на термическом возбуждении атомов или ионов, которые находятся в паро- или газообразном состоянии, на качественном или количественном анализе. Количественный анализ атомно-эмиссионного метода заключается в измерении интенсивности отдельных спектральных линий. В свою очередь, качественный анализ представляет собой регистрацию оптических спектров определяемых элементов.
 - 2.2. *Абсорбционные*. Основаны на измерении способности избирательного поглощения атомным паром монохроматического излучения Солнца.
3. *Хроматографические*. Основан на распределении компонентов между подвижной (жидкость или газ) и неподвижной (твёрдое пористое вещество) фазами. В методе подвижная фаза под давлением протекает через неподвижную, после чего каждое из веществ по очереди детектируется.

Контактные методы оценки состояния окружающей среды дополняются бесконтактными, то есть *дистанционными*.

Дистанционные методы основаны на свойствах электромагнитных, акустических и гравитационных полей осуществлять взаимодействие объекта мониторинга и переносить полученную информацию к прибору [Шовенгердт, 2010]. Главным преимуществом дистанционных методов является бесконтактное, своевременное взаимодействие излучения с веществом. Для переноса данных используются такие носители, как космические, авиационное и наземное базирование [Бузников, 2010].

Информация, полученная с помощью неконтактного зондирования, занимает важное место среди дистанционных данных, дополняя данные, собранные контактными методами

(главным образом наземными), где измерительные устройства непосредственно взаимодействуют с объектом исследования.

1.3 Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса для экологического мониторинга земного покрова

С начала 30-х годов для наблюдения за состоянием окружающей среды использовались аэрометоды, а в середине 70-х годов появились космические методы мониторинга экосистем. К концу 80-х годов аэрокосмические методы объединились в общем термине «дистанционная индикация», которая включала в себя бесконтактные способы слежения за электромагнитным полем экосистем с вышек, аэрофотосъемку и съемку со спутников, а также интерпретацию полученных данных для дальнейшего изучения и разработки практических рекомендаций по улучшению состояния экосистем. Дистанционное зондирование Земли представляет собой метод сбора данных о поверхности планеты, её атмосфере, океанах и верхнем слое земной коры с использованием технологий, не требующих прямого контакта с исследуемыми объектами. Основной принцип ДЗЗ заключается в том, что параметры излучения, исходящего от объектов или отражённого ими, зависят от их биогеофизических характеристик и пространственного положения (см. рисунок 1.4). Полученные изображения представляют собой пространственные данные, требующие применения ГИС для их анализа и визуализации [Гонин, 1980].

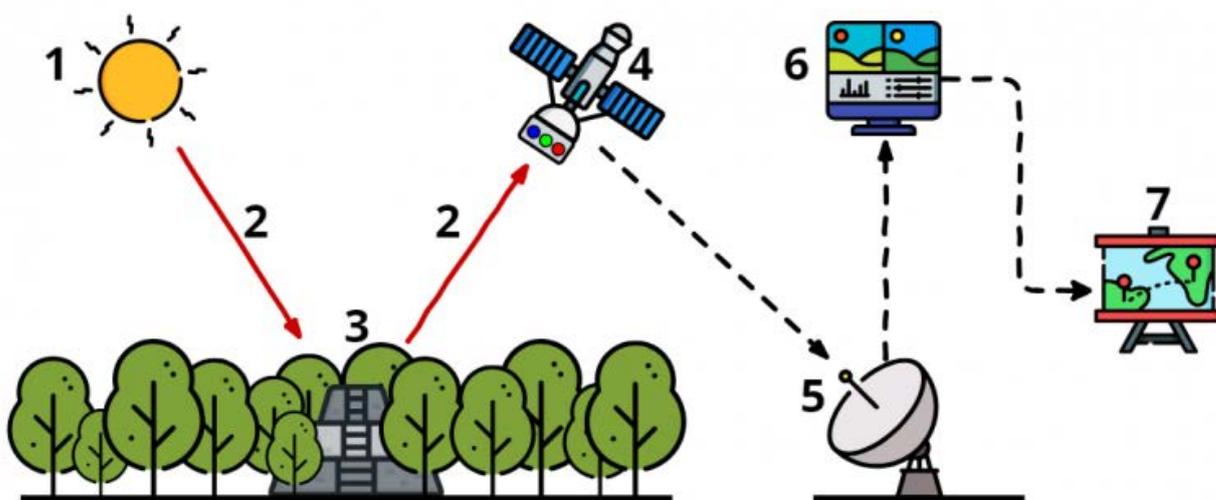


Рисунок 1.4 – Схема получения данных ДЗЗ: 1 – источник электромагнитного излучения (солнечное, тепловое собственное излучение объекта, искусственное излучение от

активных сенсоров ДЗЗ); 2 – прохождение электромагнитных волн через атмосферу; 3 – взаимодействие излучения с объектом наблюдения (отражение или поглощение); 4 – запись излучения датчиком на сенсоре спутника; 5 – передача данных на приёмную станцию с их первичной обработкой; 6 – интерпретация и анализ в специализированных программах; 7 – использование результатов анализа для решения поставленных задач.

Спутниковые сенсоры способны фиксировать данные в различных спектральных диапазонах. Мультиспектральные изображения предоставляют информацию в нескольких широких спектральных полосах, тогда как гиперспектральные изображения дают более детализированные данные за счет большого количества узких спектральных диапазонов (см. рис. 1.5). Это помогает детализировать информацию о состоянии растительного покрова, типах почвы, водных ресурсах и других биогеохимических характеристиках [Li, 2020].

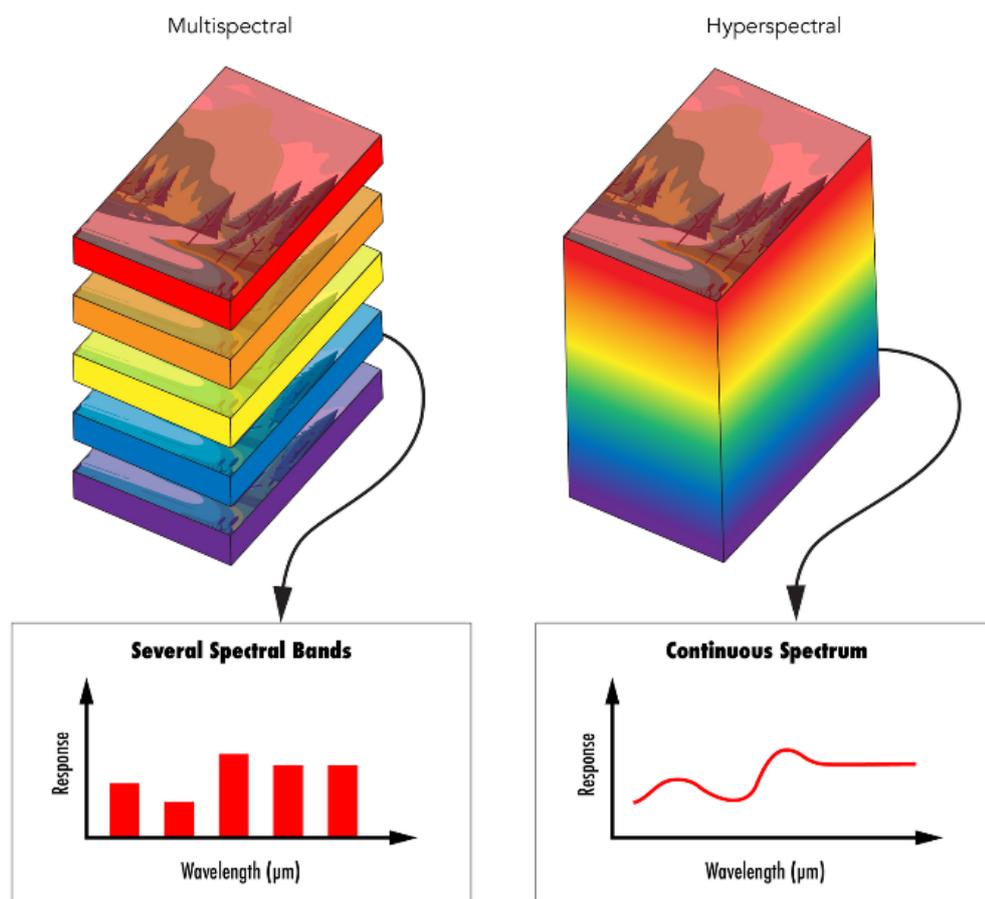


Рисунок 1.5 – Мультиспектральное и гиперспектральное изображение

Сенсоры, способные регистрировать инфракрасное излучение, позволяют изучать тепловые характеристики поверхности. Это необходимо для определения температурных

режимов водных объектов, почвенных участков и растительности (см. рисунок 1.6) [Mushkin. 2020].

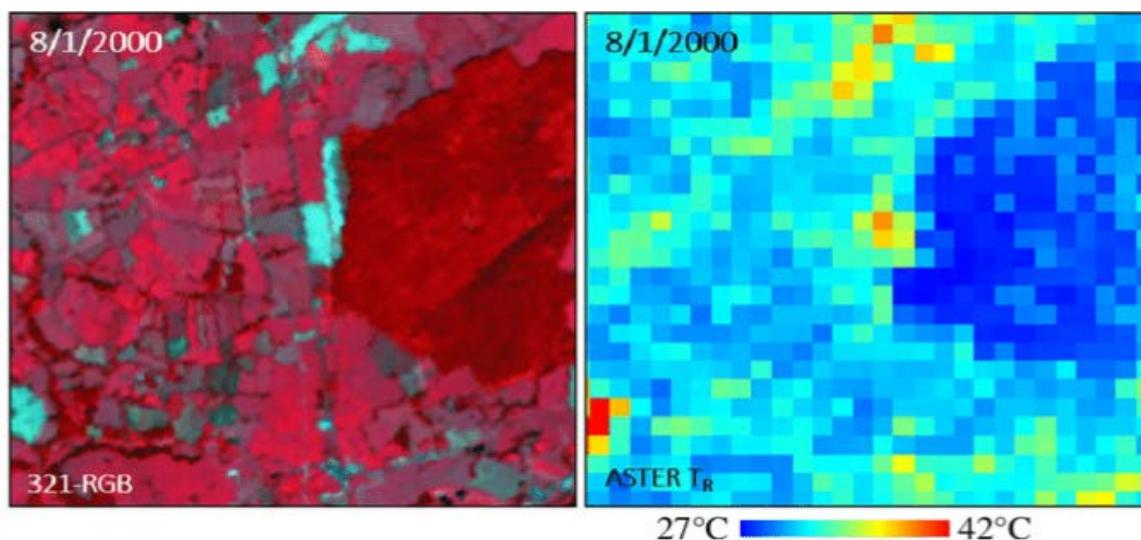


Рисунок 1.6 – Снимок теплового сенсора ASTER космической миссии Терра

Радарные спутники, такие как спутники SAR (Synthetic Aperture Radar), могут производить измерения независимо от погодных условий и времени суток. Это важно для мониторинга поверхности в условиях облачности или ночи. Радарные данные позволяют анализировать высоту растительности, форму рельефа и влажность почвы [Passah, 2023]. На рисунке 1.7 можно наблюдать пример радарного снимка, запечатленного миссией Sequoia (Capella Space).



Рисунок 1.7 – Радарный снимок Порт-Тауфика, Суэц
(<https://naked-science.ru/article/cosmonautics/sputnikovye-radarnye-izobrazheniya-sverhвысокoго-razresheniya-stali-dostupny-vsem-zhelayushhim>)

Для точного мониторинга и анализа экологических данных, полученных с помощью спутников, необходимы точные системы координат и геолокационные данные. Глобальные системы навигации, такие как GPS и ГЛОНАСС, обеспечивают точные координаты местоположения каждой точки на Земле.

Для обработки и анализа больших объемов данных, полученных с помощью дистанционного зондирования, используются методы машинного обучения (см. рисунок 1.8). Искусственные нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения помогают автоматизировать процессы классификации и анализа, выявлять изменения в экосистемах и прогнозировать экологические события [Али, 2020; Condego, 2021].



Рисунок 1.8 – Методы машинного обучения

Множество спутниковых данных доступны в открытом доступе для научных исследований. Облачные платформы, такие как Google Earth Engine и Amazon Web Services, предоставляют инфраструктуру для обработки и анализа этих данных, а также высокопроизводительные вычисления для научных исследований [Кузнецова, 2021].

Добыча угля неизбежно приводит к нарушению естественных экосистем и замене их на техногенные территории. Оценка состояния нарушенных земель в сравнении с неповрежденными включает изучение нескольких параметров. В настоящее время, это включает эволюционное состояние эмбриоземов, оценку растительного покрова, а также изучение агрофизических и агрохимических характеристик отвалов. Однако, фокус только на одном аспекте не дает полной картины о состоянии техногенных территорий на отвалах, что затрудняет последующую рекультивацию. Поэтому важно иметь комплексный подход, учитывающий основные экологические условия, для определения состояния нарушенных земель, и состоящий из следующих принципиальных методов:

1. Оценка экосистемных услуг:

Этот подход учитывает способность земельных экосистем выполнять важные функции, такие как очистка воды, удержание углерода и сохранение биоразнообразия. Оценка экосистемных услуг является ключевым методом биотестирования почв, который анализирует вклад почвенных экосистем в предоставление различных услуг, необходимых для жизни человека [Тихонова, 2018]. Такие услуги, как фильтрация воды, поддержание плодородия почв и сохранение биоразнообразия, выступают важными показателями состояния почвы.

Метод включает в себя анализ взаимодействия почвенных микроорганизмов, растений и химических процессов в почве, которые влияют на циклы элементов и обеспечивают ключевые экосистемные услуги. Путем изучения этих процессов и их

способности выполнять экосистемные функции, экологи и исследователи могут сделать выводы о здоровье и качестве почвы. Этот метод позволяет не только определить текущее состояние почвы, но и предсказать ее способность поддерживать важные экосистемные услуги в будущем. Экосистемные услуги могут служить важным индикатором устойчивости почвы и, следовательно, окружающей среды [Бобылев, 2016].

2. Мониторинг:

Системы мониторинга позволяют регулярно отслеживать изменения качества почвы в определенных районах. Это может включать в себя сбор образцов почвы и проведение анализов на предмет загрязнений и других изменений [Хаустов, 2018].

Мониторинг — это одна из ключевых методик оценки качества земель, представляющая собой систематическое и длительное наблюдение за состоянием и изменениями земельных ресурсов. Этот метод включает в себя сбор и анализ данных, связанных с земельными участками, их использованием, состоянием почвы, растительным покрытием, и другими параметрами.

Существует несколько видов мониторингов, которые используются для оценки качества земель:

- Мониторинг почвенного состояния.

Это систематическое и долгосрочное наблюдение и оценка физических, химических и биологических свойств почвы в конкретных районах или на определенных участках. Мониторинг землепользования.

- Мониторинг биоразнообразия.

Это систематический процесс сбора, анализа и оценки разнообразия живых организмов и экосистем на определенных территориях, оценивает состояние экосистем и видового разнообразия в конкретных районах. Он помогает выявить угрозы для природы и земельных ресурсов.

- Мониторинг загрязнения.

Существует для оценки уровня загрязнения земель токсичными веществами, включая химические загрязнители, тяжёлые металлы и прочие загрязнители. Эти данные важны для оценки безопасности земли для здоровья человека и окружающей среды.

- Мониторинг водоснабжения и оросительных систем.
- Мониторинг эрозии и деградации почвы.
- Мониторинг лесов.

Одной из важнейших методик оценки состояния качества земель является методика мониторинга при помощи геоинформационных технологий.

Использование геоинформационных систем (ГИС) представляет собой значительный прорыв в мониторинге и оценке состояния качества земель. ГИС обеспечивают возможность интеграции и анализа разнообразных геопространственных данных, что позволяет более полно и объективно изучать земельные ресурсы. Этот инструмент становится все более важным в современном подходе к управлению земельными ресурсами и экологической безопасности [Гонин, 1980; Шокин, 2015].

ГИС позволяют создавать детальные карты земельного покрова, на которых отражены не только основные категории земельного использования, но и характеристики почв, рельефа, растительности и другие факторы (см. рисунок 1.9) [Живичин, 1980; Станкевич, 2014]. Это обеспечивает лучшее понимание структуры и динамики земельных ресурсов в определенных регионах.

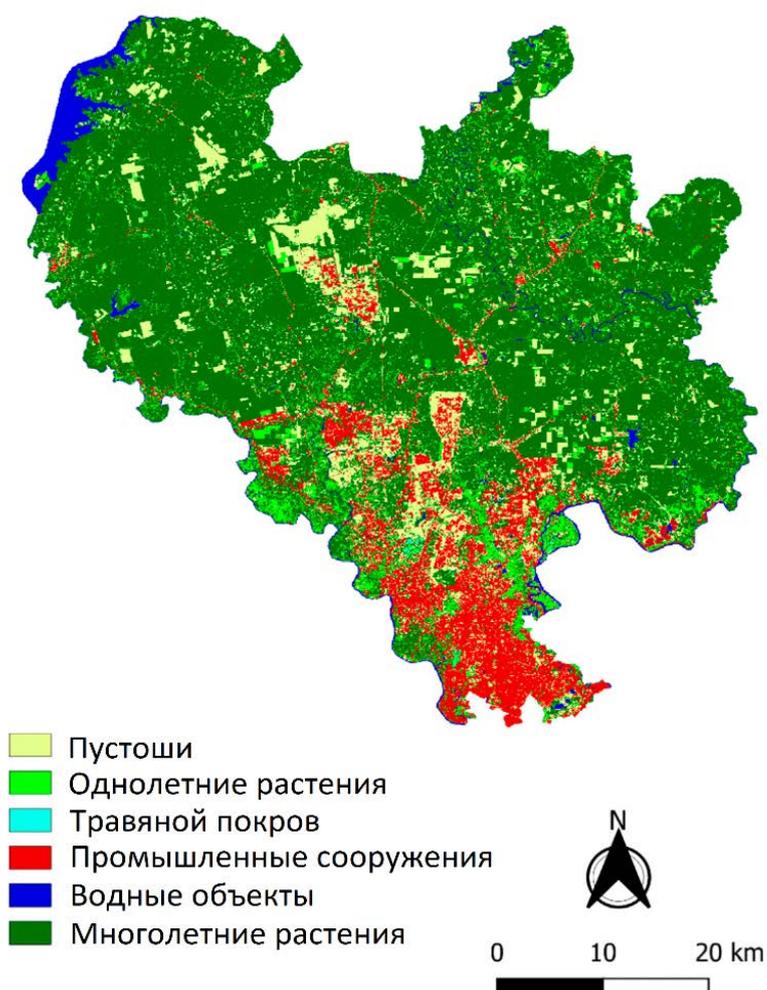


Рисунок 1.9 – Карта земельного покрова, составленная в ГИС

Использование ГИС для анализа изменений земельного покрова помогает обнаруживать и оценивать процессы, способные ухудшить качество почв, включая

урбанизацию, деградацию и другие трансформации. Такой мониторинг обеспечивает оперативную реакцию на возможные угрозы и позволяет внедрять превентивные меры для их устранения.

Идентификация уязвимых зон с использованием ГИС помогает в выявлении участков земель, подверженных различным угрозам, таким как эрозия, засоление или загрязнение [Митрофанов, 2012]. Это дает возможность разрабатывать более целенаправленные стратегии и программы по защите и восстановлению земельного ресурса.

Оценка уровня засоления и загрязнения почвы с применением ГИС упрощает процесс сбора и анализа данных, что позволяет более точно определить качество почвы и выявить зоны с повышенным уровнем загрязнения, что является важным шагом в обеспечении экологической безопасности.

ГИС также используются для моделирования изменений земельного использования и прогнозирования будущих изменений в земельном покрове [Пчельников, 2017]. Это позволяет разрабатывать более информированные стратегии управления земельными ресурсами, включая планирование устойчивого развития и охрану природы. ГИС предоставляют исследователям и практикам ценные инструменты для комплексной оценки и мониторинга качества земель, что способствует более эффективному управлению и охране этого важного ресурса.

Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса имеют широкий спектр применений в экологическом мониторинге, включая мониторинг изменений климата, обнаружение стихийных бедствий, отслеживание деградации лесов и вегетации, а также оценку воздействия человеческой деятельности на окружающую среду [Гонин, 1980]. Например, на рисунке 1.10 представлены карты загрязненности воздуха Ирана монооксидом углерода (CO) в зависимости от времени года, а на рисунке 1.11 – зоны пожаров, обнаруженные ИК-сенсорами.

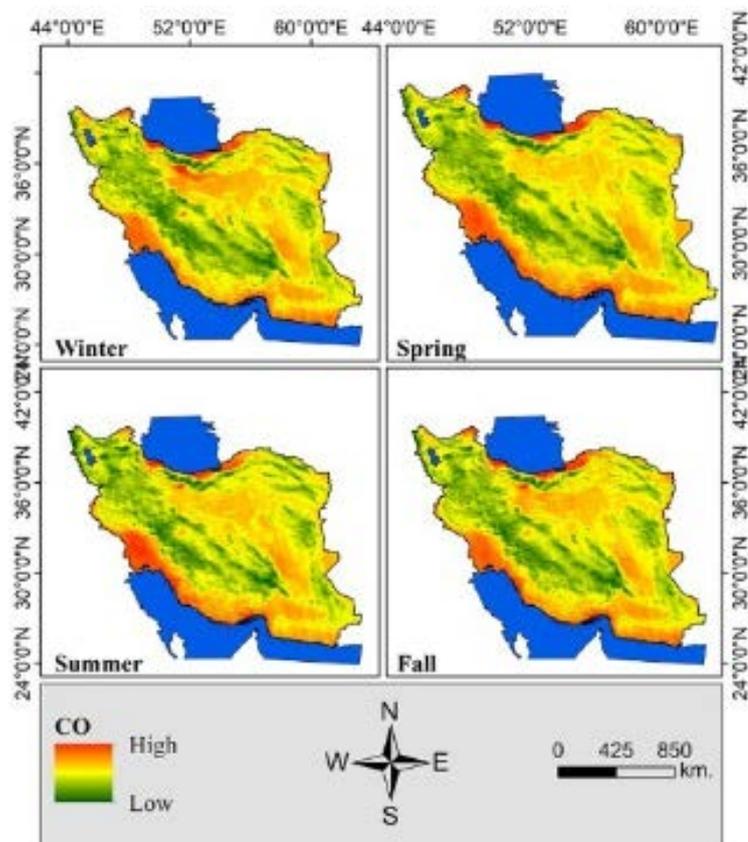


Рисунок 1.10 – Сезонные карты загрязнения Ирана монооксидом углерода, основанная на данных спутника Sentinel-5P

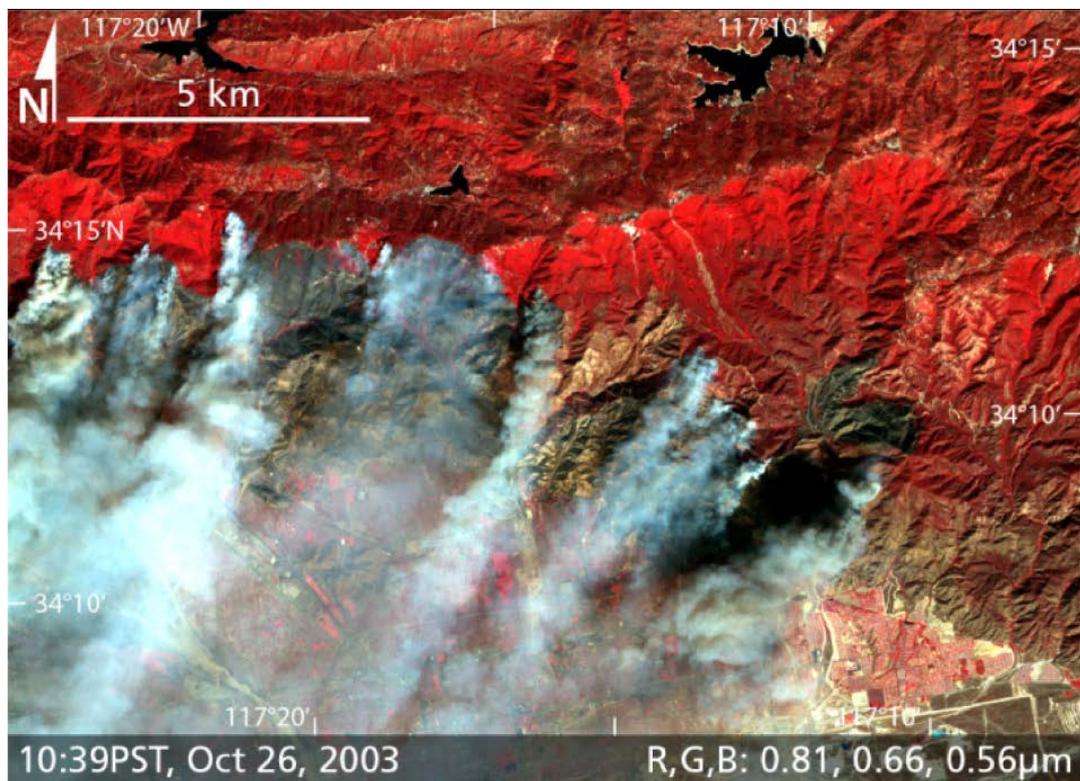


Рисунок 1.11 – Детекция районов пожаров ИК-датчиками ASTER

В последние годы наблюдается значительное увеличение влияния человеческой деятельности на природные системы, что привело к снижению эффективности традиционных методов экологического мониторинга, таких как стационарные наблюдения и тематическое картографирование. Причиной этому служат несколько факторов: быстрое усложнение пространственной структуры биосферы, активное внедрение экотехнических систем и стремительный рост площадей, подвергшихся техногенной трансформации. Все это указывает на необходимость пересмотра подходов к управлению природными ресурсами и к адаптации существующих систем мониторинга к новым экологическим вызовам [Виноградов, 1984].

В условиях стремительно усиливающегося воздействия человеческой деятельности на окружающую среду главной альтернативой традиционным методам наблюдения за ее состоянием стали различные концепции методов мониторинга.

Термин «мониторинг» происходит от латинского слова *monitor*, что означает «наблюдающий» или «предупреждающий». В современном понимании мониторинг экосистем представляет собой постоянное слежение за состоянием окружающей среды с целью контроля и прогнозирования изменений, вызванных преимущественно деятельностью человека [Хаустов, 2018]. Помимо этого, экологический мониторинг охватывает анализ структуры, динамики и ритмических изменений, происходящих в экосистемах.

1.4 Выводы по главе 1

Воздействие на окружающую среду угольных разрезов характеризуется значительным многообразием факторов. 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 более точно оценивать влияние разрезов 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.

2 БИОИНДИКАЦИОННАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА

2.1 Анализ методик оценки качества земель

Методики экологической оценки качества земель играют ключевую роль в определении степени воздействия на окружающую среду и выявлении уровней загрязнения почв. Эти методики позволяют исследовать широкий спектр экологических факторов, начиная от химических загрязнителей и заканчивая биологическими индикаторами. В основе этих подходов лежит тщательное изучение почвенного слоя и растительного покрова, что помогает выявить любые аномалии или признаки деградации.

Используя экологическую оценку, специалисты могут определить, насколько сильно антропогенные или природные факторы влияют на состояние земель. Деградированные земли могут иметь широкий спектр проблем, включая эрозию, снижение плодородия, потерю растительности, загрязнение, уплотнение или опустынивание. Методы оценки позволяют оценить эти проблемы и определить первопричины, что критически важно для принятия эффективных мер.

Экологическая оценка также включает в себя мониторинг загрязнения, особенно в промышленных районах или на бывших территориях добычи полезных ископаемых. Этот метод фокусируется на выявлении токсичных веществ в почве или воде, которые могут препятствовать восстановлению экосистемы. Исследование уровня загрязнения позволяет разрабатывать стратегии очистки или рекультивации, которые могут снизить воздействие на окружающую среду.

Такие исследования также помогают понять, как изменения в состоянии земель влияют на окружающие экосистемы и биоту. Результаты экологической оценки могут указывать на необходимость вмешательства или корректирующих мер, чтобы предотвратить дальнейшую деградацию земель или восстановить утраченный баланс. Методики экологической оценки качества земель предоставляют информацию, которая необходима для принятия обоснованных решений в сфере управления землепользованием.

Существует несколько методик экологической оценки качества земель, которые позволяют оценить воздействие на окружающую среду и уровень загрязнения почв. Вот некоторые из них:

2.1.1 Анализ физико-химических показателей почвы

Методика анализа почвы охватывает широкий спектр показателей, которые позволяют детально оценить её состояние и пригодность для использования в различных целях, включая сельское хозяйство. В рамках этого анализа особое внимание уделяется

таким параметрам, как кислотно-щелочной баланс (рН), уровень органических веществ, концентрация тяжёлых металлов, а также содержание пестицидов и других потенциально опасных загрязнителей (см. таблицу 2.1). Определение этих характеристик помогает выявить степень загрязнения почвы и её пригодность для использования в сельском хозяйстве, строительстве или рекультивации [Хаустов и др., 2018].

Органическое вещество в почве играет одну из ключевых ролей, так как оно помогает удерживать влагу, связывать питательные элементы и обеспечивать их доступность для растений. Почвы, богатые органическими веществами, обладают более высокой способностью поддерживать рост растений и сохранять свою структуру в условиях меняющихся климатических и экологических условий.

Кроме того, оценка макроэлементов, таких как азот (N), фосфор (P) и калий (K), крайне важна для понимания уровня плодородия почвы. Эти элементы необходимы для нормального роста растений и развития их корневой системы, а их баланс напрямую влияет на урожайность. Например, недостаток азота может привести к замедленному росту растений, тогда как избыток фосфора может негативно сказаться на усвоении других микроэлементов.

Анализ также охватывает микроэлементы, такие как железо, магний, цинк и медь, которые, несмотря на свои меньшие концентрации, оказывают значительное влияние на здоровье растений. Например, недостаток цинка может привести к задержке роста, а дефицит меди – к ослаблению корневой системы.

Всесторонний анализ физико-химических характеристик почвы является важным инструментом не только для сельскохозяйственных предприятий, но и для широкого круга отраслей, связанных с использованием и охраной земельных ресурсов.

Помимо сельского хозяйства, анализ физико-химических показателей почвы также имеет экологическое значение. Он позволяет выявлять загрязнения почвы токсичными веществами, такими как тяжелые металлы, и следить за состоянием окружающей среды [Бузников и др., 2010]. Таким образом, анализ физико-химических показателей почвы является важным инструментом для сбалансированного использования земельных ресурсов и поддержания экологической устойчивости.

Таблица 2.1 – Показатели, входящие в анализ физико-химических свойств почвы.

Показатель	Характеристика
рН-значение	Уровень кислотности или щелочности почвы, важный для доступности питательных веществ для растений.
Содержание органических веществ	Оценка количества органического материала (например, гумуса) в почве, влияющего на плодородие и удержание влаги и питательных веществ.
Содержание песка, суглинки и глины	Анализ соотношения этих трех фракций для определения типа почвы и ее водопроницаемости.
Концентрация макроэлементов	Определение содержания основных питательных элементов (азот, фосфор, калий и др.) и макроэлементов (кальций, магний).
Концентрация микроэлементов	Определение содержания микроэлементов (железо, медь, цинк, марганец и др.), важных для растений.
Содержание солей	Оценка уровня солей в почве, так как их избыток может негативно влиять на растения.
Влажность почвы	Определение содержания воды, важного для оптимального полива сельскохозяйственных культур.
Текстура почвы	Анализ структуры, размера и распределения частиц почвы.
Содержание органических и неорганических загрязнителей	Оценка наличия загрязнений, таких как тяжелые металлы и пестициды, влияющих на качество почвы и безопасность для сельского хозяйства и окружающей среды.

Эти параметры помогают определить плодородие и качество почвы, а также выявить потенциальные проблемы, связанные с ее загрязнением или неподходящими условиями для сельского хозяйства и других землепользовательских целей.

Анализ физико-химических показателей почвы – это важная практика в агрономии и экологии, предназначенная для изучения и оценки качества почвы. В ходе такого анализа определяются различные характеристики, включая рН-значение, содержание органических веществ, текстура почвы и концентрация питательных элементов [Андронов, 2015; Артаев, 2014]. Эти данные не только помогают оценить плодородие почвы, но и определить ее пригодность для различных видов сельскохозяйственных культур.

2.1.2 Индексы загрязнения почвы

Эти индексы оценивают концентрацию определенных загрязнителей в почве и сравнивают их с установленными стандартами. Примерами могут служить индексы загрязнения тяжелыми металлами или органическими соединениями. представляют собой совокупность числовых значений и параметров, которые оценивают степень загрязнения почвы различными веществами и загрязнителями [Бузников и др., 2010; Раскатов и др., 2016]. Эти индексы предоставляют информацию о качестве почвы и могут использоваться для принятия решений в области охраны окружающей среды и земельного планирования.

Почва представляет собой сложную и многофазную систему, включающую в себя четыре основных фазы [Александрова, 1980]:

1. Твёрдая фаза. Это непосредственно сама почва. Почва представляет собой сложную смесь твёрдых компонентов, включающую как минеральные частицы разного размера (песок, глина, суглинок), так и органические материалы, такие как растительные остатки и гумус. Минеральные частицы формируют структуру почвы, обеспечивая её плотность и водопроницаемость, тогда как органические вещества способствуют её плодородию и способности удерживать влагу и питательные элементы, что является ключевым фактором для роста растений и поддержания экосистем.
2. Жидкая фаза (почвенный раствор). Это вода, которая заполняет пустоты и поры в почве. Почвенный раствор содержит различные химические соединения, растворенные в воде, и является важной средой для химических реакций и обмена веществ в почве. В нём могут находиться различные минеральные элементы, необходимые для роста растений.
3. Газообразная фаза (почвенный воздух). Это газы, находящиеся в пустотах и порах почвы. В почвенном воздухе присутствует кислород, необходимый для процессов дыхания корней растений, а также азот, углекислый газ и другие газы, важные для поддержания биологической активности в почве.
4. Живая фаза. Эта фаза состоит из живых организмов, таких как микроорганизмы, бактерии, грибы, черви и другие микро- и макроорганизмы. Эти организмы играют важную роль в биологических процессах почвы, включая разложение органических веществ, обогащение почвы питательными веществами и поддержание её фертильности.

Почва содержит практически весь спектр элементов, представленных в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева. Основные органогенные элементы, такие как углерод, водород, кислород и азот, играют ключевую роль в составе почвы и описаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные органогенные элементы в составе почвы.

№	Элемент	Количество	Состав
1	Углерод (С)	Преобладающий элемент, составляющий около 45% массы органических веществ в почве.	Включен в состав органических соединений и является важным компонентом для роста растений.
2	Кислород (О)	Составляет около 42% органических веществ в почве.	Присутствует в молекулах воды и минеральных соединений
3	Водород (Н)	Присутствует в почве на уровне около 6,5% в органических соединениях и воде.	Входит в состав биомолекул, таких как углеводы.
4	Азот (N)	Содержится примерно в 1,5% органических веществ в почве.	Элемент важен для синтеза белков в растениях и играет ключевую роль в их росте и развитии.
5	Остальные элементы, включают фосфор (Р), калий (К), кальций (Са), магний (Mg), железо (Fe), кремний (Si), натрий (Na) и другие.	Присутствует в почве на уровне около 6,5% в органических соединениях и воде.	Считаются важными макроэлементами, необходимыми для роста растений и поддержания жизнедеятельности организмов в почве.

Существует несколько геохимических индексов загрязнения почвы, каждый из которых оценивает уровень загрязнения почвы определенными веществами или группами загрязнителей [Хаустов и др., 2018]. Для гигиенической оценки степени загрязнения почвы в качестве контроля очень важно знать ее естественный состав. Некоторые из наиболее распространенных индексов включают:

– *Индекс загрязнения тяжелыми металлами:*

Суммарный индекс загрязнения почв металлами (Z_c) – это показатель, созданный в ходе комплексных геохимических и геогигиенических исследований окружающей среды на территории городов с активными источниками загрязнения [Раскатов и др., 2016].

– *Индекс загрязнения нефтепродуктами:*

Оценивает загрязнение почвы нефтепродуктами, включая масла, топлива и другие нефтепродукты. Этот индекс важен для контроля загрязнения в связи с нефтяными утечками и авариями.

При оценке загрязнения почвы с точки зрения санитарно-гигиенических норм используется интегральный показатель Z_c , представляющий собой суммарный индекс загрязнения. Z_c вычисляется как сумма коэффициентов концентрации (K_c) токсичных веществ I, II и III классов токсикологической опасности (см. таблицу 2.1) относительно их фоновых значений. Формула для расчета представлена следующим образом [Зарина и др., 2011]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1), \quad (2.1)$$

где K_c – коэффициент концентрации i -го химического элемента;

n – число, равное количеству элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

Коэффициент концентрации (K_c) рассчитывается по формуле:

$$K_c = \frac{C_i}{C_{\text{фон}}}, \quad (2.2)$$

где C_i – фактическое содержание элемента;

$C_{\text{фон}}$ – геохимический фон.

Классы опасности (токсичности) элементов представляют собой группировку химических элементов по степени их токсичности или опасности для здоровья человека и окружающей среды. Эти классы помогают оценить влияние элементов на биологические системы и определить степень их потенциального вреда в зависимости от их концентрации в окружающей среде, в данном случае в почве. Классы опасности (токсичности) элементов включают [Хаустов и др., 2018]:

1. **I класс токсичности (сильно токсичные элементы).** Элементы этого класса обладают высокой токсичностью при небольшом воздействии. Их содержание в

почве может представлять серьезную угрозу для человека и окружающей среды. Некоторые из них включают свинец, ртуть, кадмий и хром.

2. **II класс токсичности (умеренно токсичные элементы).** Элементы этого класса менее токсичны в сравнении с элементами I класса. Они могут вызвать некоторые патологические изменения при более высоких концентрациях. Примеры включают медь, никель, цинк.
3. **III класс токсичности (слабо токсичные элементы).** Элементы этого класса имеют минимальную токсичность и обычно не представляют серьезной опасности при содержании в почве в низких концентрациях. К ним относятся элементы, такие как алюминий, кремний и железо.

Оценка этих классов проводится на основе концентрации элементов и их потенциального воздействия на здоровье человека и окружающую среду.

– *Индекс загрязнения органическими загрязнителям:*

Анализ уровня загрязнения почвы органическими соединениями включает оценку таких веществ, как пестициды, гербициды, полихлорированные бифенилы (ПХБ) и другие химикаты. Среди органических загрязнителей почв можно выделить соединения, такие как кетоны, спирты, акриламид, формальдегид, нефтепродукты, хлорорганические соединения, ПХБ, эфиры, тяжелые растворители и синтетические моющие средства [Андронов, 2015]. Эти вещества могут быть как результатом промышленных процессов, так и сельскохозяйственной деятельности.

Органические и органоминеральные соединения, появляющиеся в почве в результате биологических процессов, также представляют собой потенциальные загрязнители. Наряду с химическими загрязнителями, почвы могут быть заражены патогенными микроорганизмами, такими как бактерии и водоросли, что в свою очередь может оказать воздействие на баланс биогенных элементов в геологической среде и стимулировать рост других микроорганизмов, грибов и водорослей [Козлов, 2015].

Загрязнение может происходить через стоки, отходы животноводства и сельскохозяйственные выбросы. Биологические загрязнители, включая бактерии и патогены, оказывают влияние на экосистемы, изменяя химический состав почв, что приводит к дальнейшему развитию микроорганизмов и нарушению природных процессов [Андронов, 2015; Белимов и др., 2011].



Рисунок 2.1 – Виды биологических загрязнителей

Бактерии – это разнообразная группа микроорганизмов, включающая как патогенные, вызывающие заболевания у человека, животных и растений, так и полезные виды [Александрова, 1980]. Большинство бактерий относятся к прокариотам, то есть их клетки лишены ядра, в отличие от эукариотов, у которых ядро имеется. У одного и того же вида бактерий могут варьировать патогенные свойства в широких пределах. Степень патогенности конкретного вида бактерий определяется как их вирулентность.

– *Индекс загрязнения радиоактивными веществами:*

Оценивает наличие радиоактивных элементов и радионуклидов в почве. Этот индекс важен для оценки радиационной безопасности почвы.

Источники радиоактивного излучения подразделяются на две основные категории: **естественные и искусственные** (см. рисунок 2.2) [Чумаковский, 2002].

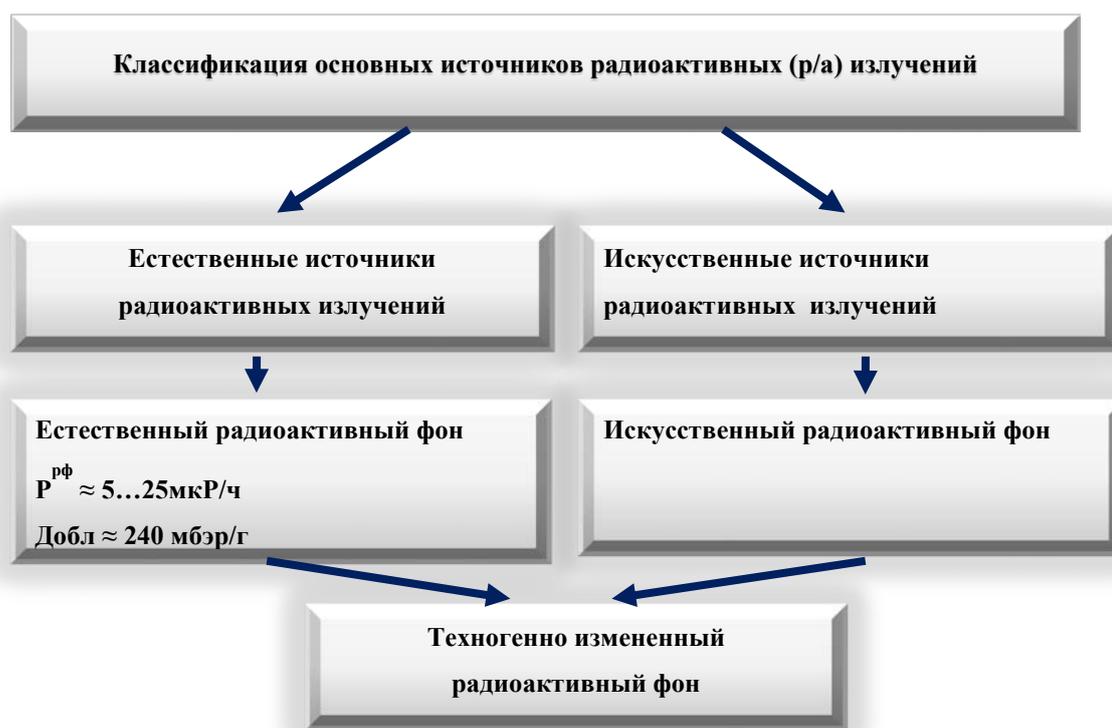


Рисунок 2.2 – Виды радиоактивного излучения

Естественные источники радиации присутствуют в окружающей среде и оказывают постоянное воздействие на человека. К ним относятся:

- Радиоактивные элементы литосферы, включая калий, уран, торий и цезий, формируют около 26% естественного радиационного фона, обеспечивая постоянное излучение, связанное с распадом их изотопов.
- Космическое излучение, поступающее из межпланетного пространства, обусловлено активностью Солнца, взаимодействием заряженных частиц с магнитосферой Земли, а также радиационными поясами. Интенсивность данного излучения возрастает при снижении атмосферного давления и в условиях минимальной аэрозольной нагрузки.
- Эндогенное облучение обусловлено поступлением радионуклидов внутрь организма через гидросферу, атмосферу и пищевые цепи, что приводит к накоплению определённых изотопов в биологических тканях.
- Радон, инертный радиоактивный газ, образующийся в результате альфа-распада урана-238 и тория-232, способен диффундировать из геологических субстратов, накапливаться в замкнутых объёмах и поступать в дыхательные пути, что повышает дозовую нагрузку.

– Пиролиз ископаемых углеводородов, включая каменный уголь и горючие сланцы, сопровождается эмиссией радионуклидов в атмосферу, увеличивая фоновый уровень радиации и способствуя перераспределению долгоживущих изотопов.

– Техногенные материалы, такие как строительные смеси, цементы и удобрения на основе фосфатов и калийных соединений, могут содержать природные радионуклиды, способствуя локальному повышению радиационного фона в среде обитания человека.

Искусственные источники радиации возникают из-за человеческой деятельности, особенно в случае техногенных аварий. Среди них:

- Урановые производства, связанные с добычей, обогащением урана и переработкой ядерного топлива.
- Аварии на ядерных реакторах, которые могут вызвать тепловые взрывы при нарушении системы охлаждения, хотя критическая масса для ядерного взрыва в них не создаётся.
- Радиохимические предприятия, занимающиеся переработкой отработанного топлива и других радиоактивных материалов.
- Загрязнение почвы вредными элементами, такими как арсен, свинец и цинк, которые оказывают негативное воздействие на здоровье человека и экологическую ситуацию.

Химические загрязнители в почве можно разделить на две основные группы (см. таблицу 2.3). Первая группа включает химические вещества, которые специально добавляются в почву для целей удобрения или защиты растений от вредителей, такие как минеральные удобрения, пестициды и стимуляторы роста [Минеев, 2006]. Вторая группа веществ попадает в почву случайно из различных техногенных источников, таких как бытовые и промышленные отходы, выбросы из транспорта и промышленности [Раскатов и др., 2016].

Оценка опасности этих соединений включает в себя различные виды воздействия на окружающую среду и живые организмы, включая их токсичность, способность вызывать мутации, аллергические реакции, воздействие на развитие эмбрионов и другие.

Таблица 2.3 – Возможные пути попадания химических веществ в почву

Химические вещества, добавляемые специально	Химические вещества, попадающие в почву случайно
---	--

Минеральные удобрения	Аммиачная селитра, суперфосфаты, калийные соли и другие соединения, используемые для повышения урожайности и улучшения качества почвы.	Бытовые отходы	Химические вещества из мусора, включая пластик, ртуть из различных электронных устройств и т. д.
Пестициды	Разнообразные инсектициды, гербициды и фунгициды, такие как хлордан, дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и другие, применяемые для защиты растений от насекомых, сорняков и грибковых заболеваний.	Промышленные отходы	Вредные вещества и отходы производства, такие как тяжелые металлы (свинец, кадмий, ртуть) и химические соединения, например, бензол и хлорированные органические вещества.
Стимуляторы роста растений	Гиббереллины, ауксины, цитокинины и другие фитогормоны представляют собой регуляторы роста, широко применяемые для интенсификации процессов морфогенеза, ускорения вегетативного развития, стимуляции цветения и повышения продуктивности растений.	Выхлопные газы	Оксиды азота, диоксид серы, тяжелые металлы, токсичные органические соединения и другие загрязняющие вещества, выбрасываемые транспортом и промышленными установками.

Эти химические элементы могут вызывать различные последствия для почвы, растений и живых организмов при их наличии в окружающей среде.

Эти индексы позволяют ученым и экологам оценить степень загрязнения почвы и принять соответствующие меры для ее восстановления и охраны и являются важным инструментом для определения степени загрязнения и принятия мер по восстановлению и

охране почвенных ресурсов. Они также способствуют более эффективному контролю за загрязнением и улучшению качества почвы в экологически чувствительных районах.

2.1.3 Биотестирование почвы

Этот метод оценки качества земли использует живых организмов, таких как микроорганизмы, червей и растения, чтобы определить степень загрязнения почвы [Мелехова и др., 2007]. Изменения в биологических показателях, такие как биомасса и разнообразие видов, могут свидетельствовать о качестве почвы. В рамках биотестирования проводятся эксперименты, в ходе которых на почву наносятся живые организмы, такие как семена растений или определенные виды микроорганизмов. Затем наблюдают за ростом и развитием этих организмов в почве.

Биотестирование позволяет определить наличие или отсутствие токсичных веществ в почве, которые могут негативно влиять на растения и микроорганизмы. Если результаты биотестирования указывают на хороший рост и развитие организмов, это свидетельствует о высоком качестве почвы. В противном случае, если рост организмов замедлен или отсутствует, это может указывать на присутствие загрязнений или неблагоприятные условия в почве.

Биотестирование является важным инструментом для мониторинга экологического состояния почвы, особенно в районах, где ведется сельское хозяйство или промышленная деятельность. Этот метод позволяет своевременно выявлять проблемы и предпринимать меры для восстановления качества почвы и сохранения биоразнообразия.

Биотестирование почвы может проводиться различными способами и с использованием различных организмов для оценки качества почвы и ее воздействия на живые организмы:

- Фитотестирование. В этом виде биотестирования используются растения, чаще всего семена. Семена растений размещают в почве, а затем наблюдают за их ростом, развитием, и здоровьем [Николаева, 2017]. Этот метод позволяет оценить влияние почвы на растительный мир.

- Биоиндикация. Этот метод включает использование индикаторных видов микроорганизмов, насекомых или растений для оценки качества почвы [Околелова и др., 2017]. Например, определенные виды мхов могут быть использованы как индикаторы кислотности почвы [Битюцкий, 2014].

- Микробное биотестирование. Используются микроорганизмы, такие как бактерии или грибы, для оценки состояния почвы [Синдирева, 2018]. Микроорганизмы

могут быть чувствительны к изменениям в содержании веществ, таких как токсины или питательные вещества.

– Экотоксикологическое биотестирование. В этом виде биотестирования используются организмы, такие как водные беспозвоночные (например, водные блохи или водные микроорганизмы), для оценки токсичности почвы и ее влияния на водные экосистемы [Козлов, 2015].

– Исследование биологической активности почвы. Этот метод включает изучение активности ферментов и микроорганизмов в почве, что позволяет оценить ее способность разлагать органические вещества [Андронов, 2015].

Каждый вид биотестирования имеет свои преимущества и может быть применен в зависимости от конкретных целей и условий исследования.

Среди методов оценки водной эрозии почвы особое место занимает Универсальное уравнение потерь почвы от эрозии (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE). Эта математическая модель применяется для количественной оценки деградационных процессов, обусловленных эрозией, и прогнозирования потерь почвенного покрова в результате воздействия поверхностного стока [Renard et al., 1997]. Методика широко используется в исследованиях агроландшафтов, инженерной геологии и экологии, позволяя определить влияние различных природных и антропогенных факторов на устойчивость почвы к размыву.

Концепция RUSLE основана на эмпирическом подходе и предназначена для вычисления среднегодовых потерь почвы, связанных с листовой и ручьевой эрозией, при длительном наблюдении. В рамках модели рассматриваются шесть фундаментальных параметров, определяющих интенсивность эрозионных процессов: эрозионная активность осадков, структурно-механические свойства почвы, морфометрия склонов, тип растительного покрова, специфика хозяйственного использования земель и применяемые противоэрозионные меры. Такой комплексный анализ позволяет прогнозировать развитие эрозии и разрабатывать стратегии по сохранению почвенного плодородия.

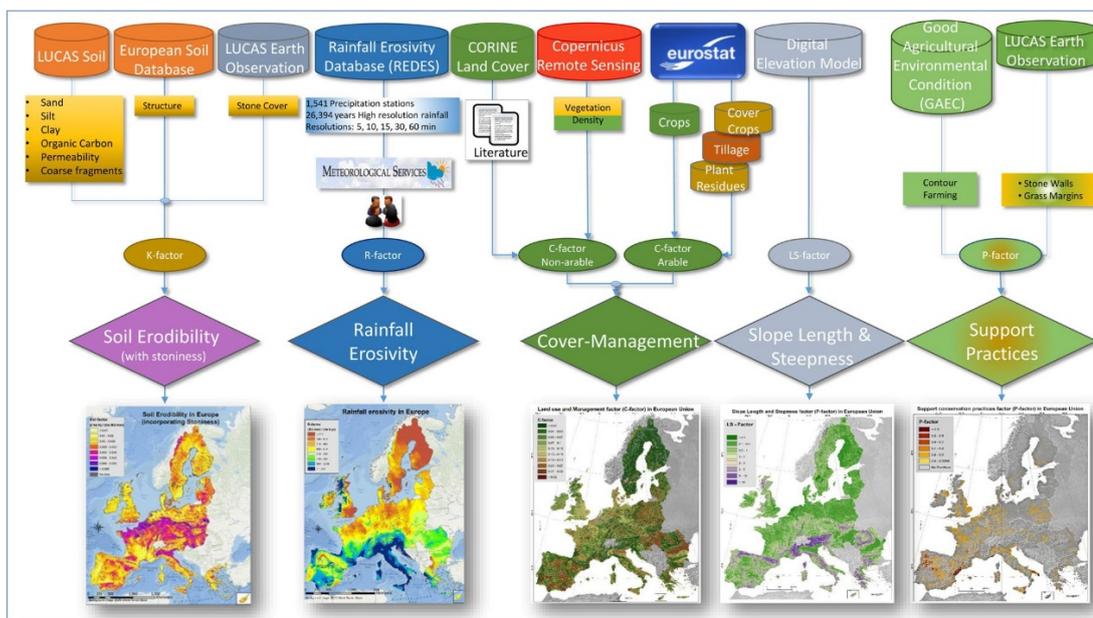


Рисунок 2.3 – Модель эрозии почвы по методике RUSLE

Ниже приведены основные положения и компоненты модели RUSLE:

1. Уравнение RUSLE.

Основой модели RUSLE является уравнение, которое описывает потери почвы как произведение пяти основных факторов [Renard et al., 1997]:

$$A = R * K * LS * C * P. \quad (2.3)$$

Описание каждого из компонентов, составляющих уравнение модели RUSLE, приведено в таблице 2.4.

2. Оценка устойчивого землепользования.

RUSLE также используется для оценки устойчивого землепользования и разработки рекомендаций по улучшению практик ведения сельского хозяйства и лесного хозяйства.

Модель является мощным инструментом для анализа и управления водной эрозией почвы, что имеет важное значение для охраны почвенных ресурсов и окружающей среды. Она позволяет учитывать разнообразные факторы и предоставляет ценную информацию для принятия решений в области экологии и земельного управления [Li et al., 2023; Kumar et al., 2022].

Таблица 2.4 – Основные компоненты RUSLE

Символ	Фактор	Оригинальное название	Описание

R	Фактор дождя	Rainfall Factor	Этот фактор оценивает интенсивность и количество осадков в определенном регионе. Большие количества дождя могут увеличивать вероятность почвенной эрозии. Количество потерянной почвы в тоннах на гектар в год. Она представляет собой результат оценки.
K	Фактор почвы	Soil Erodibility Factor	Этот фактор учитывает, насколько подвержена почва эрозии, в зависимости от её текстуры и структуры. Почвы с высоким значением K более подвержены эрозии. Фактор эрозивности осадков оценивает потенциальную разрушительную способность осадков и их эффект на почву. Фактор отражает, насколько подвержена конкретная почва эрозии. Это зависит от текстуры почвы, структуры, содержания органического вещества и др.
LS	Длина и склон	Length-Slope Factor	Этот компонент учитывает длину наклона склона и его угол. Чем больше длина и крутизна склона, тем больше вероятность эрозии. Фактор длины и крутизны склона учитывает влияние склона и его длины на эрозию [<i>Van Remortel et al., 2001</i>].
C	Фактор растительности	Cover and Management Factor	Этот фактор оценивает влияние растительности и способов управления земельными

			ресурсами на уровень эрозии. Фактор покрытия и управления отражает, насколько почва покрыта растительностью и какие методы управления применяются.
P	Факторы защиты почвы	Support Practices	Этот компонент учитывает использование методов и практик для снижения эрозии, таких как посев навесных культур и другие меры защиты почвы. Фактор практики обработки почвы учитывает воздействие практик по управлению почвой, таких как почва-по-контурной пахоты и др.

Для применения модели RUSLE широко используются геопространственные данные, такие как цифровые модели рельефа, данные о дожде, состав почвы, карты растительности и др. Эти данные помогают в расчете значений факторов RUSLE для каждой конкретной области.

RUSLE интегрируется в ГИС, что позволяет анализировать и визуализировать потери почвы на карте (см. рисунок 2.4) [Papaiordanidis et al., 2019]. ГИС также позволяют проводить пространственный анализ и прогнозирование.

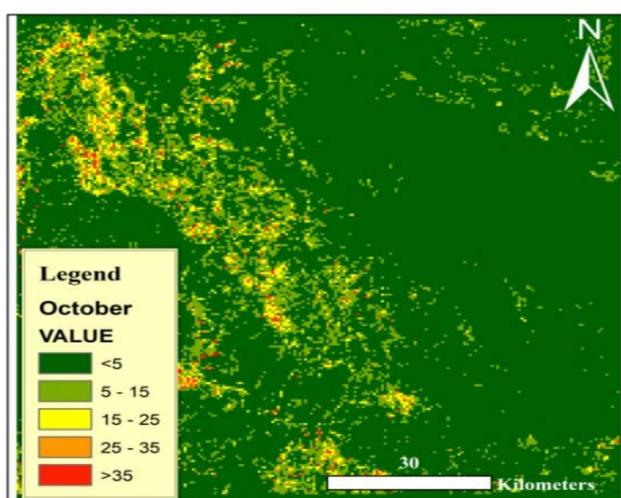


Рисунок 2.4 – Пример модели RUSLE, созданной с помощью ГИС [Papaiordanidis et al., 2019]

Модель может быть применена в экологии и земельном управлении. Она имеет широкое применение в области экологии и земельного управления и используется для определения рисков эрозии, разработки стратегий по земельному планированию, оценки воздействия сельского хозяйства и других видов деятельности на почвенное покрытие и окружающую среду [Горбачева, 2011; Kumar et al., 2022].

Методика может быть адаптирована для учета изменений климата и различных сценариев управления ресурсами. Это позволяет предсказывать будущие изменения в эрозии почвы и разрабатывать стратегии адаптации.

Результаты расчетов по этим компонентам дают оценку потерь почвы от эрозии в конкретном регионе. RUSLE широко используется в сельском хозяйстве и экологических исследованиях для прогнозирования и мониторинга уровня почвенной эрозии. Это помогает разрабатывать стратегии по охране почвы, управлению водными ресурсами и устойчивому земледелию. RUSLE было разработано на основе оригинальной универсальной уравнения потерь почвы от эрозии (USLE) и доработано для учета различных местных условий и практик [Benavidez et al., 2018].

Интегральный показатель состояния нарушенных земель после добычи угля

В работе [Куприянов и Манаков, 2010] представлен интегральный показатель (Σ_i), который позволяет оценить возможность восстановления экосистем и определить необходимость проведения мероприятий по рекультивации для конкретного участка. Этот интегральный показатель определяется через формулу, которая учитывает общую сумму баллов по нескольким важным показателям. Среди этих показателей важны следующие: орографический фактор (Of), потенциальное плодородие почвы (Pl), степень рыхлости эмбриоземов (D), влажность грунтов (H), этапы развития растительного покрова (Su), коэффициент сходства Серсена-Чекановского (Sch), индекс поврежденности древостоя (D_v). Кроме того, этот показатель дополняется климатическим коэффициентом (K_k), учитывающим показатель влажности в окружающей среде [Куприянов и Манаков, 2010].

Для оценки климата как одного из факторов, влияющих на потенциальную плодородность почв в зонах, засвидетельствованных добычей угля, авторы использовали гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (см. рисунок 2.5). Этот коэффициент отражает соотношение общего количества осадков к среднегодовой температуре воздуха. Учитывая этот коэффициент, авторы определили показатель увлажнения конкретной природной зоны, который оценивает уровень доступности атмосферной влаги для растительности, за вычетом непродуктивного поверхностного стока [Селянинов, 1928].

Согласно этому показателю, за исключением степных областей, в Кемеровской области создаются благоприятные условия для роста растений.

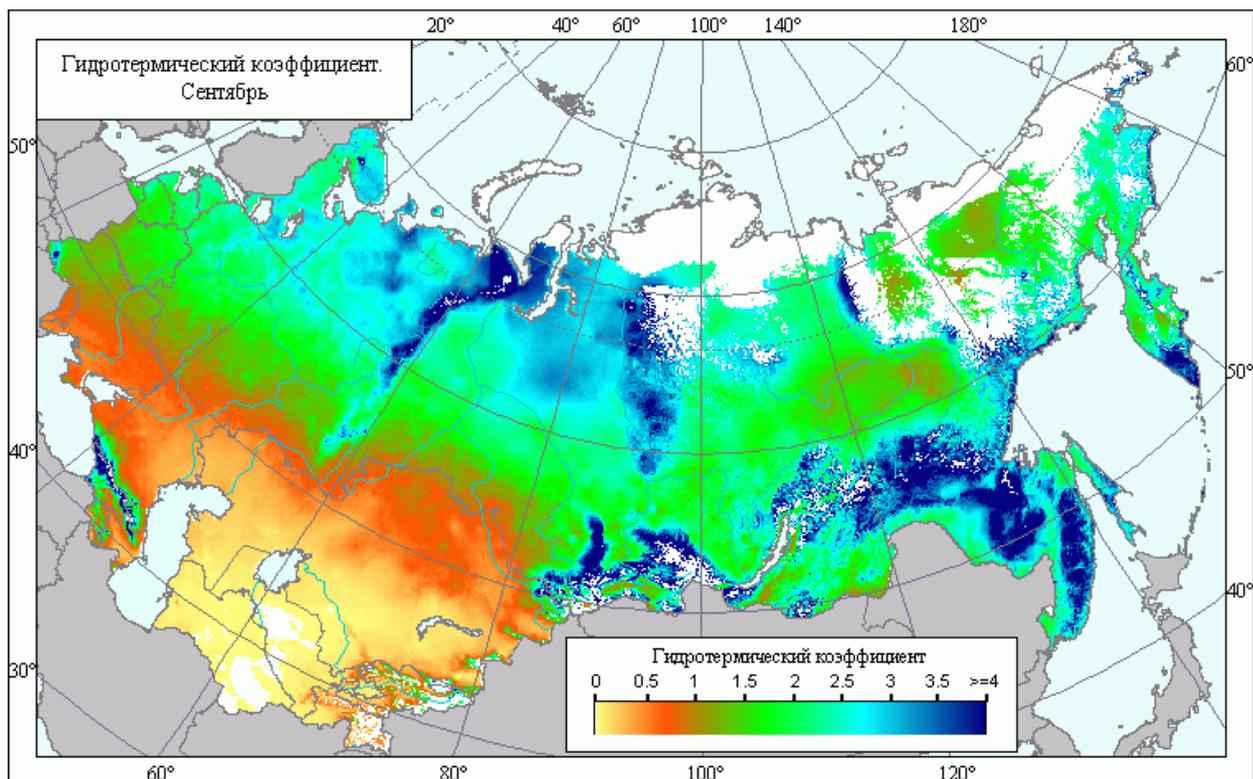


Рисунок 2.5 – Карта гидротермического коэффициента по России за сентябрь 2005 года (https://agroatlas.ru/ru/content/Climatic_maps/GTK/GTK_09/index.html).

Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) является характеристикой уровня влагоснабжения на территории. Этот показатель был предложен российским ученым Г.Т. Селяниновым (1887–1966) и широко используется в сельском хозяйстве для оценки климата и определения зон с разными уровнями влагоснабжения [Черенкова и др., 2013]. Формула для расчёта коэффициента выглядит следующим образом:

$$K = \frac{10 \times R}{\sum t}. \quad (2.4)$$

В этой формуле R представляет сумму осадков в миллиметрах за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$, а $\sum t$ определяет сумму температур в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) за тот же период времени.

С помощью ГТК Селянинов выделяются следующие зоны:

- избыточного увлажнения, или зона дренажа ($\text{ГТК} > 1,3$);

- умеренно влажной (1,0–1,3);
- засушливой (0,7–1,0);
- сухой для сельского хозяйства (0,5–0,7);
- зоны, требующей ирригации (ГТК<0,5).

Агрохимические и физические характеристики основных пород и эмбриоземов классифицированы на оценочные баллы согласно их состоянию.

Таблица 2.5 – Методика определения значения баллов.

Плодородность	Характеристики	Баллы
Почвы с высокой плодородностью	Годятся для биологической рекультивации без изменений	>70 баллов
Потенциально плодородные	С недостаточным содержанием азота	от 30 до 70 баллов
Малоплодородные	Подходящие для биологической рекультивации после улучшения	от 10 до 30 баллов
Токсичные	Малоподходящие для биологической рекультивации без серьезных изменений	<10 баллов

Влажность субстрата является ключевым фактором, влияющим на процесс зарастания, восстановления и работы техногенных экосистем. Исходя из режима влажности, выделено четыре типа сред: сухие, свежие, влажные и сырые. Сухие зоны наблюдаются на острых вершинах отвалов и крутых откосах, где подстилающие породы плохо подвергаются выветриванию. Среды со свежим уровнем влажности преобладают на плоских отвалах из суглинков и аргиллитов, а также на откосах с благоприятным режимом снегонакопления. Влажные среды располагаются в бессточных котловинах и на нижних склонах. Сырые среды формируются в прибрежной зоне постоянных водоемов. Сухие и сырые среды менее пригодны для биологической рекультивации, чем свежие и влажные.

Процесс образования растительности на промышленных землях, нарушенных деятельностью, является результатом взаимодействия климатических условий и экологических факторов, таких как свойства грунтов и микрорельеф, при существенном влиянии окружающей природной растительности, которая является источником распространения растительных семян [Шугалей и др., 1996].

2.2 Вегетационные индексы для оценки состояния растительного покрова

Многочисленные исследования показывают, что главным принципом работы с вегетационными индексами является использование математических операций с различными сочетаниями каналов данных дистанционного зондирования, что позволяет получить полную картину состояния земной поверхности. Ещё одно важное положение заключается в том, что незасаженные участки формируют прямую линию в спектральном пространстве, которую называют "почвенной линией". Вегетационные индексы главным образом опираются на соотношение сигналов в красном и ближнем инфракрасном спектрах, так как почвенная линия находится именно в ближнем инфракрасном диапазоне. Это указывает на то, что при её наличии растительный покров отсутствует, а значит, его значение будет равно нулю.

Для оценки состояния растительного покрова на основе данных ДЗЗ применяются специальные феноботанические, почвенные и геоморфологические индексы [Митрофанов и др., 2012; Kaufman et al., 1992; Qi et al., 1994]. Данные индексы рассчитываются на основе операций растровой алгебры спектральных диапазонов съемки аппаратов ДЗЗ. Вегетационный индекс – это эмпирически выведенные показатели, которые определяются отражательными способностями (солнечно-индуцированной флуоресценцией) растений.

Флуоресценция хлорофилла представляет собой процесс, при котором молекулы хлорофилла начинают излучать свет после поглощения им энергии солнечного света (см. рисунок 2.6). Этот процесс начинается с того, что каждый фотон, попадающий на молекулу хлорофилла, поглощается и переводит её электрон из основного энергетического уровня в возбужденное состояние. Электрон в таком состоянии обладает большей энергией, и это состояние неустойчиво.

Когда молекула хлорофилла возвращается из возбужденного состояния в основное, происходит несколько возможных процессов. Один из них — флуоресценция, при которой часть накопленной энергии высвобождается в виде света, длина волны которого находится в диапазоне 650–800 нм. Обычно, в нормальных условиях, около 3–5 % энергии используется для этого светового излучения.

Однако флуоресценция не является единственным способом расходования энергии возбужденного электрона. В фотосинтезе большая часть этой энергии направляется на преобразование света в химическую энергию, которая используется растением для синтеза органических веществ. В то же время часть энергии теряется в виде тепла, и этот процесс известен как нефотохимическое тушение. Оно выполняет важную защитную функцию — предотвращает перегрев фотосинтетического аппарата, снижая риск повреждения клеток. Нефотохимическое тушение становится особенно важным в условиях интенсивного

солнечного излучения, когда вероятность перегрева фотосинтезирующих клеток возрастает.

Таким образом, флуоресценция хлорофилла не только отражает поглощение света растениями, но и позволяет оценить эффективность фотосинтетических процессов и уровень нагрузки на фотосинтетический аппарат, особенно в условиях стресса, таких как избыток света или дефицит воды. Изучение флуоресценции помогает учёным и агрономам оценивать состояние растений и их способность адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды.

Флуоресценция хлорофилла, возникающая под действием солнечного света, называется солнечно-индуцированной флуоресценцией (СИФ; англ.: Solar induced fluorescence, SIF). Фактически, излучение света в виде флуоресценции конкурирует с фотосинтезом, и поэтому флуоресценция может позволить более точно оценить ассимиляцию углерода и раньше обнаружить стресс, чем это возможно на основе одних только данных об отражательной способности. Это делает СИФ весьма перспективным методом оперативной оценки состояния растений.

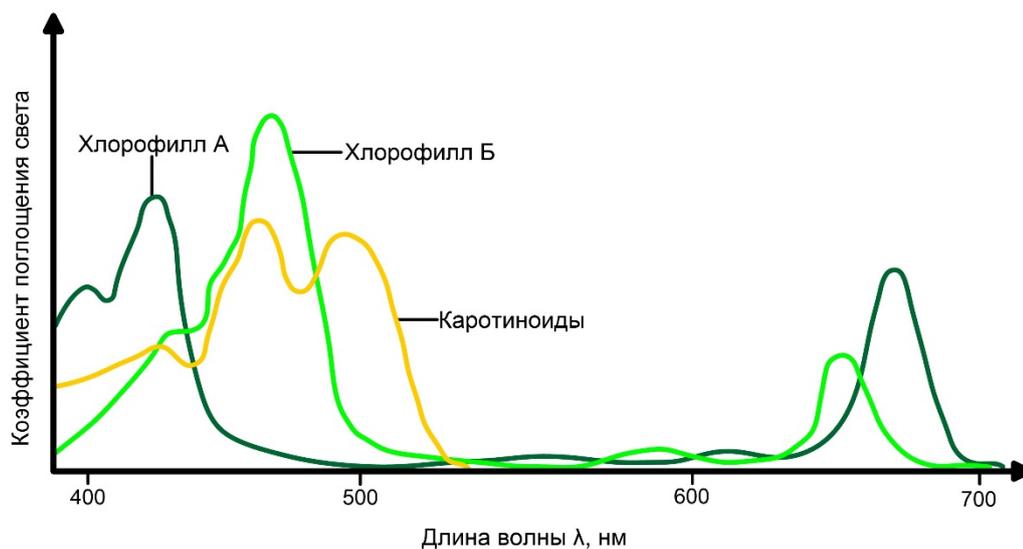


Рисунок 2.6 – Спектральные характеристики поглощения света хлорофилла а и б, отражающие максимальную фотосинтетическую активность в красном и синем диапазонах спектра

Современные методы оптического ДЗЗ опираются на данные о спектрах отражения солнечного излучения. Эти методы позволяют оценить состояние растений, связанное со структурными или биохимическими свойствами, такими как индекс листовой поверхности

или содержание хлорофилла. Однако фотосинтез растений является активно регулируемым процессом, так как эта биофизическая/биохимическая реакция постоянно приспосабливается к условиям окружающей среды путем изменения или перестановки пигментов в листьях без каких-либо заметных структурных изменений. Таким образом, по изменению фотосинтеза можно выявить реакцию растения на внешнее воздействие (например, на недостаток влаги), еще до того, как в растении произойдут структурные изменения, наблюдаемые обычными оптическими методами ДЗЗ.

Сигнал флуоресценции хлорофилла получается в основном за счет флуоресцентного излучения хлорофилла растительности, тогда как почва и облака подобных сигналов не дают. Таким образом, продукты спутниковой СИФ менее «зашумлены» облачным и почвенным фоном по сравнению с традиционными спутниковыми вегетационными индексами.

Применяется СИФ для мониторинга реакции сельскохозяйственных культур на стрессовые факторы [Yang et al., 2023]. СИФ является хорошим предиктором урожая [Peng et al., 2020]. С его помощью оценивают валовую первичную продукцию суши — количественный эквивалент общего количества углерода, усвоенного растительностью в процессе фотосинтеза [Lagutin et al., 2022].

На интерпретацию вегетационных индексов существенно влияет весь комплекс факторов окружающей среды исследуемого района.

Главной особенностью использования индексов является то, что с помощью их можно совершать различные математические операции на разных каналах дистанционного зондирования земли, что подтверждено огромным количеством эмпирических данных [Черепанов, 2011].

Для более глубокого анализа вегетационных индексов необходимо рассмотреть концепцию «изовегетационных линий», которые обозначают линии с одинаковыми характеристиками растительного покрова. Существуют две основные теории относительно направленности этих линий. Вегетационные индексы, такие как NDVI, SAVI и RVI, принадлежат к категории «отношений» или относительных индексов, которые основываются на нахождении в одной точке. Данные индексы используются для вычисления угла между точкой конвергенции и координатами пикселя в системе координат RED-NIR. Группа индексов, ориентированных вдоль направления, параллельного почвенной линии, известна как «перпендикулярные». К ним относятся PVI, WDV и DVI. Их основной принцип заключается в измерении расстояния от почвенной линии до заданной точки на изображении, представленной в координатах RED-NIR.

Важно помнить, что на космических снимках открытая почва образует прямую линию в спектральной области, что обуславливает использование большинства вегетационных индексов в ближнем инфракрасном диапазоне. Именно в этой части спектра расположена почвенная линия, указывающая на отсутствие растительности.

Различные феноботанические индексы применяются на территориях с низкой плотностью растительности, где зелёная масса незначительна. Для таких регионов выбираются индексы, учитывающие влияние почвы, так как почвы имеют разные показатели отражательной способности даже в широких спектральных диапазонах. Индексы, корректируемые с учётом свойств почвы, особенно полезны для анализа таких территорий, где растительность имеет слабое выражение.

В частности, на репрезентативность вегетационных индексов влияют почвенный фон, растительная подстилка, горные породы. Для устранения этих эффектов в вегетационные индексы вводятся специальные поправки.

На основе литературного анализа имеющихся вегетационных индексов был сформирован специальный перечень, который подходит для оценки состояния растительного покрова в районах открытой добычи угля (см. таблицу 2.7):

1. *Нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI):*

Наиболее распространённым и часто применяемым вегетационным индексом является NDVI. При обсуждении вегетационных индексов обычно имеют в виду именно его. Данный индекс охватывает наиболее широкий диапазон среди всех известных вегетационных индексов и отличается высокой чувствительностью к изменениям в структуре растительного покрова [Выприцкий, 2022]. В то же время он подвержен влиянию атмосферных и почвенных факторов, а в условиях слаборазвитой растительности его чувствительность заметно снижается [Выприцкий, 2022]. Он также реагирует на атмосферные и почвенные условия, хотя на участках с низким содержанием растительности чувствительность снижается. Для точной оценки в таких условиях необходимо использовать индексы с учётом влияния почвы. NDVI был впервые предложен в 1973 году [Rouse et al., 1974], а концепция была представлена ранее, в 1969 году [Баширова, 2019]. Рассчитывается следующим образом:

$$NDVI = \left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red} \right), \quad (2.5)$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра;

Red – отражение в красной области спектра.

NDVI принимает положительные значения для участков с растительностью, обычно в диапазоне от 0,2 до 0,8 (см. рисунок 2.6). Значения индекса рассчитываются на основе данных, полученных с космических снимков зелёных насаждений, которые поглощают свет в красном спектре и отражают его в ближнем инфракрасном диапазоне. В диапазоне красного спектра (0,62–0,75 мкм) хлорофилл активно поглощает солнечное излучение, тогда как в ближней инфракрасной области (0,75–1,3 мкм) наблюдается максимальное отражение, обусловленное особенностями клеточной структуры листовой ткани [Баширова, 2019]. Таким образом, высокая активность фотосинтеза снижает показатели отражения в красном диапазоне и увеличивает их в ближнем инфракрасном. Соотношение этих параметров позволяет чётко различать растительные объекты от других элементов окружающей среды.



Рисунок 2.7 – Значения NDVI в зависимости от состояния здоровья растения (<https://alb.aero/services/karta-ndvi/>)

Для представления значений индекса NDVI используются стандартные цветовые шкалы, которые могут быть как непрерывными градиентами, так и разделёнными на дискретные интервалы. Значения NDVI колеблются в пределах от -1 до 1, причём их визуализация может осуществляться в процентном формате или в специальных масштабированных системах. В некоторых программах обработки данных дистанционного зондирования применяется шкала от 0 до 255, соответствующая различным уровням яркости в градациях серого. В альтернативных методах используется диапазон от 0 до 200, где значения от -100 до 100 интерпретируются более наглядно, так как каждое деление отражает изменение на 1%. За счёт специфики спектрального отклика в ближнем

инфракрасном и красном диапазонах, объекты, не относящиеся к растительности, демонстрируют стабильные показатели NDVI, что позволяет их достоверно распознавать [Huete et al., 2002].

Таблица 2.6 – Значения NDVI для различных материалов [Баширова, 2019]

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разряженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

2. Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI):

Этот индекс был создан с целью улучшить показатели NDVI в районах с высоким уровнем листового покрова. Он учитывает коррекцию сигналов, связанных с почвой, а также снижает влияние атмосферных факторов, таких как аэрозоли, что позволяет получить более точные данные. Улучшение значений происходит путем оптимизации сигнала растительности с помощью синей области отражения. Используется в регионах, где уровень листовой поверхности (вегетационный индекс LAI) повышен, а NDVI перенасыщен. Был описан в 1985 году [Huete et al., 1985]. Индекс рассчитывается по формуле:

$$EVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C_1 * Red - C_2 * Blue + L)} = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 * Red - 7,5 * Blue + 1)}, \quad (2.6)$$

где *Blue* – отражение в голубой области спектра;

C_1 , C_2 , L – коэффициенты, эмпирически установленные как 6, 7,5 и 1 соответственно.

Индекс EVI используется для исследования растительного покрова независимо от его плотности, позволяя проводить анализ как густой, так и разреженной растительности. Диапазон его значений варьируется от 0 до 1 (см. рисунок 2.7) [Черепанов, 2011], при этом для зелёных насаждений характерны показатели в интервале 0.2–0.8.

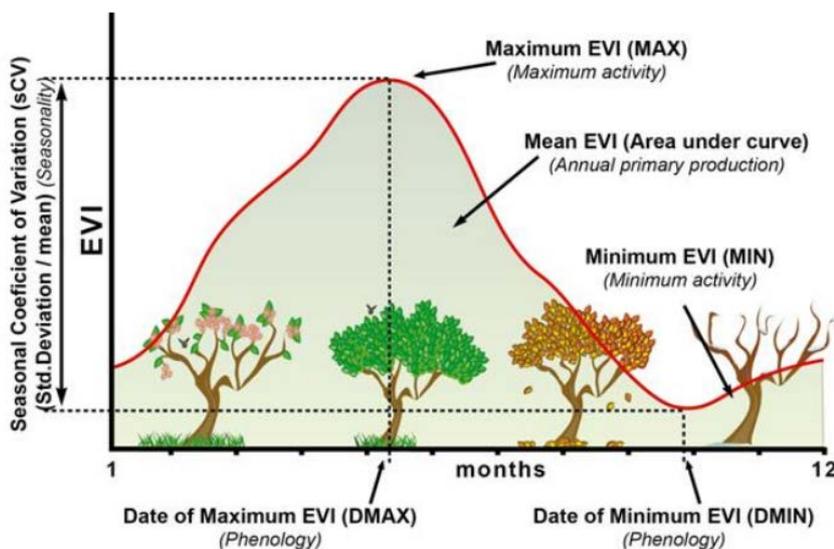


Рисунок 2.8 – Сезонность значения EVI

(https://www.researchgate.net/publication/324720362_Ecosystem_functioning_of_protected_areas_and_networks_A_remote_sensing_assessment_across_social-ecosystem_contexts)

3. Перпендикулярный вегетационный индекс (*Perpendicular Vegetation Index, PVI*):

Перпендикулярный индекс растительности схож с разностным вегетационным индексом, но его чувствительность к атмосферным колебаниям значительно выше. PVI определяется для многоканальных растровых данных (см. рисунок 2.8). По сути, этот индекс является расширенной версией DVI, принимая во внимание различия в наклоне почвенной линии. Однако, из-за его высокой чувствительности к атмосферным условиям, для получения точных результатов требуется проведение дополнительных расчетов с учётом атмосферной коррекции [Qi et al., 1994]. Формула для расчета PVI следующая:

$$PVI = \sin(\alpha) * NIR - \cos(\alpha) * Red, \quad (2.7)$$

где α – угол между почвенной линией и осью NIR.

Линии изовегетации для перпендикулярного индекса PVI располагаются параллельно почвенной линии, которая может иметь различный наклон и проходит через начало координат. Значения этого индекса могут изменяться в пределах от -1 до 1 [Черепанов, 2011].



Рисунок 2.9 – Крестиком отмечены измеренные коэффициенты отражения красных и инфракрасных волн, пунктирная линия – линия почвы (<https://gisresources.com/vegetation-indices/>)

4. Почвенный вегетационный индекс (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI):

Почвенно-корректированный вегетационный индекс (SAVI) является комбинацией между относительными и перпендикулярными индексами. Этот индекс был разработан для уменьшения влияния почвы на показатели растительности, особенно в условиях низкой плотности растительного покрова, как, например, в пустынных регионах. SAVI использует специальный коэффициент для корректировки яркости почвы, что позволяет минимизировать её влияние на результат.

Теоретические основы этого индекса были подробно описаны в работе [Huete et al., 1994], основанной на модели переноса электромагнитного излучения (radiative transfer). Согласно этим расчетам, коэффициент корректировки L для значения LAI = 1 равен 0.5, в отличие от ранее полученного эмпирического значения 0.75. Исследования подтверждают, что данный коэффициент варьируется в пределах от 0, что соответствует территориям с высокой концентрацией растительности, до 1, характерного для сильно разреженных участков. Для зон со средней плотностью растительного покрова принято использовать усреднённое значение 0.5 [Huete et al., 1988].

Формула для расчета SAVI выглядит следующим образом:

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} * (L + 1), \quad (2.8)$$

где $L = [0;1]$, $L = 0$ для очень густого растительного покрова, $L = 1$ для очень разреженного. Чаще всего используют значение $L = 0,5$;
 $L + 1$ – множительный фактор, присутствующий в SAVI и MSAVI и приводящий к тому, что их значения варьируют от -1 до 1 , введен для того, чтобы свести эти индексы к виду NDVI при L , стремящемся к 0 .

5. Модифицированный почвенный вегетационный индекс (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI*):

Индекс MSAVI (модифицированный почвенно-корректированный индекс) был разработан в 1994 году [Qi, 1994] с целью минимизации влияния открытых почвенных поверхностей на значения индекса SAVI. Основной задачей при его создании являлось уточнение корректировочного коэффициента L , который вводится в расчёты перед вычислением SAVI. Для определения этого параметра применялись вычислительные методы, основанные на индексации NDVI и WdVI, что позволило избежать схождения изовегетационных линий в единую точку.

Формула расчёта MSAVI представлена следующим образом:

$$MSAVI = \left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \right) * (L + 1); \quad (2.9)$$
$$L = 1 - 2 * s * NDVI * WdVI,$$

где s – наклон почвенной линии.

MSAVI является относительным вегетационным индексом, при котором изовегетационные линии пересекают почвенную линию в нескольких точках. В отличие от других индексов, почвенная линия в данном случае может изменять угол наклона и проходить через разные участки оси координат, что позволяет более точно учитывать влияние почвы на спектральные характеристики растительного покрова.

6. Трансформированный почвенный вегетационный индекс (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index, TSAVI*):

TSAVI – Трансформированный почвенно-корректированный индекс растительности (TSAVI) был создан для того, чтобы учитывать изменяющийся наклон почвенной линии и её пересечение с осью координат, что помогает уменьшить влияние почвенного фона на вегетационные показатели [Baret, 1989]. Основная задача TSAVI — корректировать неопределенности, возникающие при использовании индекса SAVI, особенно в случаях, когда почвенный фон оказывает сильное воздействие на результат. Это достигается за счёт

введения дополнительного параметра «X», который минимизирует влияние почвы на измерения растительности.

В работе [Baret et al., 1991] параметр «X» был рассчитан на уровне 0.08, что позволило скорректировать почвенные шумы, характерные для таких условий. Важным преимуществом TSAVI является возможность более точного анализа растительности на территориях с разной плотностью покрова и неоднородными почвами. При этом точка пересечения изовегетационных линий находится между значениями, характерными для индекса SAVI при $L = 0.5$, что повышает точность расчётов.

Индекс TSAVI вычисляется по формуле:

$$TSAVI = \left(\frac{s * (NIR - s * Red - a)}{a * NIR + Red - a * s + X * (1 + s^2)} \right), \quad (2.10)$$

где a – координата пересечения почвенной линии с осью NIR ;

s – наклон почвенной линии;

X – коэффициент коррекции, используемый для уменьшения почвенного шума (в оригинальной статье $X = 0.08$).

Этот индекс применяется в ситуациях, когда почвенная составляющая может существенно исказить результаты измерений. TSAVI позволяет сгладить такие искажения, обеспечивая более точную оценку растительного покрова в различных условиях. Его значения варьируются от -1 до 1, что делает его удобным для использования в широком спектре задач дистанционного зондирования [Baret et al., 1991].

7. Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI):

Первый атмосфероустойчивый вегетационный индекс (ARVI) был разработан и внедрен в 1992 году [Kaufman et al., 1992]. Этот индекс обладает большей чувствительностью к изменениям растительного покрова по сравнению с GEMI. При высоком уровне растительности ARVI демонстрирует меньшую подверженность почвенному и атмосферному шуму, чем GEMI. Однако, когда растительный покров низкий, устойчивость ARVI к влиянию атмосферы и почвы снижается. Для минимизации атмосферного влияния в красной части спектра индекс использует данные из синей зоны спектра. Формула для расчета ARVI выглядит следующим образом:

$$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}; \quad (2.11)$$

$$Rb = Red - a * (Red - Blue).$$

Значение параметра "а" обычно принимается равным 1, но если растительность редкая или тип атмосферы не определен, то "а" можно установить на уровне 0.5. ARVI является относительным индексом, при котором изовегетационные линии имеют поведение, схожее с исходными индексами, но могут иметь разный наклон и проходят через нулевую точку. Диапазон значений индекса варьируется от -1 до 1.

Этот индекс получил широкое применение в дистанционном зондировании, благодаря своей способности корректировать атмосферное воздействие, особенно в условиях высокой плотности растительности, что делает его одним из наиболее универсальных инструментов для оценки состояния растительных покровов.

8. Зеленый нормализованный относительный вегетационный индекс (*Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI*):

Индекс GNDVI применяется для анализа фотосинтетической активности растений, а также для оценки их потребления воды и удобрений. В отличие от NDVI, GNDVI обладает повышенной чувствительностью к изменениям содержания хлорофилла в растениях [Gitelson et al., 1996]. В основе этого индекса лежит использование зеленого спектра света, что отличает его от NDVI, который опирается на красный и ближний инфракрасный диапазоны. GNDVI также позволяет определять скорость фотосинтеза и контролировать состояние растительности, особенно при наблюдении за процессами увядания.

Формула для расчета GNDVI выглядит следующим образом:

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{NIR + Green}, \quad (2.12)$$

где *Green* – отражение в зеленой области спектра.

Зеленый диапазон с длиной волн 540–570 нм и ближний инфракрасный спектр используются для вычисления этого индекса. Поскольку GNDVI отличается высокой чувствительностью к содержанию хлорофилла, он помогает отслеживать состояние растений на всех стадиях их роста — от начала созревания до увядания. Особенность этого индекса заключается в том, что он единственный способен определить уровень азота в листьях, даже если отсутствуют данные в красной зоне спектра.

Этот индекс широко применяется в сельском хозяйстве, где его использование помогает контролировать состояние растений и оптимизировать внесение удобрений, а также мониторить эффективность водопотребления.

9. Индекс отражения антоцианов (*Anthocyanin Reflectance Index, ARI*):

Антоцианы — это природные растительные пигменты, широко распространенные среди высших растений, которые придают им характерные красные, синие и пурпурные оттенки. Эти пигменты играют важную роль не только в декоративной окраске растений, но и в их физиологическом ответе на стрессовые факторы. Антоцианы считаются важными индикаторами различных типов стресса, таких как дефицит воды, избыток солнечного света, температурные колебания и патогенные атаки. Это делает их ценными для оценки состояния растений в различных экологических условиях [Мерзляк и др., 2003].

Максимальная отражательная способность антоцианов находится в диапазоне длин волн около 550 нм, что делает их легко различимыми в спектре видимого света. Однако на этих же длинах волн происходит и значительное отражение хлорофилла, что создает сложности при разделении сигналов этих двух пигментов. Для того чтобы исключить влияние хлорофилла и получить чистое значение антоцианов, используется метод вычитания спектральной полосы на длине волны около 700 нм, которая отражает только хлорофилл. Это позволяет более точно оценить содержание антоцианов в растительном покрове.

Антоциановый рефлексивный индекс (ARI) был разработан для измерения содержания антоцианов в растениях с помощью дистанционных методов зондирования. Значения ARI варьируются от 0 до 0.2, и этот индекс широко используется для мониторинга растений в полевых условиях. Формула для расчета ARI выглядит следующим образом:

$$ARI = \frac{1}{Green} - \frac{1}{Red}. \quad (2.13)$$

где *Green* — отражение в зеленой части спектра;

Red — отражение в красной части спектра [Кузеев, 2010].

Использование ARI позволяет эффективно оценивать уровень антоцианов и, соответственно, физиологическое состояние растений, особенно в условиях стресса. Этот индекс активно применяется в аграрной и экологической практике для мониторинга состояния растительности и выявления ранних признаков стресса, что может быть полезно для принятия своевременных мер по улучшению условий выращивания.

10. Индекс листовой поверхности (*Leaf Area Index, LAI*):

LAI – метод вычисления индекса листовой поверхности. Индекс разработан для анализа листовой поверхности нашей планеты и анализирует количество листьев на определенной территории [Станкевич и др., 2014]. Его высчитывают как отношение односторонней (освещенной) площади листьев к занимаемой ими поверхности почвы.

Вычисление значений LAI строится на данных измерений коэффициента спектральной яркости в красном и ближнем инфракрасном каналах, с использованием результатов моделирования переноса фотонов в растительном покрове [Zheng *et al.*, 2009]. В зависимости от плотности листового покрова моделирование коэффициента спектральной яркости вычисляется в красном и ближнем инфракрасном каналах. Формула для расчета LAI:

$$LAI = \frac{S_{\text{листьев}}}{S_{\text{почвы}}}. \quad (2.14)$$

Индекс листовой поверхности (LAI) представляет собой показатель, который определяется как соотношение общей площади односторонней поверхности листьев $S_{\text{листьев}}$ площади земельного участка $S_{\text{почвы}}$ [m^2/m^2], выражаемое в квадратных метрах на квадратный метр (см. рисунок 2.10). С увеличением значения LAI происходит изменение отражательной способности почвенно-растительной системы, и эти изменения стремятся к точке сходимости, которая не зависит от спектральной яркости почвы [Xiao *et al.*, 2018]. Это явление называется "насыщением", при котором чувствительность спектральной яркости к колебаниям индекса LAI ослабевает.

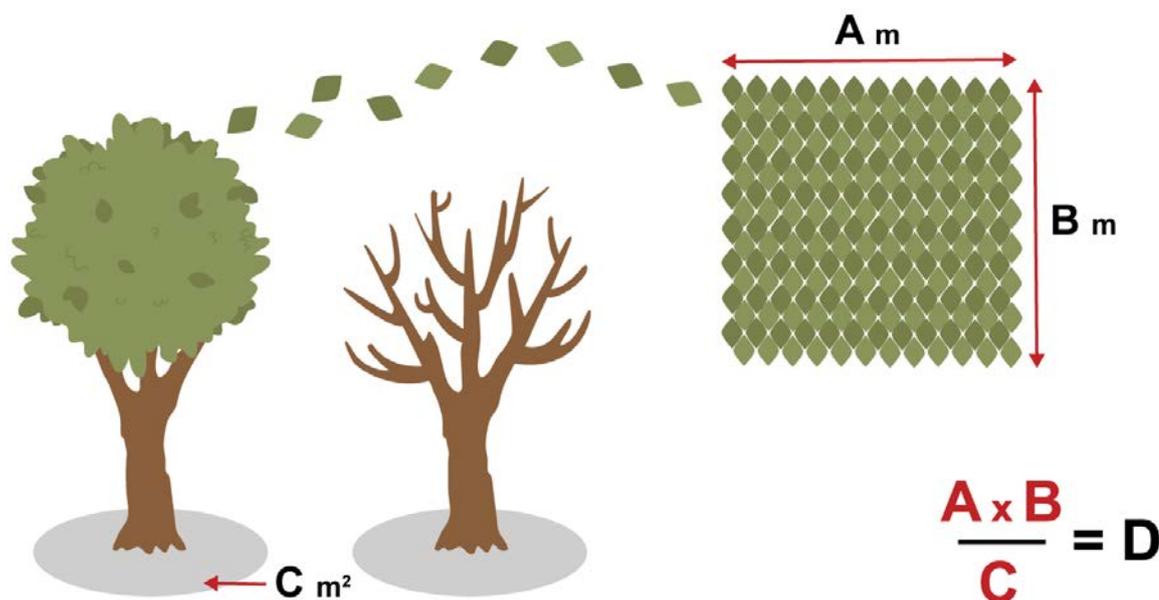


Рисунок 2.10 – Принцип расчета LAI
(<https://www.pesticidewise.com/image/leaf-area-index>)

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, 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. Развитие угольных разрезов сопровождается значительным выбросом угольной пыли, аэрозолей и продуктов сгорания, что приводит к изменению оптических характеристик растительного покрова. Покрытие листовой поверхности

пылевыми частицами 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.

Таблица 2.7 – 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 фактор.	-1..1	>0,5 Зеленая приповерхностная растительность (ростки до 10 см высотой)
ARVI	Вегетационный индекс с коррекцией атмосферы	$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}$ $Rb = RED - a \cdot (RED - BLUE)$ 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 — 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	$LAI = \frac{S_{\text{листьяев}}}{S_{\text{почвы}}}$	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

2.3 Цветовой синтез изображений и композитирование каналов

Композитирование каналов в области дистанционного зондирования земли – это метод, позволяющий объединить информацию с различных спектральных диапазонов в единое многослойное изображение или композит [Шовенгердт, 2010]. В основе этого процесса лежит объединение данных, полученных с разных спектральных полос, в единую информацию, чтобы получить изображение с более полной информацией о наблюдаемом объекте.

Дистанционное зондирование использует спектральные каналы, которые измеряют электромагнитное излучение, отражаемое или излучаемое земной поверхностью. Эти каналы могут охватывать видимый, инфракрасный и микроволновый спектр (см. рисунок 2.11). Каждый канал фиксирует информацию об объектах на земной поверхности, но обладает ограничениями - например, некоторые материалы или объекты могут быть лучше видны в определенных диапазонах спектра [Гонин, 1980; Живичин и др., 1980].

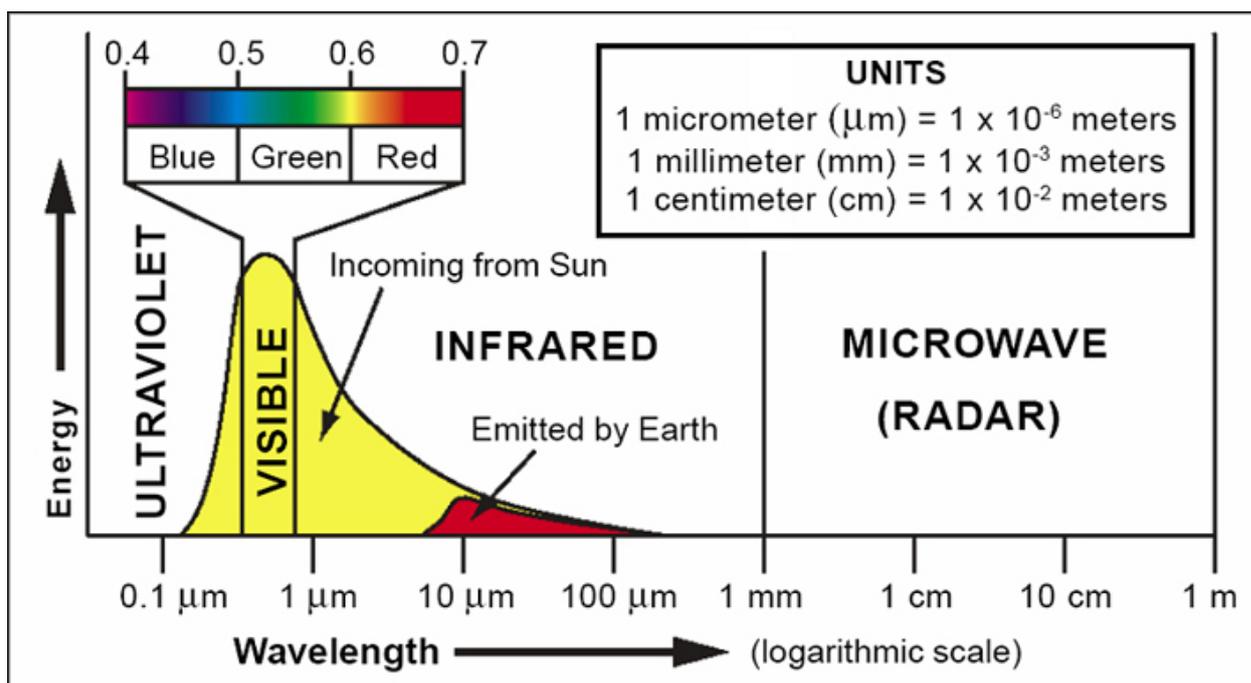


Рисунок 2.11 – Спектр электромагнитного излучения

Комбинация каналов позволяет совместить данные с разных спектральных каналов в одно изображение. Например, можно использовать красный, зеленый и синий каналы для создания RGB (красный, зеленый, синий) изображения, которое используется для визуализации и анализа данных (рис. 2.12, 2.13).

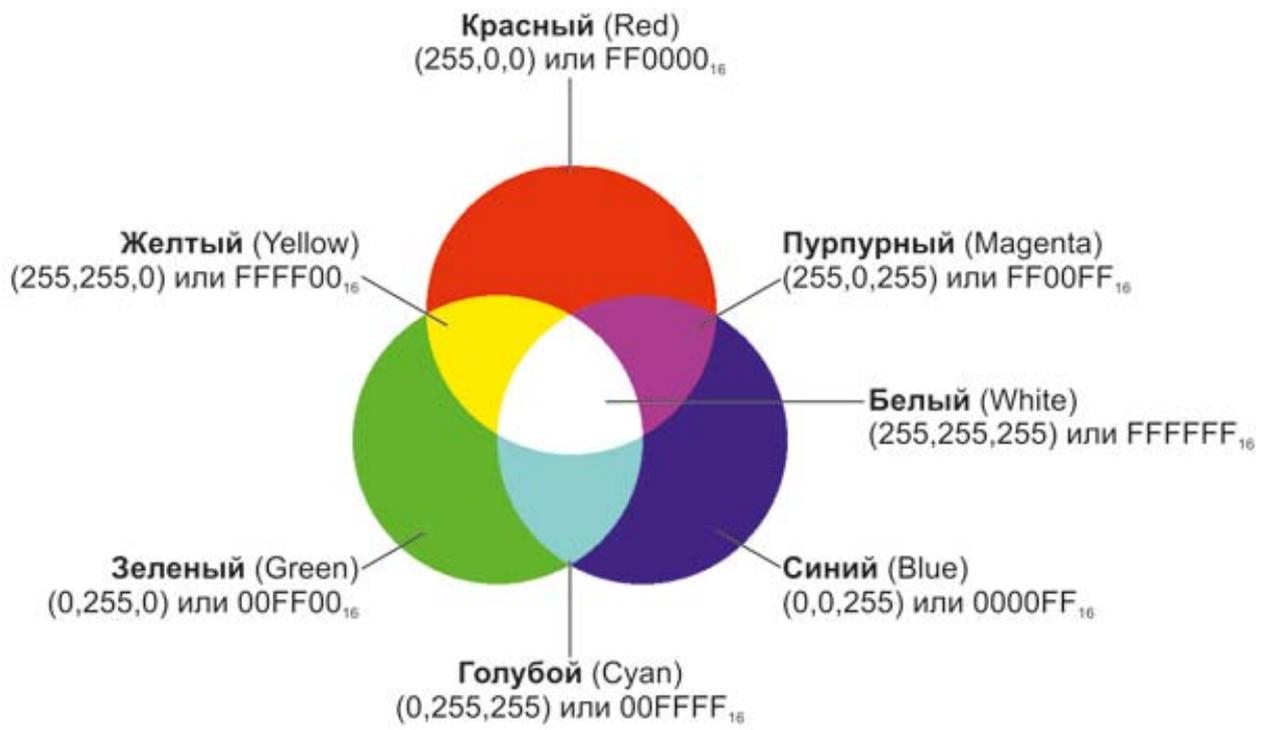


Рисунок 2.12 – RGB-модель цветового синтеза

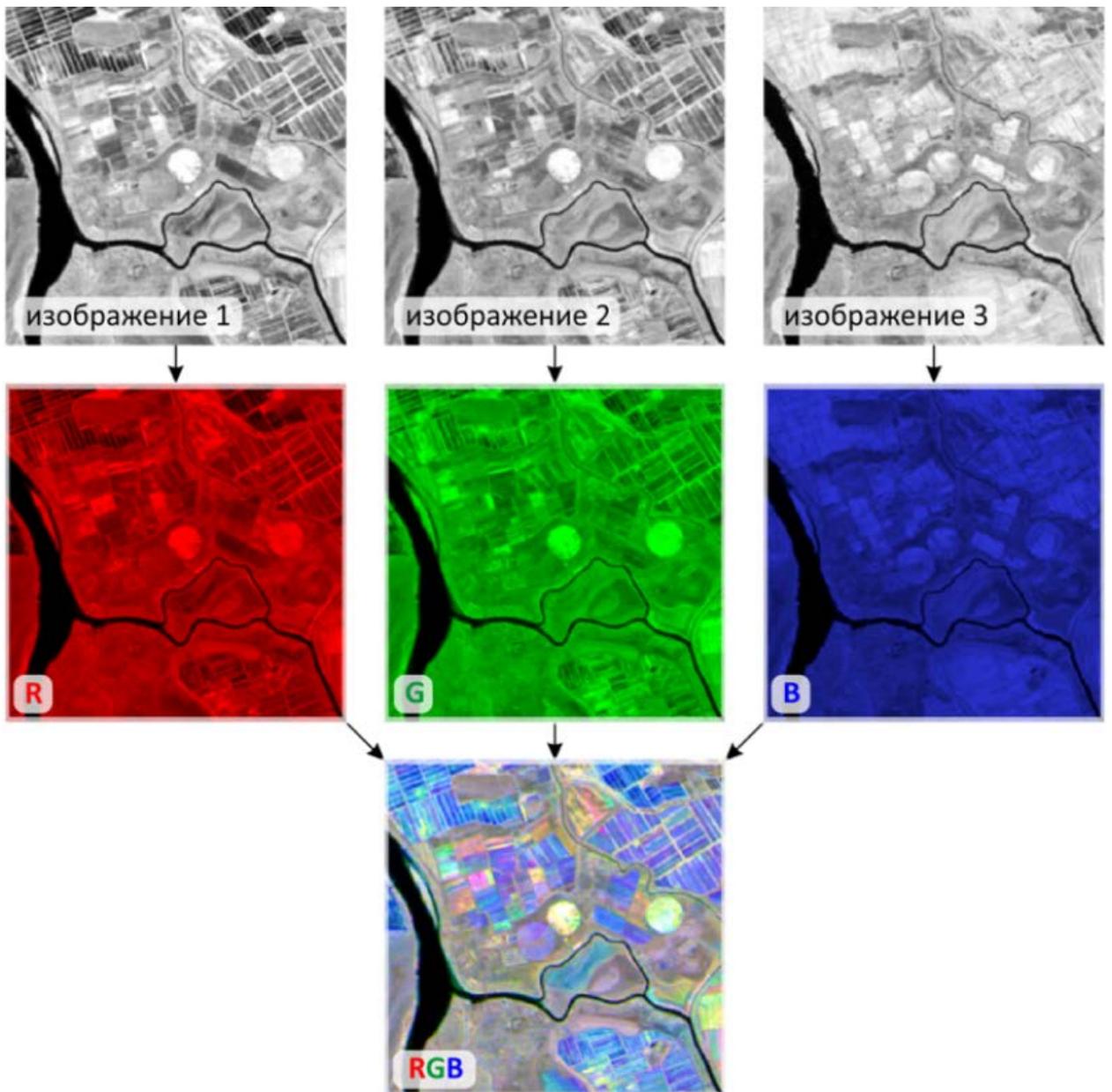


Рисунок 2.13 – Пример цветового синтеза спутникового изображения

Также возможно создание комбинированных спектральных композитов, где используются более узкие спектральные диапазоны для выделения определенных признаков, таких как водные ресурсы, растительность или горные образования (см. рисунок 2.12) [Шовенгердт, 2010].

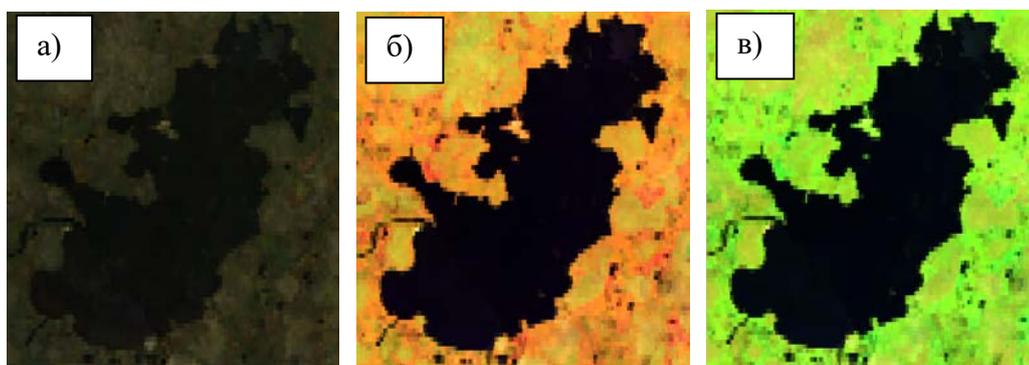


Рисунок 2.14 – Применение композитирования каналов для дешифрирования водного объекта. а) – естественный цвет (Red-Green-Blue); б) – комбинация каналов NIR-SWIR-RED; в) – каналы SWIR-NIR-RED

Композитирование каналов дистанционного зондирования земли играет важную роль в интерпретации и анализе информации, полученной из спутников и других источников дистанционного зондирования. Этот метод обеспечивает более полное представление о составе и свойствах земной поверхности, что позволяет ученым и специалистам в различных областях использовать эти данные для более точного изучения и мониторинга окружающей среды, а также для решения разнообразных научных и прикладных задач [Цыдыпов и др., 2012].

Комбинация каналов является основным методом цифровой обработки изображений, который используется для объединения данных из различных спектральных диапазонов. Выбор оптимальной комбинации из «n» доступных каналов в спутниковых данных зависит от конкретного применения и интересующих функций. Например, для обнаружения полезных ископаемых наилучшими оказываются цветовые композиты, состоящие из одного из спектральных диапазонов SWIR или mid-infrared (MIR) [Ombiro et al., 2021; Andongma et al., 2021]. Использование различных уровней контрастности, таких как линейная и корневая функции, а также выравнивание гистограмм, помогает выделить различные элементы изображения, повышая его интерпретируемость.

Фильтрация представляет собой операцию обработки пикселей, во время которой каждый пиксель изображения сравнивается с окружающими пикселями в заданном окне ядра фильтра. Данная операция помогает выявлять границы и обозначать литологические контакты и линейные геологические структуры. Направленные фильтры особенно полезны для обнаружения структурных особенностей в определенных направлениях [Шовенгердт, 2010]. Аналогичным образом, в частотной области повышаются более высокие частоты, связанные с геологическими краями для выявления структурных деталей и аномалий.

Метод анализа главных компонент (Principal component analysis, PCA) используется

для уменьшения размерности данных, сокращая дисперсию между спектральными полосами до нескольких компонентов. PCA подбирает некоррелированные линейные комбинации переменных таким образом, что каждая линейная комбинация или главный компонент имеет более низкую дисперсию. Результат PCA представляет собой каналы с наибольшей дисперсией в начальных полосах, в то время как остальные содержат шум. Первые один или два канала в выходном сигнале PCA в различных комбинациях с исходными каналами помогают выявлять различия между вариациями литологических единиц и формами рельефа. PCA преобразует исходные данные в новые компоненты, которые являются наименее взаимозависимыми. Таким образом, спектральные данные сжимаются в новую систему координат, избыточные данные удаляются, и создаются новые компоненты, включающие информацию из всех спектральных диапазонов, которые заменяют исходные данные [Estornell *et al.*, 2013].

2.4 Выводы по главе 2

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. Такой подход обеспечивает объективное измерение, которое можно использовать для отслеживания изменений со временем, выявления проблем и принятия обоснованных решений. Методики позволяют анализировать земельные ресурсы в контексте экосистемного подхода. Вместо того чтобы рассматривать землю как изолированный ресурс, они могут включать анализ биологических показателей, климатических факторов и взаимодействия с другими компонентами экосистемы. Это более комплексное понимание позволяет разрабатывать стратегии, которые поддерживают устойчивость и биоразнообразие.

Перевод традиционных методик оценки качества земель в сферу дистанционного зондирования Земли предоставляет широкие перспективы по сравнению с традиционными подходами. ДЗЗ позволяет наблюдать обширные территории без необходимости физического присутствия на месте. Это особенно ценно при мониторинге удалённых или труднодоступных районов. При этом нужно учитывать комплекс факторов, 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.

В дистанционном зондировании Земли вегетационные индексы являются основным инструментом для мониторинга растительности и оценки ее состояния. Но вегетационные индексы не являются полноценными методиками оценки качества земель. Они могут дать общую картину состояния растительности, но для детального мониторинга и комплексного анализа этого недостаточно. К примеру, для территорий с разреженной растительностью индексы по отдельности работают некорректно. В случае скудного растительного покрова результаты работы индекса в большинстве будут зависеть от спектральных характеристик почвы. Чтобы получить более точную интерпретацию состояния земного покрова эффективно использовать набор вегетационных индексов или их цветовой синтез. Цветовой синтез позволяет комбинировать данные из разных спектральных диапазонов, создавая изображения, которые могут содержать больше информации, чем черно-белые или монохромные снимки. Экологическое дешифрирование данных ДЗЗ в основном выполняется в ручном режиме. Для повышения эффективности анализа данных ДЗЗ требуется разработка автоматизированных подходов.

Также для полноценного мониторинга земельных ресурсов и проведения глубокого анализа необходимо разработать специальные методики, которые объединяют различные подходы. Эти методики должны сочетать данные вегетационных индексов с дополнительными источниками информации, такими как спутниковые снимки высокого разрешения, результаты наземных исследований, климатические данные и геоинформационные системы. Такой комплексный подход позволит оценить качество земель на более глубоком уровне, выявляя не только общие тенденции, но и конкретные проблемы, такие как эрозия, уплотнение почвы или нарушения в экосистемах. Разработка усовершенствованных методик поможет обеспечить более точный мониторинг, что особенно важно для принятия эффективных управленческих решений, разработки стратегий устойчивого землепользования и проведения природоохранных мероприятий.

Комплексный подход, включающий дистанционное зондирование, вегетационные индексы и биоиндикацию, способствует точной и своевременной оценке экологической ситуации в районах угледобычи, что позволяет принимать эффективные решения по охране окружающей среды и восстановлению нарушенных экосистем.

3 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ УГЛЯ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИМИТИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

3.1 Факторы, лимитирующие продуктивность растительного покрова в районе разработки угольных месторождений

На протяжении всего цикла онтогенеза растение должно пройти несколько фаз развития: от ростка, вегетации, цветения и до фазы увядания. Динамический процесс образования и накопления многочисленных химико-фармакологических веществ в дикорастущих растениях изменяется в онтогенезе и во многом зависит от экологических факторов окружающей среды.

Природно-климатические факторы оказывают существенное влияние как на внешние характеристики растений, так и на их химический состав. Температурные показатели региона являются одним из важнейших факторов на протяжении всего жизненного цикла растения. Например, от тепловой и световой энергии напрямую зависит продолжительность вегетативной фазы цикла растения, что отражается на накоплении полезных веществ в растении и его массы. Каждое растение, в зависимости от вида, требует определенного количества тепла, в пределах которого оно способно начать и завершить свой жизненный цикл.

Другим, не менее важным фактором является **количество осадков и уровень влажности среды** обитания того или иного растения. В зависимости от температурного режима определяется и вид осадков, которые оказывают существенное влияние на количество и состав действующих веществ в растениях. Например, засуха положительно влияет на жизнь и развитие ксерофитов, а для гигрофитов, наоборот, вредны условия с недостаточным количеством влаги. Так, в условиях с резкими колебаниями влажности могут выжить только мезофиты.

Кроме влажности и температуры, определенное влияние на количество действующих веществ оказывает **перемена географической долготы**. Со сменой координат может измениться весь комплекс взаимосвязанных факторов, влияющих на состояние растений – смена тепла и холода, интенсивность солнечного света, доступность УФ-лучей и т.д. Также, заметное влияние на химический состав и накопление действующих веществ в растениях оказывает высота над уровнем моря. Например, для промышленных видов растений, оптимальной высотой произрастания является 1600-2000 метров над уровнем моря. На такой высоте в растениях накапливается максимальное количество алкалоидов, благодаря чему они образуют густые заросли на огромных площадях.

Локальное влияние на состояние растений оказывают **эрозийные и оползневые особенности почв**. Почва регулирует пищевой режим растений, а процессы, разрушающие почвенный покров, значительно сокращают запасы органики в почве, что ухудшает свойства черноземов.

Применение лимитирующих факторов в методиках оценки играет ключевую роль в разработке эффективных подходов к рекультивации территорий, пострадавших от угледобычи. Основываясь на таких параметрах, как флуоресценция растительности, морфометрические характеристики рельефа, влажность и качество почвы, можно с высокой точностью оценивать текущее состояние экосистем. Эти данные, полученные с помощью современных спутниковых систем и дистанционного зондирования, обеспечивают интеграцию информации о состоянии растительного и почвенного покрова в единую систему мониторинга, что позволяет учитывать все возможные факторы деградации.

1. Флуоресценция растительности

Флуоресценция растительности отражает функциональное состояние растений и их способность адаптироваться к изменениям окружающей среды. Этот показатель особенно важен для выявления участков с нарушенной продуктивностью и деградацией растительного покрова. Изучение флуоресценции позволяет оценить уровень стресса растений, связанный с различными экологическими факторами, такими как недостаток влаги или избыток загрязняющих веществ.

2. Морфометрические параметры рельефа

Морфометрические параметры рельефа, такие как уклоны, высота и ориентация склонов, влияют на перераспределение осадков, температуру и освещённость, что, в свою очередь, воздействует на рост и развитие растительного покрова. Учёт этих параметров позволяет оценивать риски эрозии почвы и изменённые условия для растений, что особенно важно в горнодобывающих районах, где рельеф играет ключевую роль в формировании микроклиматических условий.

3. Влажность почвы

Влажность почвы является важнейшим фактором для поддержания здоровья растительного покрова. Спутниковые системы могут фиксировать уровень влажности почвы на больших территориях, что даёт возможность вовремя выявить участки с дефицитом влаги, где высока вероятность снижения продуктивности. Недостаток влаги может привести к гибели растений, в то время как чрезмерное увлажнение способствует развитию болезней.

4. Качество почвы

Качество почвы также определяет её способность поддерживать растительность и биологическую активность. Оценка состояния почв с использованием индексов, таких как индекс деградации почвы или показатели содержания органических веществ, позволяет определить участки, нуждающиеся в восстановительных мероприятиях. Важно учитывать баланс питательных веществ, микроэлементов и органики, которые определяют продуктивность растительности на восстановленных территориях.

Почва представляет собой верхний слой земной коры, который формировался в течение длительного времени под воздействием атмосферы, гидросферы и литосферы. В ней непрерывно происходят процессы синтеза и разрушения органических веществ, а также циркуляция элементов, которые являются важными для экологического баланса. Почва состоит из исходного материала, включая минеральный субстрат и органические элементы, которые находятся в перемешанном состоянии. Разнообразные организмы играют ключевую роль в процессе формирования почвы, способствуя развитию ее свойства плодородия. Биологический круговорот помогает поддерживать плодородие почвы, перемещая химические элементы в системе «почва - растения – почва».

Помимо биологического круговорота, существует и геологический, который включает процессы растворения и переноса питательных элементов из почвы в экосистемы водных объектов, где они оседают. Таким образом, почва постоянно взаимодействует с другими компонентами природы, занимая важное место в круговороте веществ на планете.

Кроме того, почва, взаимодействуя с организмами (растениями, животными, микроорганизмами), формирует сложные экологические системы - биогеоценозы, которые играют ключевую роль в процессе накопления, трансформации и перераспределения солнечной энергии и химических элементов на Земле.

Если изучить поперечное сечение почвы (например, при рытье траншеи), можно выделить отдельные слои разных цветов, которые именуются почвенными горизонтами. Эти горизонты составляют почвенный профиль и представляют собой характеристику почвенной структуры.

Применение дистанционного зондирования Земли в учёте лимитирующих факторов

Дистанционное зондирование Земли является одним из наиболее эффективных методов для мониторинга лимитирующих факторов. С помощью спутниковых данных можно не только отслеживать флуоресценцию растений, но и получать информацию о рельефе, влажности и качестве почв на больших территориях. Это позволяет в режиме реального времени выявлять участки, где условия нарушены, и оперативно принимать решения о необходимых мерах для рекультивации.

Использование ДЗЗ в оценке лимитирующих факторов даёт возможность создавать детализированные карты состояния почвенного покрова и растительности, что облегчает процесс планирования восстановительных мероприятий. Включение этих данных в государственную систему экологического контроля способствует снижению рисков деградации территорий и более эффективному восстановлению экосистем.

Влияние на состояние растительного покрова определяется не только экологическими условиями, но и региональными особенностями территории, которые сочетаются с географической зональностью. Например, наклон склона может влиять на запасы снега и воды в почве, температурные показатели, освещение и поглощение света, что влияет на биологическую активность почв. На экологическое состояние растительного покрова, помимо природно-климатических факторов, значительное влияние оказывают также **факторы антропогенного характера**. К таким факторам относятся различные факторы загрязнения окружающей среды (атмосферы, биосферы и гидросферы, литосферы).

Реакция растительного покрова на различные загрязнения довольно значительна и зависит не только от вида загрязнения, а также от количества, концентрации и времени воздействия негативных веществ. Способность растений к поглощению негативных веществ различна, и в той или иной степени зависит от фазы вегетации, почвенно-климатических характеристик, площади загрязнения и общего состояния экосистемы, в которой происходит весь его жизненный цикл.

В условиях интенсивной разработки полезных ископаемых происходит резкий рост уровня загрязнения окружающей среды, в первую очередь, растительного и почвенного покрова. Интенсивная разработка полезных ископаемых оказывает серьезное воздействие на почвенный покров, приводя к его деградации и нарушению природных функций. В первую очередь это связано с механическим разрушением почвы при добыче, строительстве инфраструктуры и транспортировке полезных ископаемых, а также с загрязнением тяжелыми металлами, углеводородами и другими токсичными веществами, характерными для промышленной деятельности. Эрозионные процессы, активизируемые механическим вмешательством в почвенный покров, приводят к смыванию верхних плодородных слоёв почвы.

Загрязнение почвы нефтепродуктами и продуктами сгорания угля приводит к угнетению биологической активности и нарушению функционирования почвенной биоты. Такие загрязнители могут оказывать токсическое воздействие на микроорганизмы, которые играют ключевую роль в разложении органических веществ и обеспечении растений питательными элементами. В результате этого снижается биоразнообразие почвенной биоты, замедляются процессы самоочищения почвы и восстановление её продуктивности.

Идентификация и устранение ограничивающих факторов, что предполагает оптимизацию условий среды обитания живых организмов, представляет собой важную практическую задачу для улучшения состояния растительного покрова.

Растительность подвергается одновременному воздействию различных экологических факторов, и их влияние взаимозависимо. На силу действия одного фактора влияет сочетание и интенсивность других факторов. Этот принцип известен как **взаимодействие факторов**. К примеру, скорость испарения воды с поверхности листьев (транспирация) возрастает при высоких температурах и ветреной погоде.

В некоторых случаях недостаток одного из факторов может быть компенсирован усилением другого. Это явление называется **эффектом компенсации**. Так, увядание растений можно предотвратить как увеличением влажности почвы, так и снижением температуры, что уменьшит испарение воды. В условиях пустынь недостаток осадков частично компенсируется повышенной влажностью воздуха ночью, а в Арктике длинный световой день летом компенсирует дефицит тепла.

Однако ни один из экологических факторов, необходимых для нормального функционирования биологического организма, не может быть полностью заменен другим. При отсутствии света растительная жизнь становится невозможной, независимо от того, насколько благоприятными могут быть все остальные условия. Следовательно, если значение хотя бы одного из жизненно важных экологических факторов приближается к критической границе или выходит за её пределы (ниже минимума или выше максимума), то, даже при оптимальных значениях остальных условий, организм находится под угрозой гибели. Такие факторы называются **ограничивающими (лимитирующими)**.

В силу сложности процессов, происходящих в экосистемах, важно выделить ключевые факторы, взаимодействие которых оказывает решающее влияние на динамику системы. В большинстве моделей, описывающих рост и развитие популяций или экосистем в целом, используются два основных подхода. Первый, известный как "принцип лимитирующих факторов", был впервые сформулирован немецким агрохимиком Ю. Либихом в 1840 году [*Liebig*, 1841]. Второй подход, названный "законом совокупного действия факторов", был предложен Э. Митчерлихом в 1916 году [*Mitscherlich*, 1909; *Mitscherlich*, 1925]. Изначально оба подхода разрабатывались для описания процессов в популяциях одного вида, однако их применение в дальнейшем расширилось на многообразные экологические сообщества и системы.

«Принцип лимитирующих факторов» основывается на законе минимума Либиха, согласно которому рост растений или продуктивность экосистемы определяется тем элементом, который находится в наименьшей доступности относительно других

необходимых элементов. Это означает, что ограничивающим фактором будет тот элемент, который находится в дефиците. Данный принцип впоследствии стал центральным в объяснении множества процессов в экологических системах, и элемент, находящийся в недостатке, стал называться лимитирующим фактором (см. рис. 3.1). Применение этого закона к фотосинтетической активности впервые было предложено английским физиологом Ф. Блэкманом в 1905 году [Blackman, 1905], а в 1965 году Н.Д. Иерусалимский адаптировал его для объяснения ферментативных процессов [Чернавский и др., 1966].

Стоит отметить, что соотношение факторов может изменяться под воздействием различных внешних условий, что приводит к изменению лимитирующего фактора. Этот динамический аспект "принципа лимитирующих факторов" имеет важное значение для понимания того, как экосистемы реагируют на изменяющиеся условия окружающей среды.

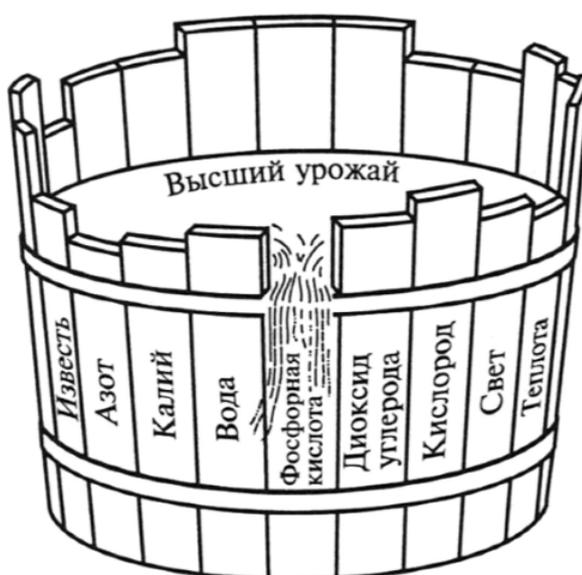


Рисунок 3.1 – Модель закона Либиха – «бочка Либиха». Лимитирующий фактор тут – фосфорная кислота

Таксономия природно-технической системы угольного разреза представляет собой структурированную и классифицированную систему, включающую различные элементы и аспекты, связанные с процессами добычи угля. Она основана на систематическом анализе, охватывающем как естественные факторы, включая геологические особенности и физические параметры угольного пласта, так и технические элементы, такие как инфраструктура и использование специализированного оборудования [Потанов, 2005].

Эта система таксономии учитывает разнообразные аспекты эксплуатационных методов и технологий, а также воздействие на окружающую среду при добыче угля. Кроме того, она уделяет внимание важным управленческим аспектам, таким как распределение

трудовых ресурсов, стратегическое планирование и организацию производственных процессов в угольных разрезах.

Такая таксономия служит важным инструментом, позволяющим систематизировать многообразные факторы и взаимосвязи, связанные с процессом добычи угля, и способствует более глубокому пониманию сложной структуры и динамики угольных разрезов.

Таксономия растительного покрова для масштаба исследований района представляет собой систематическую классификацию растительности, применяемую для исследований и анализа растительного покрова на определенной территории или в определенном районе. Она включает в себя упорядоченное деление растительности на различные категории или типы, которые могут быть использованы для описания и анализа экосистемы данного района [Андреева и др., 2006].

Эта таксономия может включать такие элементы, как виды растений, их экологические характеристики, структуру растительного покрова, взаимодействие между различными видами и их распределение в пространстве. Различные методы классификации используются для организации этой таксономии, включая флористические, фитоценотические или фитогеографические подходы [Полонская, 2002; Burrows, 1990].

Для масштаба исследований района таксономия растительного покрова может быть полезна при анализе биоразнообразия, составлении карт растительности, мониторинге изменений в экосистемах, а также для понимания экологических процессов, происходящих на данной территории.

При изучении пространственного распределения и вегетационной активности растений также должны учитываться элементы рельефа земной поверхности – уклон и экспозиция.

Угол уклона рельефа θ рассчитывается исходя из следующей формулы (рис. 3.2):

$$\tan\theta = \frac{h}{S}, \quad (3.1)$$

где h – высота подъема, м;

S – горизонтальное расстояние, м.

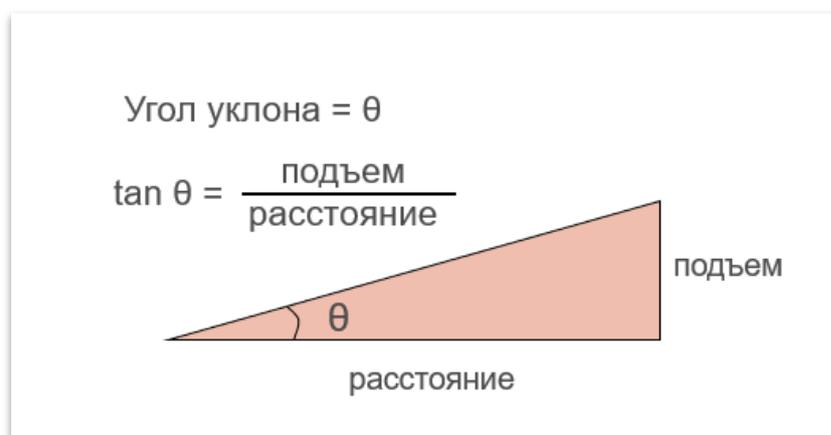


Рисунок 3.2 – Нахождение угла уклона

От степени наклона поверхности земли зависит температура почвы и ближайшего к земле слоя воздуха, глубина снежного покрова, разница между максимальной и минимальной температурой приповерхностного слоя почвы в течение суток, мощность плодородного слоя почвы, активность процессов эрозии. Величина угла наклона земли влияет на быстроту движения воды, причем чем больше наклон, тем быстрее вода стекает вниз, не давая растениям полноценно насытиться влагой. Степень наклона поверхности определяет разнообразие и структуру растительных сообществ: с увеличением угла наклона появляются виды растений, приспособленных к жизни на каменистой почве: кустарники, полукустарнички и травянистые растения. На крутых склонах также более активны процессы эрозии и вымывания плодородных слоев почвы [Ларионов, 1972; Митусов, 2001].

Экспозиция склона указывает направление наиболее крутого наклона в точке поверхности и отсчитывается по часовой стрелке, между направлением на север и проекцией внешней нормали на горизонтальную плоскость в данной точке поверхности [Флоринский, 2016].

Экспозиция склонов играет большую роль в прохождении жизненного цикла растений. На склонах разной экспозиции наблюдаются устойчивые различия в температуре воздуха и почвы, а также степени прогревания почвы. Воздействие различных экспозиций склонов сказывается на составе растительного покрова во всех формах рельефа, при этом разница между растительным покровом иногда сравнима с зональными отличиями территорий. Различия в прогревании почвы на склонах различной экспозиции влияют на распределение температуры воздуха, что в свою очередь отражается на характере растительного покрова, составе флоры, темпах роста и форме растений. От экспозиции склона зависят уровни радиации, зимние накопления снега и скорость ветра, которые влияют на распределение видов растений в горных районах [Соколова, 2016].

Для анализа влияния уклона и экспозиции на вегетационную активность отдельных растений и растительных сообществ в ГИС-системах строят классификационные карты по данным параметрам (рис. 3 и 4).

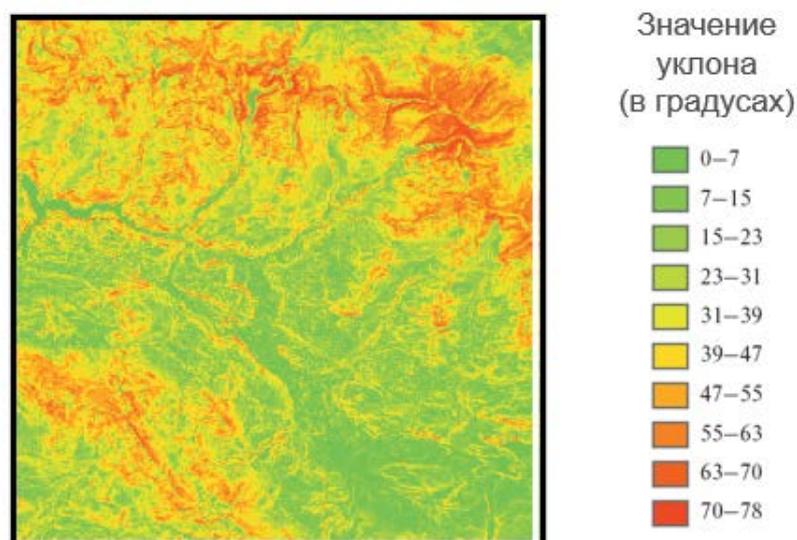


Рисунок 3.3 – Пример космоснимка, классифицированного по значению уклона

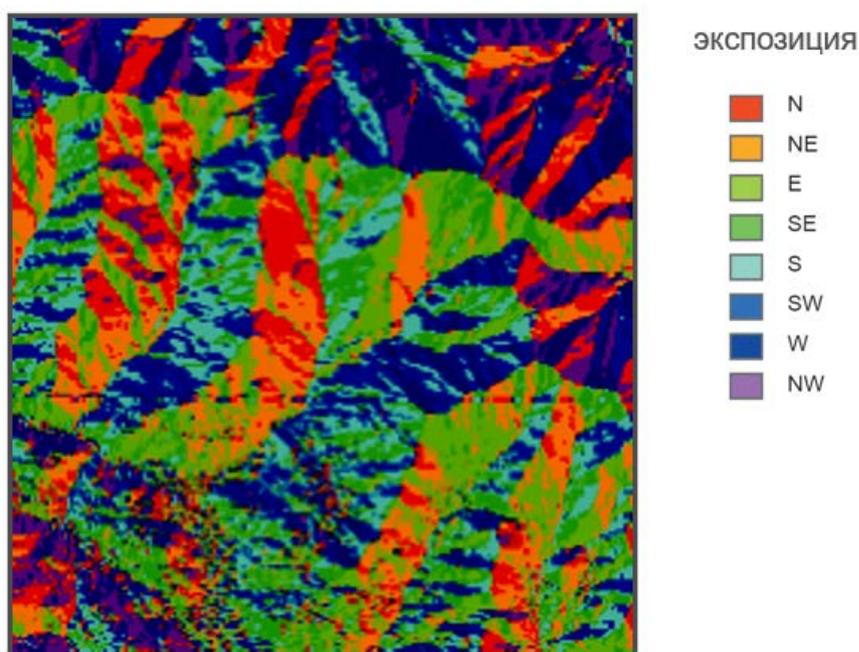


Рисунок 3.4 – Пример космоснимка, классифицированной по значению экспозиции

Важным фактором вегетационной продуктивности растений является наличие влаги в них. Влажность может являться лимитирующим фактором. Недостаток влаги приводит к засухе растения, а ее переизбыток к гниению растений [Битюцкий, 2014]. Распределение влажности на основе данных ДЗЗ можно отразить нормализованным индексом влажности

NDMI (Normalized Difference Moisture Index). NDMI использует диапазоны NIR и SWIR для отображения влажности:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}. \quad (3.2)$$

Диапазон SWIR (коротковолновой инфракрасный) чувствителен к изменению содержания воды в растениях, а также к структуре клеток в растительном покрове, в частности, к мезофиллу. В то же время NIR (ближний инфракрасный) диапазон зависит от внутреннего строения листьев и содержания в них сухого вещества, но не от количества воды [Hunt, 1989]. Сочетание показателей NIR и SWIR позволяет компенсировать искажения, вызванные структурными особенностями листьев и концентрацией сухого вещества, что улучшает точность оценки влажности растительности. Спектральная отражательная способность в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) напрямую зависит от уровня водного содержания в листьях: при снижении влагообеспеченности увеличивается отражение в данном спектральном интервале. В 1996 году [Gao, 1996] была разработана методика применения индекса NDMI, предназначенного для мониторинга изменений влажности растительного покрова. Расчёт данного индекса основан на анализе коэффициентов отражения в ближнем (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах, что позволяет оценивать динамику водного баланса в листьях.

Постоянство происходящих природных и антропогенных процессов приводит к тому, что земли, занятые растительным покровом, лишаются его. В такие процессы может входить смещение участка с растительностью вследствие оползня, вспахивание земли перед посевом, зачистка территории под дальнейшую застройку и др. При этом либо на участке остается обнаженная почва, либо эта почва занимается промышленным объектом.

Для выявления таких изменений, отслеживания их во времени и контроля используют индексы открытой почвы BSI (Bare soil index), первый из которых был предложен в 2004 году [Chen, 2004]. Эти индексы используют видимый, инфракрасный и тепловой диапазоны, комбинации каналов в которых позволяют эффективно выделить почвенный покров на фоне растительности, охарактеризовать почвы по их антропогенному использованию, а также оценить саму растительность по густоте и развитию ее жизненного цикла. В таблице 3.1 приведены некоторые из существующих индексов открытой почвы.

Таблица 3.1 – Почвенные спутниковые индексы

Индекс	Формула	Источник
Bare soil index	$BSI = ((SWIR2+Red)-(NIR+Blue))/((SWIR2+Red)+(NIR+Blue))$	<i>Diek et al., 2017</i>
Bare soil index 1	$BSI1 = ((SWIR1+Red)-(NIR+Blue))/((SWIR1+Red)+(NIR+Blue))$	<i>Chen et al., 2004</i>
Bare soil index 2	$BSI2 = 100*\sqrt{(((SWIR2-Green))/((SWIR2+Green)))}$	<i>Wentzel, 2002</i>
Bare soil index 3	$BSI3 = ((SWIR1+Red)-(NIR+Blue))/((SWIR1+Red)+(NIR+Blue))*100+100$	<i>Jamalabd et al., 2004</i>
Normalized difference soil index 1	$NDSI1 = (SWIR1-NIR)/(SWIR1+NIR)$	<i>Rogers et al., 2004</i>
Normalized difference soil index 2	$NDSI2 = (SWIR1-Green)/(SWIR1+Green)$	<i>Deng et al., 2015</i>
Normalized difference bareness index	$NDBaI = (SWIR1-TIR)/(SWIR1+TIR)$	<i>Zhao et al., 2005</i>
Bareness Index	$BI = (Red+SWIR1-NIR)$	<i>Lin et al., 2005</i>
Enhanced built-Up and bareness index	$EBBI = (SWIR1-NIR)/(10\sqrt{(SWIR1+TIR)})$	<i>As-syakur et al., 2012</i>
Modified normalized difference soil index	$MNDSI = (SWIR2-PAN)/(SWIR2+PAN)$	<i>Piyooosh et al., 2018</i>
Normalized difference bare land index	$NBLI = (Red-TIR)/(Red+TIR)$	<i>Li et al., 2017</i>
Dry bare-soil index	$DBSI = (SWIR1-Green)/(SWIR1+Green)-(NIR-Red)/(NIR+Red)$	<i>Rasul et al., 2018</i>

На рисунке 3.5 приведен пример карты, составленной по индексу открытой почвы BSI.

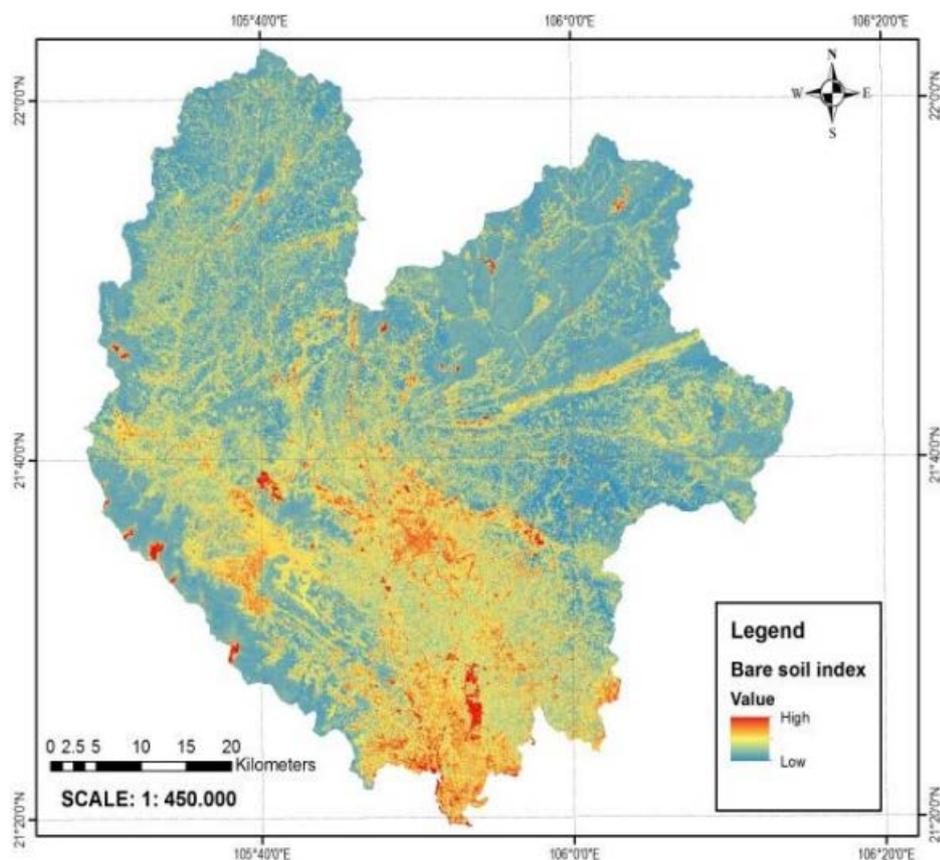


Рисунок 3.5 – Пример карты, классифицированной по индексу BSI [Loi et al., 2017]

3.2 Методика оценки состояния растительного покрова по данным ДЗЗ на основе лимитирующих факторов

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. Как показано в разделе 4.2 – все эти процессы возможно детектировать с помощью данных дистанционного зондирования Земли из космоса на основе изменения флуоресценции растений. Чувствительность спутниковых сенсоров позволяют однозначно сделать это в пределах 5-12% значений от единицы показателя NDVI (характеризующей фотосинтетическую способность 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 (см. обзор в главе 2).

2. Определение лимитирующих факторов растительного покрова в исследуемой области. За них принимается комплекс геоэкологических факторов (см. предыдущий раздел), выраженных в виде феноботанических, почвенных, геоморфологических и геологических индексов и признаков, отражающих некоторое свойство 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 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 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.

В результате расчетов методики получают количественные картографические модели оценки того, как выбранные показатели качества состояния растительного покрова может быть лимитирован местными природными или антропогенными условиями. Такие картографические модели можно использовать для анализа или интерпретации данных в самых разных сценариях геоэкологического моделирования – мониторинга состояния, анализа динамики, анализа возможных сценариев.

Таким образом, можно сказать, что при помощи данных дистанционного зондирования Земли из космоса можно производить оценку состояния растительного покрова на основе лимитирующих факторов растительности. Полученные характеристики позволят дифференцировать растительный покров по степени ограничения (лимитирования) каждого выбранного показателя качества растительного покрова. И таким образом в зависимости от выявленных параметров или показателей качества присваивать каждому пикселю полученного раstra определенный технический класс состояния растительного/почвенного покрова и выполнять дальнейшие

рекультивационные мероприятия, опираясь на известные факторы, лимитирующие вегетационную активность растительного покрова.

3.3 Алгоритм расчетов и программная реализация

Рассмотрим выражения и программное обеспечение, используемые для расчетов.

1. *Определение показателей качества.* 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). В случае наличия густого растительного покрова вокруг месторождения, целесообразно использовать единственный показатель – GNDVI. Подробно формулы расчетов индексов и их физическая интерпретация были приведены в главе 2.

2. *Определение лимитирующих факторов.* В качестве лимитирующих факторов используются показатели, 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 почвы (насыщенности ее гумусом, определяется индексами из таблицы 3.1).

3. *Приведение показателей качества и лимитирующих факторов к единой шкале измерений.* Приведение показателей качества и 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 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 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 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 $Qual_{norm}$.

3й этап – вычисление интегрального показателя толерантности экосистемы. 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 толерантности экосистемы по выбранному показателю качества в ячейке раstra, в диапазоне от -1 до 1;

n – количество нормализованных лимитирующих факторов Lim_{norm} ;

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

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

Рассмотрим, в качестве примера процедуру расчета интегрального показателя по лимитирующим факторам яркости почвы (индекс NDBI), влажности (индекс NDMI) и морфометрии (уклон поверхности, Slope) относительно вегетационного индекса NDVI для спутниковых снимков Талдинского месторождения за 2020 год (миссия Landsat-8) (рис. 3.5.). Тогда нормализация первого этапа записывается как:

$$NDVI_{norm} = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

$$NDBI_{norm} = \frac{NDBI - NDBI_{min}}{NDBI_{max} - NDBI_{min}}$$

$$NDMI_{norm} = \frac{NDMI - NDMI_{min}}{NDMI_{max} - NDMI_{min}}$$

$$Slope_{norm} = \frac{Slope - Slope_{min}}{Slope_{max} - Slope_{min}}$$

Нормализованный разностный дифференциальный индекс лимитирующих факторов относительно NDVI (рис. 3.6):

$$NDBI_{limit} = \frac{NDVI_{norm} - NDBI_{norm}}{NDVI_{norm} + NDBI_{norm}}$$

$$NDMI_{limit} = \frac{NDVI_{norm} - NDMI_{norm}}{NDVI_{norm} + NDMI_{norm}}$$

$$Slope_{limit} = \frac{NDVI_{norm} - Slope_{norm}}{NDVI_{norm} + Slope_{norm}}$$

Интегральный показатель толерантности экосистемы относительно NDVI (рис. 3.8):

$$NDVI_{limit} = \frac{NDBI_{limit} + NDMI_{limit} + Slope_{limit}}{3}$$

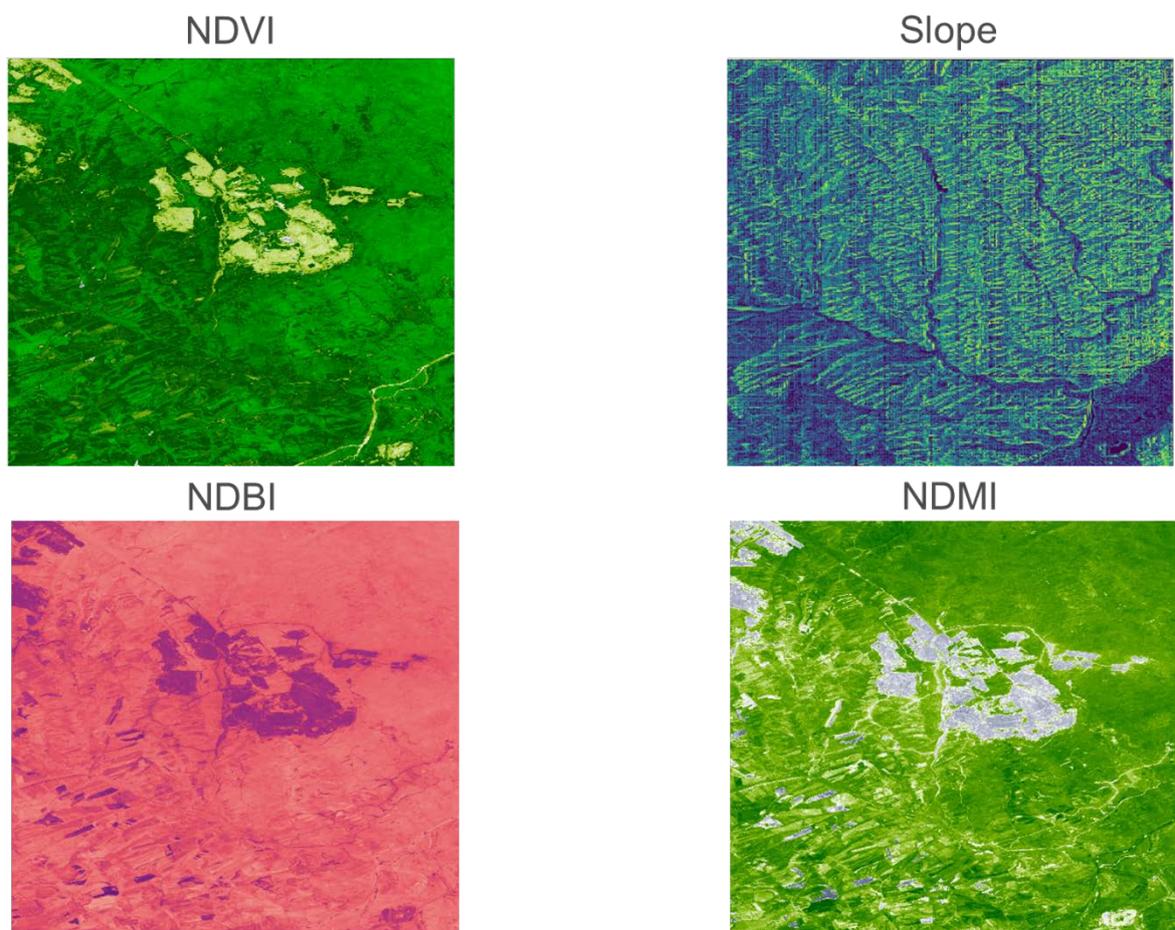


Рисунок 3.6 – Исходные данные для тестового расчета

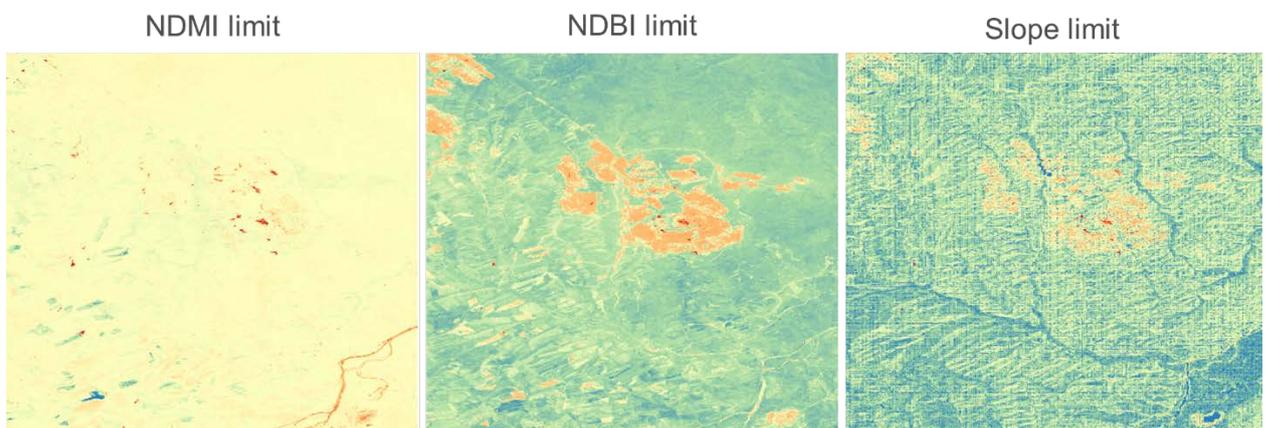


Рисунок 3.7 – Нормализованный разностный дифференциальный индекс лимитирующих факторов относительно NDVI

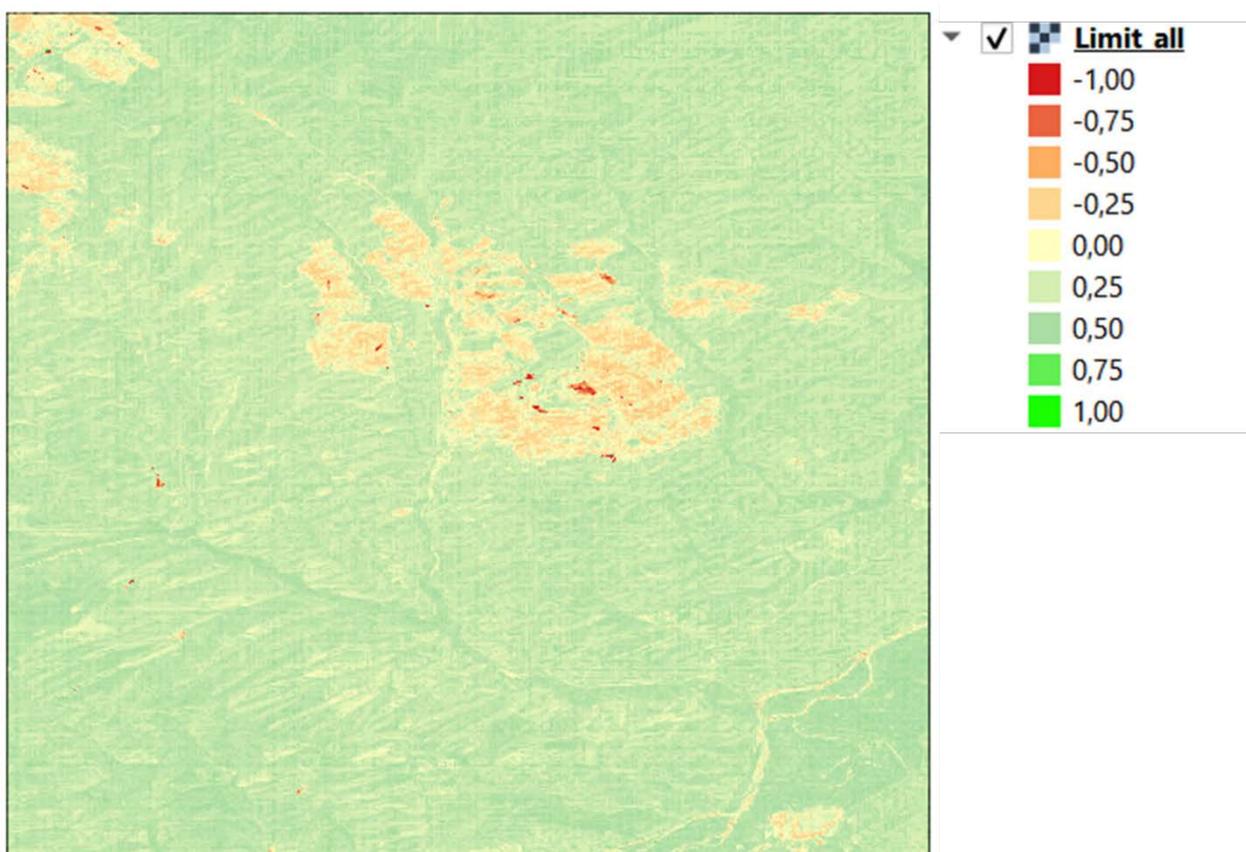


Рисунок 3.8 – Интегральный показатель толерантности экосистемы относительно NDVI.

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

3.4 Выводы по главе 3

Одним из перспективных направлений в контексте ДЗЗ является использование 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 факторы могут быть выявлены на основе спектральных данных, вегетационных индексов и их композитов. Идентификация лимитирующих факторов помогает выяснить, что ограничивает вегетационную активность растительного покрова в районах разработки угольных разрезов. Это позволяет классифицировать растительный покров по степени ограничения, основанной на показателях лимитирующих факторов загрязнения растительного покрова, влажности, рельефа и качества почвы.

На основе биогеохимических процессов в растительном покрове разработана методика, позволяющая оценивать состояние растительности путем выявления лимитирующих факторов с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Определение этих факторов 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 рекультивационные мероприятия, учитывая факторы, которые ограничивают вегетационную активность растительного покрова. Эта дифференциация имеет практическое применение в контексте рекультивации и управления земельными ресурсами.

Методика, основанная на биогеохимических показателях 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.

Использование данных дистанционного зондирования Земли и лимитирующих факторов для оценки качества земель открывает возможности для более точного анализа состояния земельных ресурсов. Такой подход позволяет выявлять ключевые показатели, которые ограничивают продуктивность и устойчивость экосистем, а также способствует разработке более целенаправленных стратегий для их управления. Переход к новым принципам оценки на основе ДЗЗ позволяет проводить мониторинг на площадных территориях, выявляя потенциальные проблемы и тенденции, что улучшает принятие решений в области землепользования и природоохранной деятельности.

4 АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ИНДЕКСУ ЛИМИТИРУЮЩЕГО ФАКТОРА

4.1 Обзор используемых данных спутниковых миссий

Для анализа земной поверхности посредством многозональной космической съемки применяется техника, которая была разработана и совершенствовалась на протяжении последних десятилетий. Уже в 1970-х годах геологические исследования выявили, что использование нескольких спектральных диапазонов одновременно может существенно изменить восприятие изображений. Этот подход стал толчком для создания новых комбинаций спектральных каналов и расширения объема получаемой информации. Такой рост данных привел к необходимости развития и усовершенствования компьютерных методов обработки изображений.

Ключевым преимуществом многозональной съёмки является возможность получения разносторонней тематической информации о земной поверхности за счёт анализа спектральных характеристик отдельных каналов и их сочетаний. Знание этих особенностей позволяет выделять различные объекты, выявлять природные и антропогенные изменения, а также проводить детальную классификацию ландшафтов.

Наиболее известные комбинации спектральных каналов включают следующие:

- Red-Green-Blue (Landsat-4-5: 3-2-1, Landsat-8: 4-3-2, Sentinel-2: 4-3-2) — отображение "естественных" или "натуральных" цветов. Эти изображения позволяют наблюдать земную поверхность так, как ее видит человеческий глаз. Этот метод широко используется для первичного анализа и визуального дешифрирования данных.
- Near infrared-Red-Green (Landsat-4-5: 4-3-2, Landsat-8: 5-4-3, Sentinel-2: 4-8-3) — отображение "искусственных" цветов, при котором поверхности с плотным растительным покровом отображаются красными оттенками, а территории без растительности принимают белые, голубые и коричневые тона. Этот метод позволяет глубже анализировать характеристики растительности [Hunt et al., 1989].

В таблице 3.1 приведены наиболее распространенные комбинации каналов для различных спутниковых миссий, с указанием их возможных применений [Живичин и др., 1980; Шовенгердт, 2010].

Таблица 4.1 – Комбинации каналов Landsat-7,8 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data Raw Scenes

Каналы Sentinel-2 MSI, Lev-2A	Каналы Landsat-7 OLI	Каналы Landsat-8 OLI	Описание комбинации
4-3-2	3-2-1	4-3-2	Естественные цвета. Отображает объекты земной поверхности в спектре, близком к человеческому восприятию. Применяется для базового визуального анализа.
8-4-3	4-3-2	5-4-3	Ложные цвета. Инфракрасная визуализация, при которой растительность отображается в красных тонах, используется для анализа биомассы и здоровья растительного покрова.
8-11-4	4-5-3	5-6-4	Подчеркивает различия в увлажнённости почв, состоянии растительности и гидрологических объектах. Применяется для экологического мониторинга.
8-11-2	4-5-1	5-6-2	Четко выделяет растительность и водные объекты. Полезно для картографирования гидросетей и оценки растительного покрова.
11-8-4	5-4-3	6-5-4	Оптимизирована для детального анализа лесных экосистем, мониторинга их состояния и выявления изменений в структуре лесного покрова.
11-8-3	5-4-2	6-5-3	Псевдоцвет. Используется для визуализации различных типов поверхности и комплексного анализа экосистем.

11-8-2	5-4-1	6-5-2	Применяется для оценки состояния растительного покрова, анализа его продуктивности и устойчивости.
11-4-2	5-3-1	6-4-2	Используется для анализа рельефа и геоморфологических особенностей, что важно для изучения эрозионных процессов.
12-8-3	7-4-2	7-5-3	Подходит для изучения аридных ландшафтов и пустынь, а также для идентификации типов горных пород.
12-4-11	7-3-5	7-4-6	Оптимальна для анализа атмосферных условий, включая задымленность и аэрозольные загрязнения.

В настоящее время собрано значительное количество данных дистанционного зондирования Земли, охватывающее как мультиспектральные, так и гиперспектральные изображения, которые были получены преимущественно с помощью иностранных космических систем. Эти данные хранятся в многочисленных архивах и базах данных, доступных для специалистов как для научных целей, так и для решения практических задач [Gorelick *et al.*, 2017; Habibie *et al.*, 2024]. Для задач природопользования, в частности мониторинга растительности, широко используются спутниковые миссии, такие как MODIS, Sentinel, Landsat и другие [Шукилович *и др.*, 2016; Али *и др.*, 2020; Станкевич *и др.*, 2014; Mushkin *et al.*, 2020].

Спутниковая программа Landsat охватывает восемь космических аппаратов, начиная с запуска Landsat-1 в 1972 году и завершая Landsat-8, который вышел на орбиту в 2013 году. На протяжении более 40 лет (см. рис. 4.1) эта система обеспечивает непрерывное поступление данных, что делает её одной из самых долгосрочных миссий по дистанционному зондированию Земли. Полученные изображения используются в широком спектре задач — от научных исследований и экологического мониторинга до геологоразведки и оценки изменений ландшафтов.

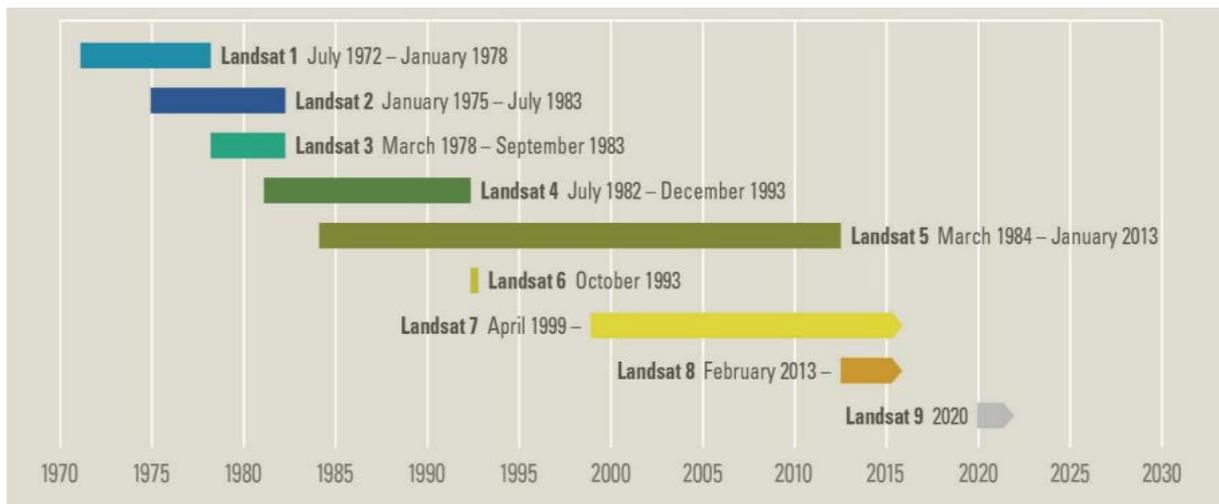


Рисунок 4.1 – Семейство спутников программы Landsat

Спутниковые системы съёмки Landsat представляют собой высокоточные сканирующие устройства, функционирующие на солнечно-синхронной орбите с интервалом обновления данных в 16–18 дней. Первые аппараты серии Landsat были оснащены системой Multispectral Scanner (MSS), обеспечивающей многозональную съёмку в четырёх спектральных диапазонах с пространственным разрешением 60 метров. С запуском Landsat-4 и Landsat-5 на смену MSS пришёл более совершенный сенсор Thematic Mapper (TM), работающий в семи спектральных каналах с разрешением 30 метров и дополнительным тепловым каналом с разрешением 120 метров. Новейшие спутники, включая Landsat-8, оборудованы двумя усовершенствованными сенсорами — Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Они обеспечивают съёмку в 11 спектральных диапазонах с разрешением от 15 до 100 метров, позволяя получать как многозональные изображения, так и панхроматические снимки [Young et al., 2017].

Новейшее поколение спутников (Landsat-8) оборудовано двумя высокотехнологичными сенсорами: Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS), которые ведут съёмку в 11 спектральных диапазонах с разрешением от 15 до 100 метров. Этот спутник способен предоставлять как многозональные изображения, так и панхроматические снимки [Young et al., 2017].

Продукция Landsat доступна для свободного использования на официальных сайтах NASA и Геологической службы США через портал USGS EarthExplorer (см. рис. 4.2) [Nioti et al., 2011]. Съёмка в рамках миссии Landsat-8 выполняется в спектральных каналах, описанных в таблице 4.2.

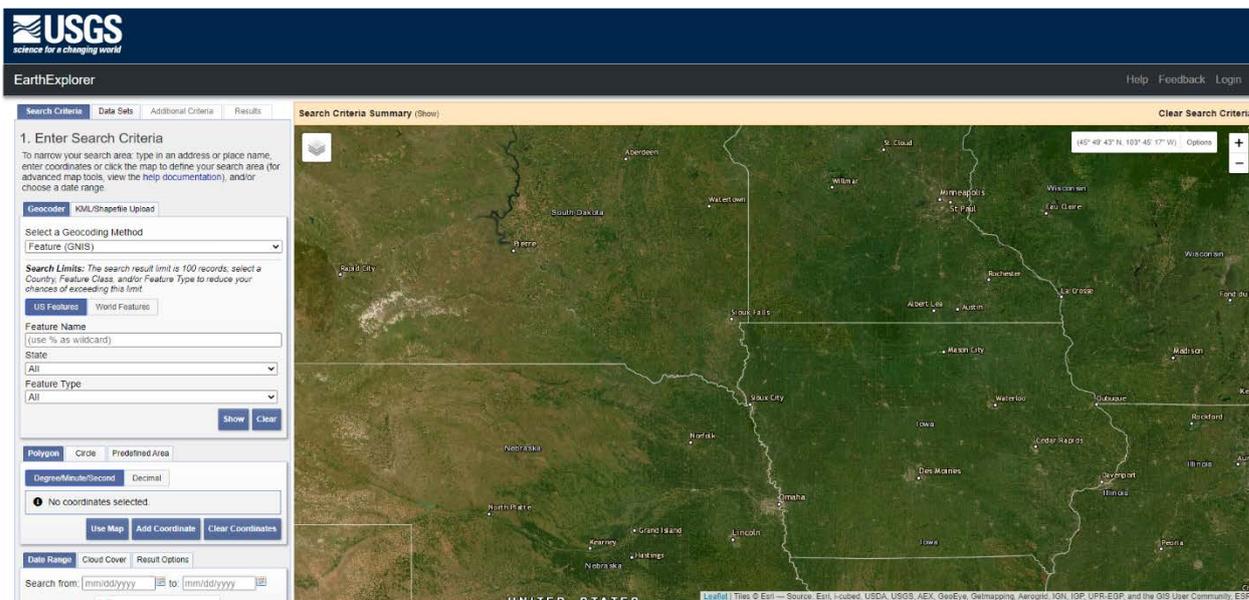


Рисунок 4.2 – USGS Earth Explorer

Таблица 4.2 – Каналы снимка Landsat-8

Имя канала	Описание	Максимальное разрешение	Волновой диапазон
B1	Coastal aerosol	30 м	0,43–0,45 мкм
B2	Blue	30 м	0,45–0,51 мкм
B3	Green	30 м	0,53–0,59 мкм
B4	Red	30 м	0,64–0,67 мкм
B5	Near infrared	30 м	0,85–0,88 мкм
B6	Shortwave infrared 1	30 м	1,57–1,65 мкм
B7	Shortwave infrared 2	30 м	2,11–2,29 мкм
B8	Panchromatic	15 м	0,52–0,90 мкм
B9	Cirrus	30 м	1,36–1,38 мкм
B10	Thermal infrared 1	30 м	10,60–11,19 мкм
B11	Thermal infrared 2	30 м	11,50–12,51 мкм

Европейское космическое агентство (ESA) разработало серию спутников Sentinel, созданных для оперативного обеспечения данными в рамках программы Copernicus. Каждая миссия Sentinel включает несколько спутников, работающих в координации для обеспечения широкого охвата территории и формирования надёжных массивов информации, необходимых для выполнения задач программы.

В арсенале спутников используются такие технологии, как радарные системы и многоспектральные устройства для формирования изображений, что позволяет мониторить сушу, океаны и атмосферные процессы [Али и др., 2020; Bendini et al., 2024].

1. Sentinel-1 – это радарный спутник, функционирующий на полярной орбите и обеспечивающий мониторинг земной поверхности вне зависимости от погодных условий и времени суток. Он используется для сбора данных, необходимых для работы наземных и океанических служб. Запуск Sentinel-1A состоялся 3 апреля 2014 года, а Sentinel-1B был выведен на орбиту 25 апреля 2016 года. Оба аппарата были запущены с космодрома во Французской Гвиане с помощью ракеты-носителя «Союз». Миссия Sentinel-1B завершилась в 2022 году, и в настоящее время планируется запуск нового спутника Sentinel-1C.
2. Sentinel-2 также используется для предоставления данных экстренным службам, обеспечивая поддержку в ситуациях, требующих оперативного реагирования. Запуск Sentinel-2A состоялся 23 июня 2015 года, а Sentinel-2B был выведен на орбиту 7 марта 2017 года.
3. Sentinel-3 представляет собой многофункциональную миссию, направленную на высокоточное измерение топографии поверхности океана, температуры вод и суши, а также их цветовых характеристик. Полученные данные используются для прогнозирования океанических процессов, наблюдения за состоянием окружающей среды и анализа климатических изменений. Запуск Sentinel-3A состоялся 16 февраля 2016 года, а Sentinel-3B был выведен на орбиту 25 апреля 2018 года.
4. Sentinel-4 — это специализированная аппаратура для наблюдения за состоянием атмосферы, предназначенная для интеграции на спутники третьего поколения серии Meteosat (MTG-S), функционирующие на геостационарной орбите.
5. Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) является предшественником спутников Sentinel-5 и предназначен для мониторинга концентраций следовых газов и аэрозолей, оказывающих влияние на качество воздуха и климатические процессы. Эта миссия восполняет пробел в данных, возникший после завершения работы спутника Envisat, и обеспечивает их непрерывность до запуска Sentinel-5. Выведение Sentinel-5P на орбиту состоялось 13 октября 2017 года с космодрома Плесецк с использованием ракеты-носителя «Рокот».
6. Sentinel-6 оснащён радарным высотомером, предназначенным для точного измерения уровня морской поверхности в глобальном масштабе, что имеет ключевое значение для оперативного мониторинга океанов и климатических

исследований. Первый спутник этой серии был запущен 21 ноября 2020 года с базы Ванденберг в Калифорнии с помощью ракеты-носителя SpaceX Falcon 9.

7.

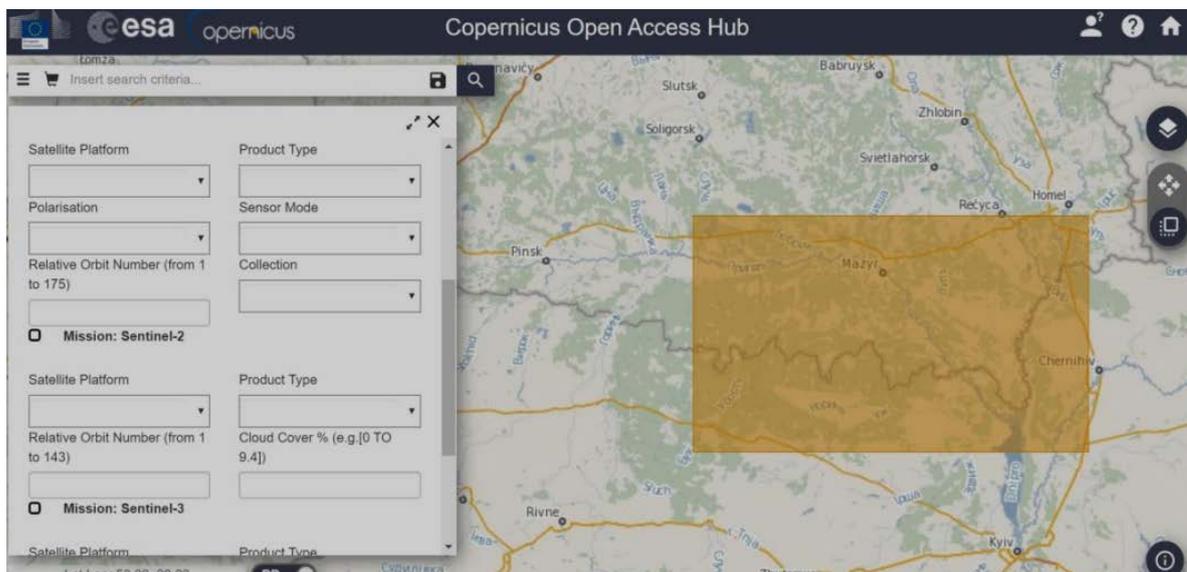


Рисунок 4.3 – Copernicus Open Access Hub

Для дальнейшего развития программы Copernicus в будущем планируется создание шести миссий под названием Sentinel Expansion. Эти миссии направлены на решение задач, поставленных политикой Европейского Союза, и устранение существующих недостатков в потребностях пользователей программы «Copernicus». Кроме того, они призваны расширить возможности космического сегмента этой программы [Gerhards et al., 2019]. Доступ к данным Sentinel осуществляется через Copernicus Open Access Hub, где они находятся в открытом доступе. Визуальное представление Copernicus Open Access Hub можно увидеть на рисунке 4.3.

Запущенный в 2000 году, международный научно-исследовательский спутник Terra (EOS AM-1), находящийся под управлением NASA, оснащён пятью специализированными сенсорами, предназначенными для комплексного мониторинга земной поверхности и атмосферы. Среди них ASTER — прибор японской разработки, осуществляющий многоспектральную съёмку в 15 диапазонах, CERES — радиометрическая система, созданная NASA, MISR — комплекс из девяти цифровых камер, фиксирующих отражённый свет под разными углами, MODIS — гиперспектральный инструмент, охватывающий 36 диапазонов, а также MOPITT, разработанный Канадским космическим агентством и используемый для анализа загрязнения атмосферы [Vermote et al., 2021].

Спутниковая миссия MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), входящая в программу NASA Earth Observing System, направлена на комплексное

исследование атмосферы, гидросферы и земной поверхности [Gitelson *et al.*, 1996]. За каждую из сфер отвечают отдельные спутники: Terra, Aqua и Aura. MODIS — это гиперспектральная система, оснащённая двумя сканирующими спектрометрами, один из которых направлен вертикально (надирное сканирование), а другой фиксирует данные под углом. Данная система охватывает 36 спектральных диапазонов и использует пассивные сенсоры с радиометрическим разрешением 12 бит. Она позволяет проводить съёмку в видимом и инфракрасных спектрах с пространственным разрешением, варьирующимся от 250 до 1000 метров. Повторный цикл наблюдений осуществляется с интервалом в сутки.

Для геологических исследований особенно востребованы различные наборы данных MODIS. Среди них: MOD09 — информация об отражательной способности земной поверхности с разрешением 250, 500 и 1000 метров, агрегированная в 8-дневные композиты; MOD10 — данные о снежном покрове с пространственным разрешением 500 метров, обновляемые каждые 8 дней; MOD11 — показатели температуры поверхности земли с разрешением 1 и 6 километров, также представленные в 8-дневных композитах; MOD13 — индексы растительности с разрешением 250, 500 и 1000 метров, агрегированные за 16 дней; MOD14 — информация о термальных аномалиях с разрешением 1 километр, обновляемая ежедневно; MOD21 — температурные данные поверхности земли с пространственным разрешением 1 километр, рассчитанные в 8-дневном формате; MOD29 — сведения о морских льдах с разрешением 1 километр, представленные в 4- и 8-дневных композитах; MCD19 — данные об оптической плотности аэрозолей с разрешением 0,5, 1 и 10 километров, включающие как 8-дневные композиты, так и ежедневные обновления.

Миссия MODIS решает множество задач мониторинга Земли, включая исследования облачности и загрязнений атмосферы, мониторинг аэрозольных частиц, температурного режима водных объектов и суши, а также динамики фитопланктона в океанах. Дополнительно, MODIS используется для выявления очагов лесных пожаров, наблюдения за ледниками и криолитозоной, мониторинга земельных ресурсов и оценки последствий природных и техногенных катастроф [Пчельников *и др.*, 2017; Шукилович *и др.*, 2016; Kaufman *et al.*, 1992].

Продукты MODIS скачиваются с сайтов NASA и сайта геологической службы США (рис. 4.4), а описание каналов снимка с 8 по 16 представлено в таблице 4.3.

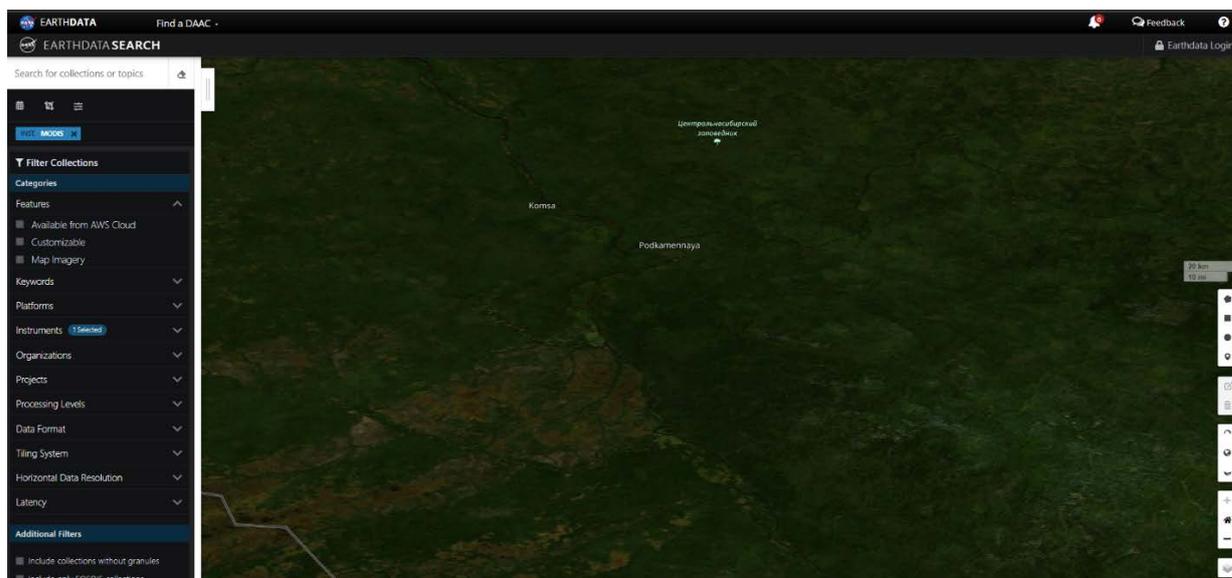


Рисунок 4.4 – EarthDataSearch (NASA)

Таблица 4.3 – Каналы снимка MODIS

Имя канала	Описание	Разрешение	Волновой диапазон
sur_refl_b08	MODIS band 8 surface reflectance	1000 м	405–420 нм
sur_refl_b09	MODIS band 9 surface reflectance	1000 м	438–448 нм
sur_refl_b10	MODIS band 10 surface reflectance	1000 м	483–493 нм
sur_refl_b11	MODIS band 11 surface reflectance	1000 м	526–536 нм
sur_refl_b12	MODIS band 12 surface reflectance	1000 м	546–556 нм
sur_refl_b13	MODIS band 13 surface reflectance	1000 м	662–672 нм
sur_refl_b14	MODIS band 14 surface reflectance	1000 м	673–683 нм
sur_refl_b15	MODIS band 15 surface reflectance	1000 м	743–753 нм
sur_refl_b16	MODIS band 16 surface reflectance	1000 м	862–877 нм

Несмотря на обширный объём данных ДЗЗ и разнообразие спутниковых миссий, обладающих различными длинами волн, для анализа состояния растительности на территориях разработки угольных месторождений наибольший потенциал имеет спутниковая миссия Landsat. Её данные охватывают длительный временной период, начиная с 1985 года, что делает её особенно ценной для проведения динамического анализа изменений.

Landsat предлагает разрешение до 30 метров на пиксель, что позволяет сбалансировать требования к мощности вычислительных систем и детализации района для исследования состояния растительного покрова.

Одним из ключевых факторов в пользу выбора данных Landsat является их свободный доступ. Эта спутниковая миссия доказала свою ценность в различных областях, предоставляя уникальные изображения, которые активно используются для научных исследований в таких сферах, как сельское хозяйство, картография, геология и лесоводство [Станкевич и др., 2014; Diek et al., 2017; Lin et al., 2005].

4.2 Обоснование метода оценки негативного воздействия угольного разреза на вегетационную активность растительного покрова по данным ДЗЗ из космоса

Талдинское каменноугольное месторождение расположено в центральной части Ерунаковского геолого-экономического района Кузбасса. Площадь участка недропользования составляет 25,62 км². Границы Талдинского месторождения определены в большей степени высокой угленосностью разреза по сравнению с окружающими площадями и геолого-тектонической обособленностью [Лавренов и др., 2018]. Основными объектами рекультивации являются отвалы породы, которые на конец эксплуатации участка открытых горных работ занимают основную площадь [Проект..., 2020].

Филиал Талдинского угольного разреза входит в состав угольной компании «Кузбассразрезуголь» и реализует разработку Талдинского каменноугольного месторождения открытым способом. Участок недр расположен в пределах Новокузнецкого и Прокопьевского административных районов Кемеровской области [Проект..., 2020].

Угленосная толща в границах лицензии сложена осадками грамотеинской и тайлуганской свит кольчугинской серии верхней перми. Осадки грамотеинской и тайлуганской свит перекрываются рыхлыми мел-палеоген-неоген-четвертичными отложениями. Из экзогенных процессов следует отметить осыпи, боковую и донную эрозию, плоскостной смыв [Лавренов и др., 2018]. Значительная часть ландшафта испытывает повышенную пылевую нагрузку от городов юга Кузбасса [Проект..., 2020].

Экологические условия района определяются высокой техногенной промышленной нагрузкой на регион в целом. В округе находятся большое количество других действующих углеразрезов, ряд шахт, обогатительных предприятий и производственных предприятий. В связи с этим в районе наблюдаются высокие значения загрязнения воздуха, воды, а также почвы. Значительное понижение уровня подземных вод привело к осушению почв и деградации растительного покрова района. Естественный ландшафт трансформировался в антропогенный в результате масштабного ведения горных работ. Рельеф нарушен разрезами и отвалами, прилегающие территории испытывают сильное запыление [Доклад..., 2021].

При ведении открытых горных работ основное отрицательное влияние оказывается на земельные ресурсы, воздушный бассейн, поверхностные и подземные воды, растительный и животный мир. Это предопределяет значительную нагрузку на окружающую среду. Категория земель в выбранном объекте – населенные пункты для производственной деятельности. Почвы подвержены многочисленным изменениям в процессе градостроительства и классифицируются как техногенно-трансформированные [Проект..., 2020].

В рамках исследования антропогенного воздействия угольного разреза на прилегающий растительный покров были выбраны участки, находящиеся в одинаковых физико-географических условиях, но в различных условиях антропогенного воздействия (полигоны А, В, С, D на рис. 4.5). Учитывались условия высотного положения и местного рельефа, близости к водным объектам. Так же в каждой паре анализируемых участков выбирались идентичные классы растительного покрова. Низкорослая растительность в полигонах В и С и древесная растительность в полигонах А и D. Таким образом стабилизировались природные факторы продуктивности растений. Для исследования антропогенного фактора полигоны А, В выбирались на наименьшем расстоянии от угольного разреза по направлению розы ветров (т.е. точно подвергающийся воздушному загрязнению и попадающий в радиус депрессионной воронки разреза), полигоны С, D выбирались в наименьшем направлении розы ветров и на расстоянии до 10 км от разреза.

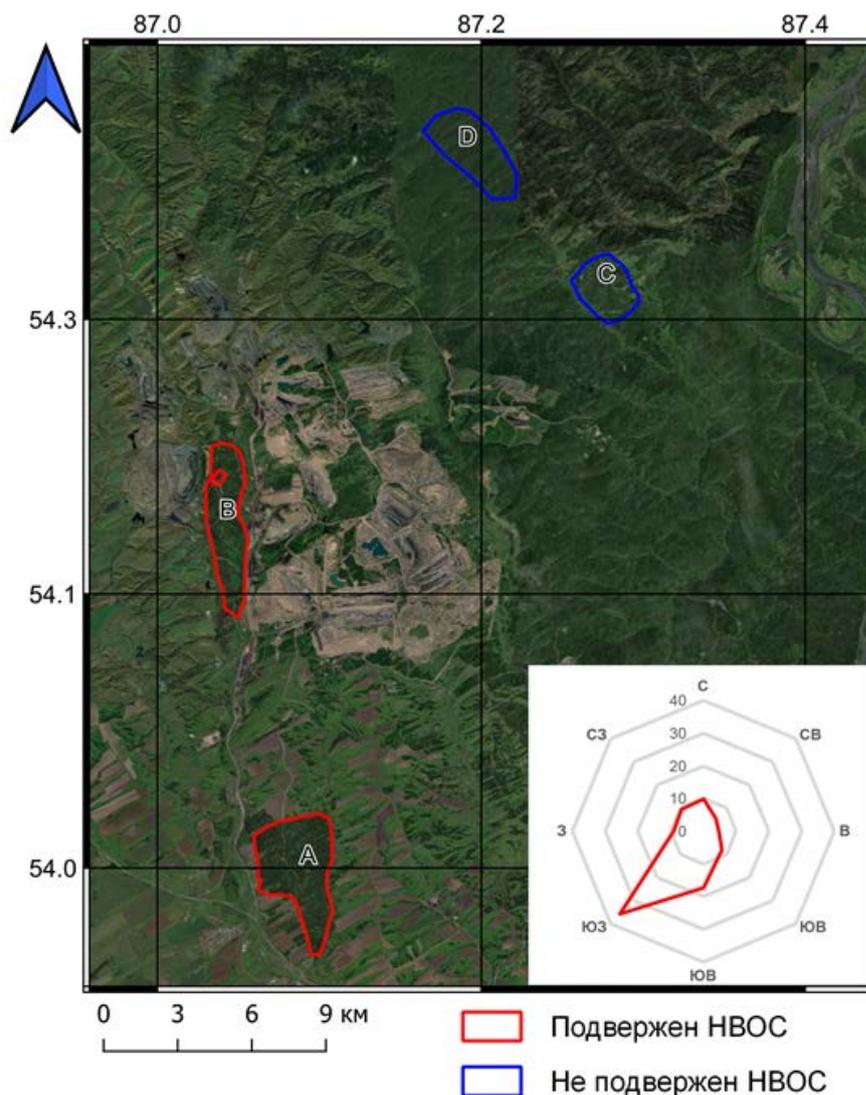


Рисунок 4.5 – Положение тестовых участков потенциально подверженных и не подверженных негативному воздействию Талдинского угольного месторождения

Для количественной оценки антропогенного воздействия угольного разреза были проанализированы временные ряды вегетационного индекса NDVI за период 2010-2021 год для изучаемой территории. Для каждого из тестовых участков А, В, С, D вычислялись суточные значения NDVI на период с мая по сентябрь (время наличия вегетации растений) во временном интервале с 2010 по 2021 годы. Значения вегетационного индекса усреднялись внутри полигона и заносились в ряд данных. Полученные временные ряды очищались от некондиционных данных (снимки высокой облачности). Были использованы спутниковые данные спутниковой миссии MODIS и платформа Google Earth Engine (GEE) [Gorelick *et al.*, 2017].

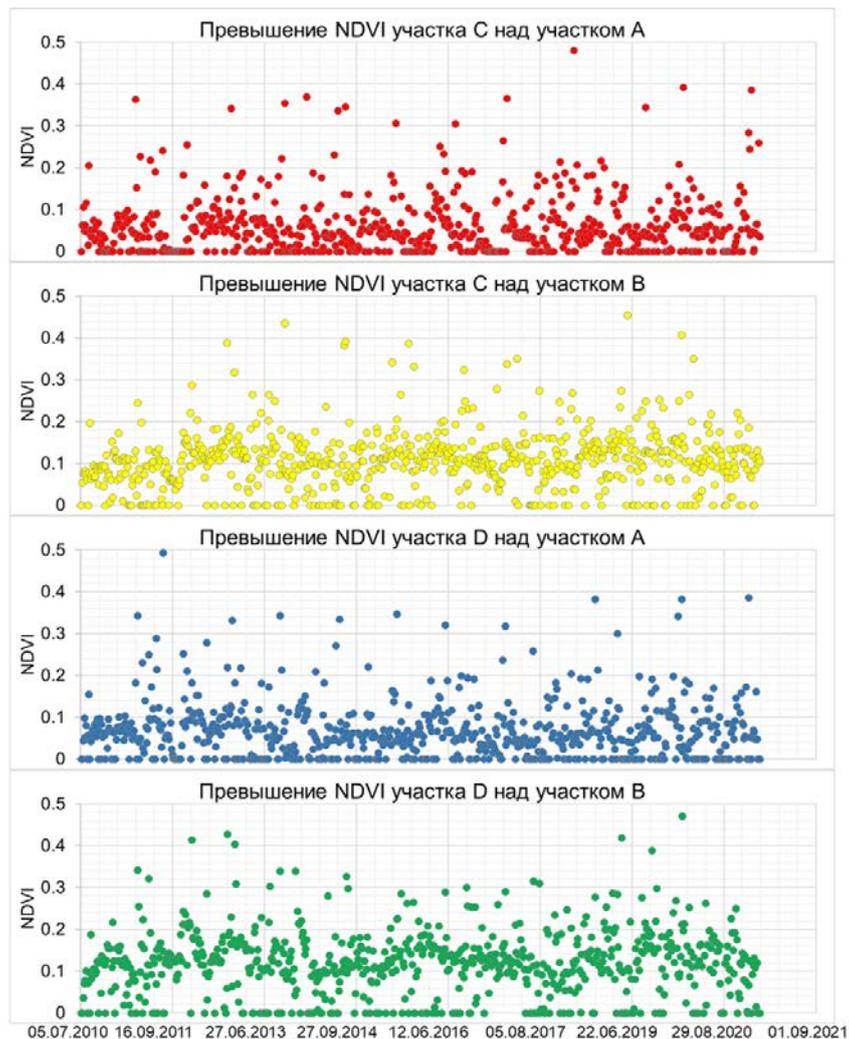


Рисунок 4.6 – Временной ход превышения NDVI участков, потенциально не подверженных негативному воздействию над участками в зоне негативного воздействия угольного разреза

В результате расчетов были получены 4 графика временного хода NDVI для каждого из тестовых участков (рис. 4.6). На рисунке 4.7 представлена линейная аппроксимация полученных наборов данных. Из рисунков видно, что участки, находящиеся под потенциально большим негативным воздействием горных работ (участки А и В) – имеют вегетационную активность ниже. Что, в условиях идентичных природных факторов можно связать с антропогенным воздействием. Полигон А (рис. 4.5) расположен по направлению розы ветров в зоне, удаленной от зоны добычи. На участке прослеживается динамика сезонной изменчивости вегетации и улучшением состояния растительности с течением времени, несмотря на техногенную нагрузку (рис. 4.7). На полигоне В, расположенном в том же направлении, но находящемся в непосредственной близости к разрезу, так же прослеживается сезонная изменчивость, а значение индекса остаётся неизменным (рис. 4.7).

Полигоны С и D расположены в зоне, находящейся над розой ветров, в наиболее удаленной от возделываемой территории местности. Из рисунка 4.6 следует, что вегетация на данных участках сезонно варьируется, а значения индексов возрастают (рис. 4.7). Расположение полигонов относительно угольного разреза определяет ярко выраженную сезонную изменчивость растительного покрова. Вследствие физического и химического выветривания горных пород в окружающую среду попадает большой спектр загрязняющих веществ, образующихся при окислении угля.

Для детальной оценки негативного воздействия угольного разреза на тестовые участки были вычислены суточные разности NDVI участков, условно «не подверженных» негативному воздействию и участков, находящихся в зоне негативного воздействия угольного разреза. Суточные разности определялись как превышения NDVI участков С, D над участками А, В (рис. 4.8). На рисунке представлена линейная аппроксимация полученных наборов данных. Можно видеть, что значения NDVI участков С, D в среднем выше на 0.05-0.12 значений участков А, В. Превышения NDVI участка С над участком А и В на протяжении всего выбранного временного интервала увеличиваются от 0.05 до 0.07 и от 0.09 до 0.12 соответственно (рис. 4.8). Несмотря на положительную динамику NDVI всех трех участков (рис. 4.7), динамика участка С является более высокой. Превышения NDVI участка D над участком А на протяжении всего выбранного временного интервала наоборот снижались от 0.06 до 0.05, а над участком В оставались неизменными в районе 0.11 (рис. 4.8).

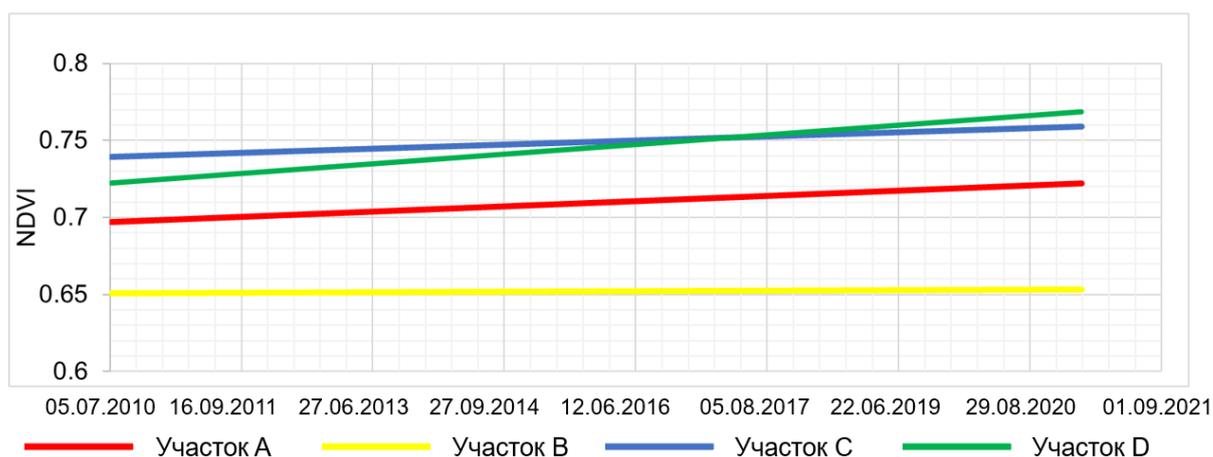


Рисунок 4.7 – Линейная аппроксимация временного хода NDVI тестовых участков

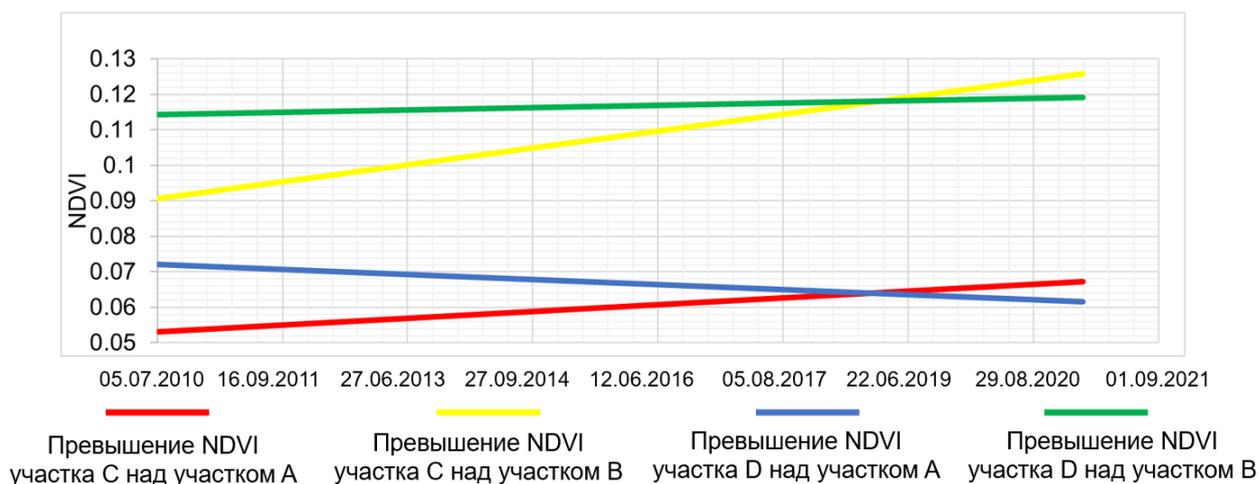


Рисунок 4.8 – Линейная аппроксимация временного хода превышения NDVI участков, потенциально не подверженных негативному воздействию над участками в зоне негативного воздействия угольного разреза

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. Представленные результаты дают основание для следующих выводов:

1. Показано, что на основе использования вегетационного индекса NDVI можно идентифицировать негативное воздействие угольного разреза на окружающую среду. Для рассматриваемого примера Галдинского угольного месторождения снижения индекса NDVI в диапазоне 0.05-0.12 можно связать с антропогенным фактором воздействия на растительный покров.
2. Представленная методика позволяет оценить негативное воздействие угольного разреза на растительный покров, посредством использования вегетационных индексов, рассчитанных на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Представленный подход может быть использован и для других вегетационных индексов. Он позволяет оценить степень антропогенного воздействия угольного разреза на растительный покров для конкретных физико-географических условий.

4.3 Оценка состояния растительного покрова Талдинского угольного месторождения

По предложенной методике (глава 3) выполнена оценка состояния растительного покрова Талдинского угольного разреза за период 2019–2024 гг. в периоды вегетации (с мая по сентябрь). Вычислен интегральный показатель толерантности экосистемы относительно индекса NDVI. В качестве исходных данных отбирались спутниковые снимки Landsat-8 и модель рельефа SRTM. В результате получен набор из 30 картографических моделей (рис. 4.9–4.10). Сезонные изменения показателя позволяют выявить состояние растительного покрова и влияние антропогенной нагрузки на экосистему в целом.

2019 год. В мае показатель толерантности находится на низком уровне, что соответствует периоду ранней вегетации. В июне наблюдается значительное снижение устойчивости (ярко выраженные красные участки), что связано с активной деятельностью в пределах угольного месторождения. В июле и августе ситуация остаётся стабильной, с сохранением зон высокой деградации, особенно в центральной части месторождения. К сентябрю индикаторы толерантности частично восстанавливаются, что может быть связано с окончанием активных горных работ и восстановлением растительного покрова.

2020 год. Сезонная динамика показывает схожую картину. В мае толерантность экосистемы относительно высока, но уже в июне значительная часть территории демонстрирует зоны с критически низкими значениями показателя. Август характеризуется дальнейшим ухудшением, особенно в зонах интенсивной эксплуатации, что подтверждается расширением красных областей. К сентябрю восстановление экосистемы ограничено, что свидетельствует о значительном воздействии на растительный покров.

2021 год. Данные за 2021 год демонстрируют некоторую стабилизацию. В мае и июне площадь зон с низким значением толерантности сокращается по сравнению с предыдущими годами. В июле и августе показатели устойчивости относительно выше, что может быть связано с уменьшением интенсивности горных работ или улучшением природоохранных мер. Однако в сентябре сохраняются участки с пониженной толерантностью, указывающие на необходимость дальнейшего мониторинга.

2022 год. В мае толерантность экосистемы находится на минимальном уровне, что объясняется началом вегетационного периода. В июне и июле заметно ухудшение состояния растительности на большинстве территорий, особенно в зонах активных разработок (выраженные красные участки). В августе сохраняется тенденция к низкой толерантности, но в сентябре наблюдается некоторое восстановление, отражённое в уменьшении красных пятен на карте.

2023 год. В мае показатели остаются крайне низкими, что связано с неблагоприятными условиями восстановления растительности. В июне и июле значительная часть территории демонстрирует низкие значения толерантности, особенно в районах, прилегающих к месторождению. В августе ситуация стабилизируется, но уровень восстановления экосистемы ниже, чем в 2022 году. В сентябре наблюдаются обширные зоны деградации, что может свидетельствовать о продолжающемся воздействии антропогенных факторов.

2024 год. Динамика показателя в 2024 году в целом соответствует предыдущим годам. Май снова характеризуется минимальной толерантностью, июнь и июль демонстрируют активную деградацию растительного покрова. В августе наблюдаются небольшие улучшения, но они незначительны по сравнению с началом периода наблюдений. Сентябрь показывает небольшую тенденцию к восстановлению, однако обширные красные зоны свидетельствуют о сохранении напряжённого состояния экосистемы.

Динамика интегрального показателя толерантности экосистемы относительно индекса NDVI в районе Талдинского угольного месторождения за период 2019–2024 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию деградации растительного покрова в зонах, прилегающих к месторождению. В весенние месяцы наблюдается низкий уровень толерантности, что связано с началом вегетационного периода. Летние месяцы (июнь, июль и август) характеризуются наиболее повышением показателя, однако локально он 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 показателя толерантности в конце сезонов, общее состояние растительности остаётся неудовлетворительным.

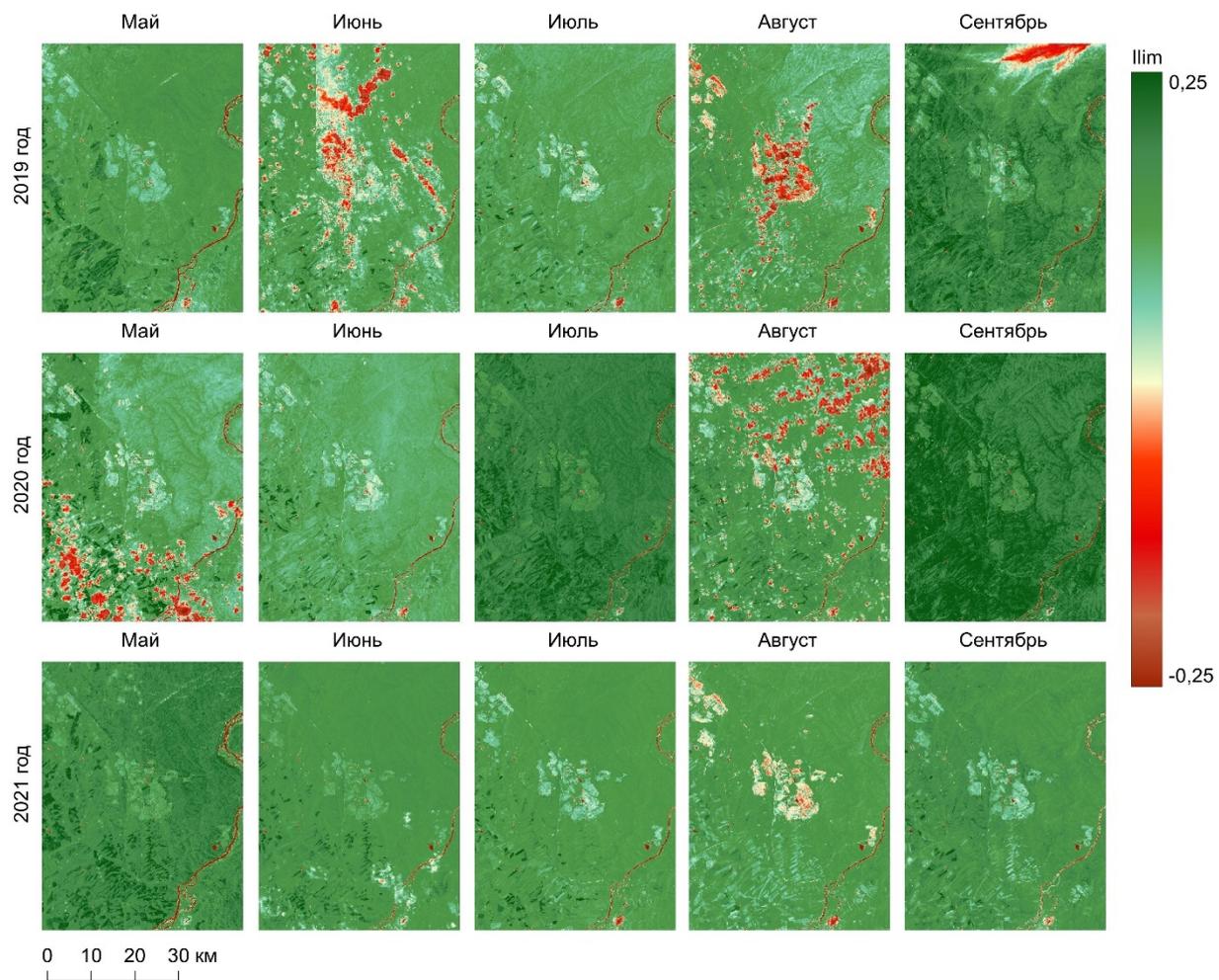


Рисунок 4.9 – Результаты расчетов интегрального показателя толерантности экосистемы относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2019–2021 гг.

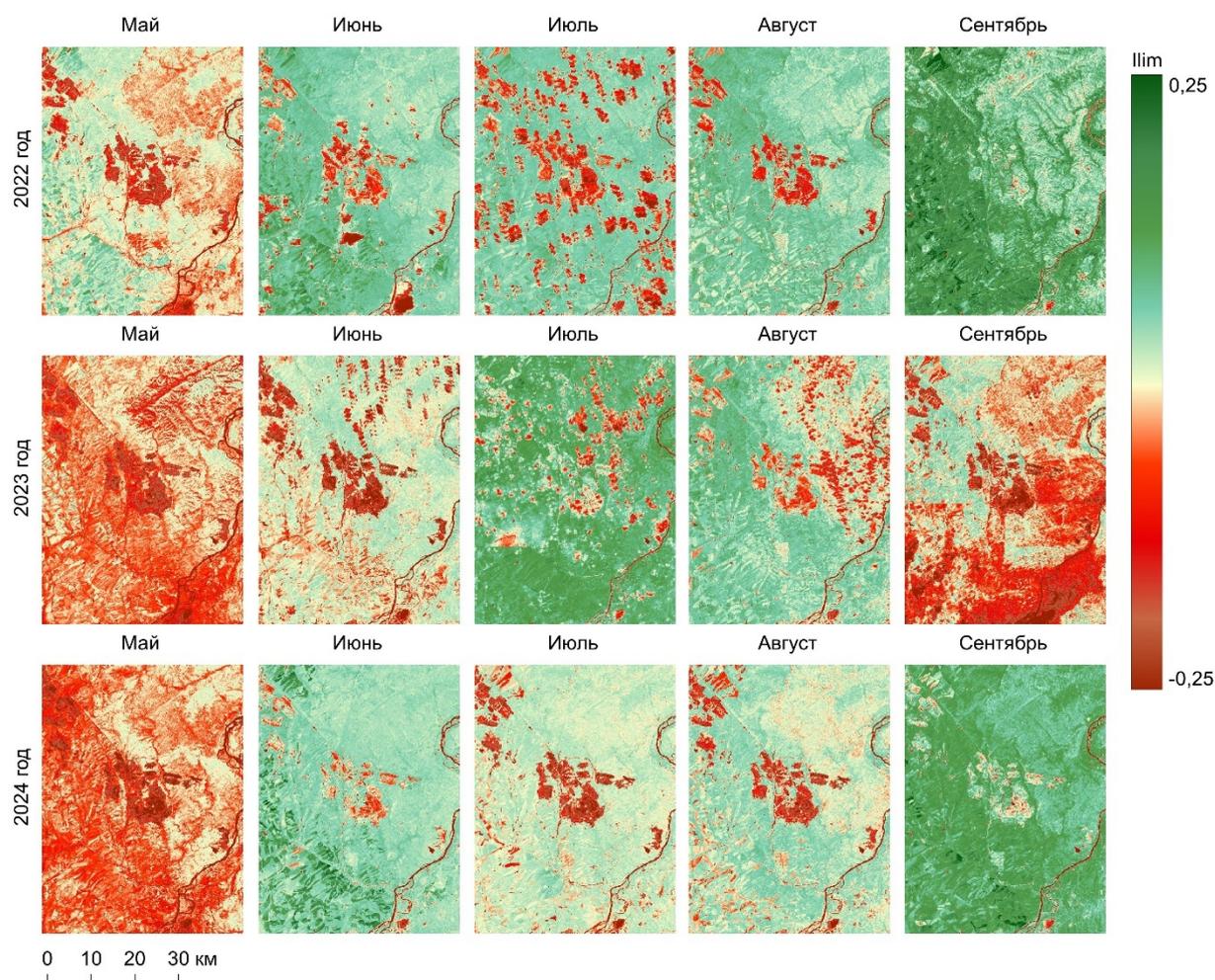


Рисунок 4.10 – Результаты расчетов интегрального показателя толерантности экосистемы относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2022–2024 гг.

При этом не для каждого временного интервала была возможность отобразить безоблачный снимок. Это приводит к наличию артефактов на спутниковых снимках. Характерные модели приведены на рис. 4.11. Они включают в себя модели с высокой облачностью, которые исключались из анализа (рис. 4.11а), модели с низким уровнем вегетации из-за метеорологических условий (характерно для месяцев мая и сентября некоторых лет, рис. 4.11б) и модели без артефактов расчетов (рис. 4.11в).

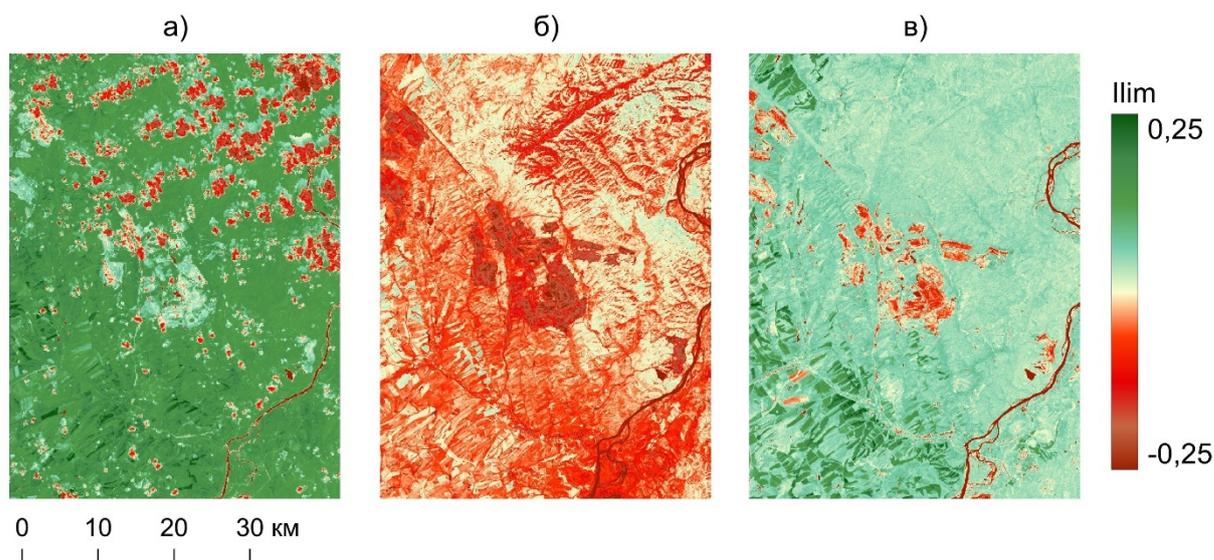


Рисунок 4.11 – Иллюстрация артефактов моделирования. а – модели с высокой облачностью; б – модели с низким уровнем вегетации из-за метеорологических условий; в – модели без артефактов расчетов.

Таким образом часть снимков при детальном изучении территории Талдинского угольного месторождения следует исключить из анализа. Мелкомасштабные модели представлены на рис. 4.12–4.13. Рассмотрим сезонные изменения и динамику растительного покрова, с акцентом на состояние рекультивированных земель и территорий вокруг отвалов.

2019 год. В мае толерантность экосистемы вблизи месторождения находится на удовлетворительном уровне, за исключением отдельных участков с низкими показателями на отвалах. В июне и июле наблюдается рост участков с пониженной толерантностью, что может быть связано с активной разработкой месторождения. В августе ситуация стабилизируется, а в сентябре наблюдается частичное восстановление растительного покрова, особенно на рекультивированных землях.

2020 год. Динамика толерантности в мае и июне аналогична 2019 году, с небольшими ухудшениями на отвалах. В июле и августе площадь зон с низкими показателями увеличивается, что связано с летними погодными условиями и, возможно, активизацией хозяйственной деятельности. Сентябрь характеризуется постепенным восстановлением растительности, особенно на участках, где проводились рекультивационные работы. Отмечаются пропуски в данных, вероятно, из-за облачности.

2021 год. В мае и июне толерантность остаётся на низком уровне в районах отвалов и близлежащих территориях. В июле и августе увеличивается площадь деградированных зон, что, скорее всего, обусловлено не только разработкой месторождения, но и

неблагоприятными погодными условиями. Сентябрь демонстрирует частичное восстановление растительного покрова, особенно на рекультивированных землях, где отмечается стабильное улучшение состояния.

2022 год. В мае и июне толерантность экосистемы значительно снижена, особенно на отвальных участках, что выражено ярко-красными зонами. Июль и август демонстрируют продолжение деградации растительного покрова, особенно в зонах активных разработок. В сентябре видны улучшения в некоторых зонах, что может быть связано с временной стабилизацией погодных условий и завершением ряда работ.

2023 год. Сезонная динамика в 2023 году показывает более критическое состояние экосистемы по сравнению с 2022 годом. В мае и июне почти вся территория вокруг месторождения демонстрирует крайне низкий уровень толерантности. В июле и августе ситуация незначительно стабилизируется, но площади деградированных участков всё ещё велики. В сентябре наблюдается некоторое восстановление на рекультивированных землях, однако это не компенсирует общей деградации растительного покрова.

2024 год. В мае и июне 2024 года толерантность экосистемы остаётся на низком уровне, особенно вблизи отвалов. В июле и августе площадь зон с минимальным значением толерантности несколько уменьшается, что может быть связано с рекультивационными работами. Сентябрь демонстрирует улучшения на отдельных участках, что отражает успешность некоторых мероприятий по восстановлению растительности.

Анализ динамики интегрального показателя толерантности экосистемы относительно NDVI за период 2019–2024 гг. свидетельствует о сложной экологической ситуации в районе Талдинского угольного месторождения. Наибольшие изменения наблюдаются вблизи отвалов и рекультивированных земель, где воздействие хозяйственной деятельности наиболее существенно. 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.

На отвалах растительный покров остаётся в критическом состоянии. В летние месяцы толерантность экосистемы вокруг отвалов значительно снижается, что может быть связано как с воздействием добычи, так и с интенсивным иссушением почвы. Несмотря на проводимые рекультивационные работы, обширные зоны деградации сохраняются,

особенно на участках с активными горными работами. Пропуски данных, вызванные облачностью, вносят некоторую неопределённость в анализ, однако основные тенденции остаются очевидными.

Динамика толерантности экосистемы показывает, что восстановление растительности возможно, но требует контроля соответствующих восстановительных мероприятий. Необходим качественный контроль мероприятий по 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.

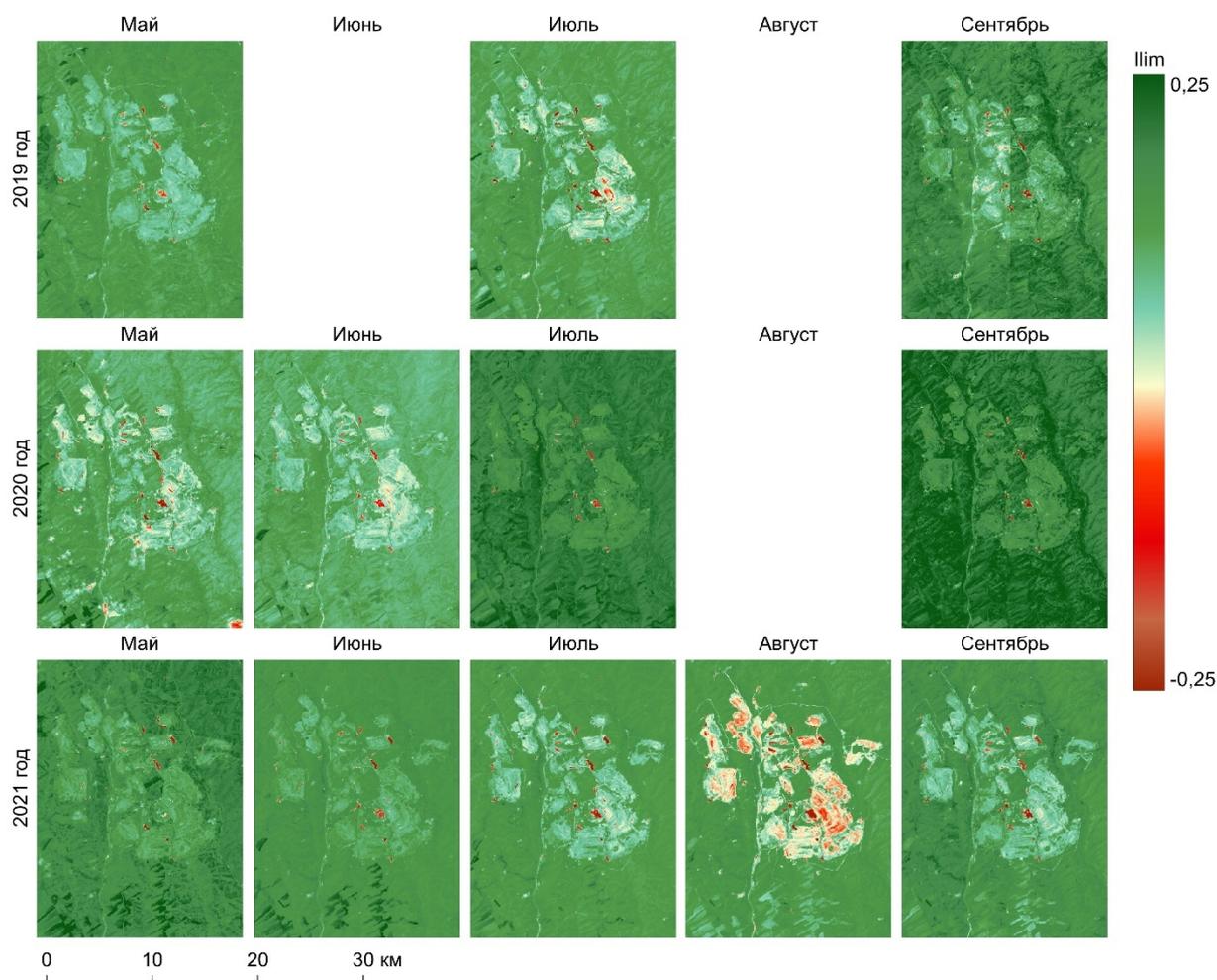


Рисунок 4.12 – Результаты расчетов интегрального показателя толерантности экосистемы относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2019–2021 гг.

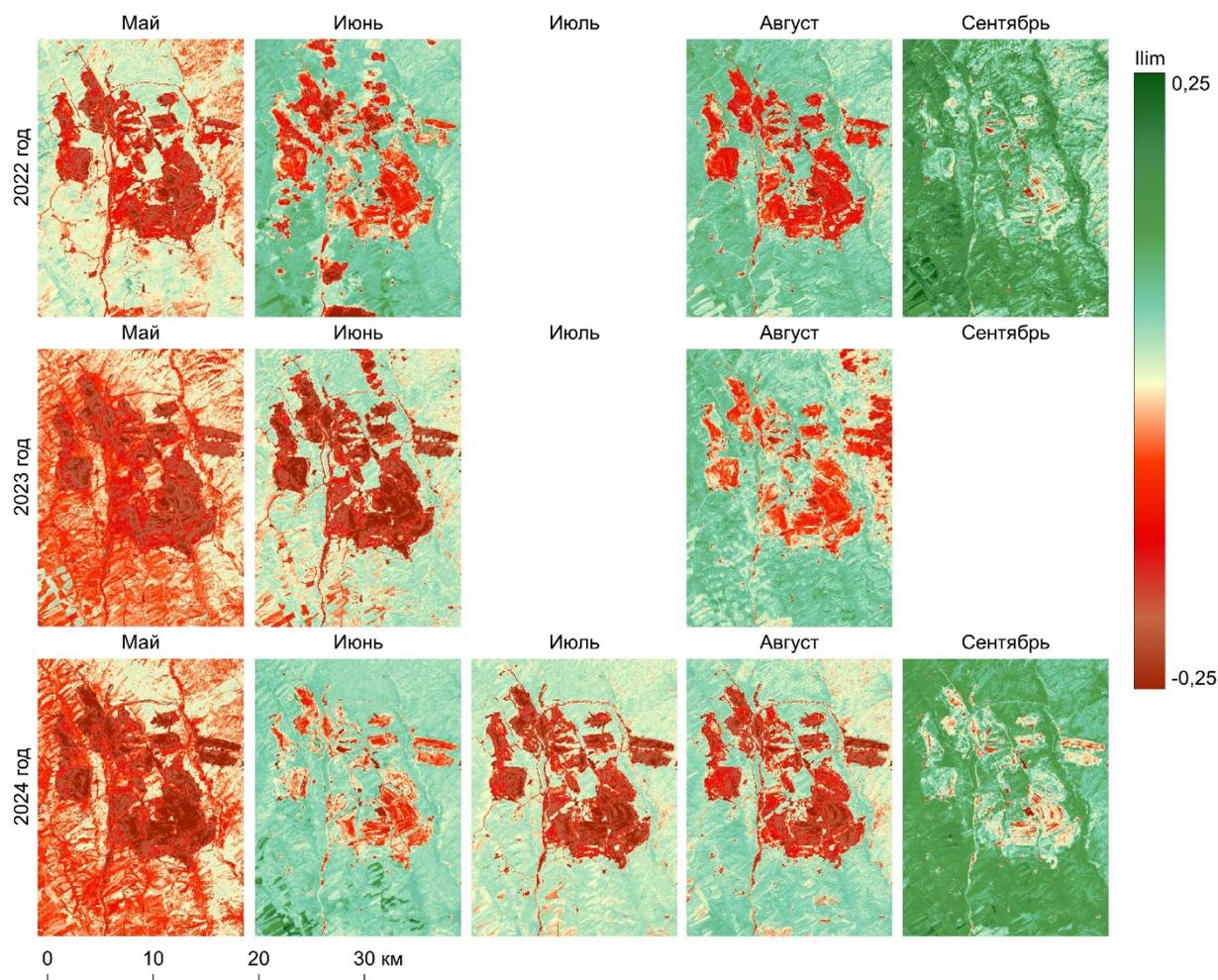


Рисунок 4.13 – Результаты расчетов интегрального показателя толерантности экосистемы относительно индекса NDVI района Талдинского угольного месторождения за период 2022–2024 гг.

4.4 Государственный, общественный и производственный экологический контроль на основе данных ДЗЗ

В последние годы технологии дистанционного зондирования Земли стали неотъемлемым инструментом мониторинга земной поверхности, однако их интеграция в государственный, общественный и производственный экологический контроль по-прежнему недостаточна. Несмотря на значительные успехи в развитии космических технологий и их доступности, использование этих данных в рамках официального контроля за состоянием земель носит ограниченный характер. Несмотря на потенциал ДЗЗ, существующие методики экологической оценки земель, применяемые в России, не интегрированы в полный спектр государственных, производственных и общественных

систем контроля. Это создает проблемы при оценке и прогнозировании экологических рисков, связанных с угольной промышленностью, и может привести к недостаточной эффективности принимаемых мер.

– **Государственный экологический контроль.**

Государственный экологический контроль в России регулируется Федеральным законом № 7 «Об охране окружающей среды». Он направлен на контроль за состоянием экосистем и предупреждение экологических нарушений. Однако на практике использование данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга нарушенных земель, например, в районах угольной добычи, применяются крайне ограниченно. Это связано с недостаточной интеграцией высокотехнологичных методов в государственные процессы мониторинга.

– **Производственный экологический контроль.**

Производственный экологический контроль осуществляется самими предприятиями для соблюдения экологических стандартов. Основная задача этого контроля – регулярный мониторинг состояния окружающей среды на территориях, находящихся под воздействием производства. В текущем процессе производственный контроль зачастую ограничен наземными методами, которые не позволяют полноценно оценивать состояние больших территорий, например, удаленные участки разрезов.

– **Общественный экологический контроль.**

Общественный экологический контроль предполагает участие независимых экспертов, организаций и граждан в мониторинге состояния окружающей среды. Однако доступ к передовым технологиям, таким как ДЗЗ, у общественных организаций ограничен. Тем не менее, существуют открытые платформы, такие как Google Earth Engine, предоставляющие доступ к спутниковым данным, которые могут использоваться для оценки изменений в экосистемах. Эти данные могут помочь выявить нарушения, такие как вырубка лесов или загрязнение водоемов.

Требования к наилучшим доступным технологиям (НДТ) в экологическом мониторинге и контроле диктуют необходимость использования передовых методов, способных быстро и точно предоставлять данные о состоянии окружающей среды. Постановлением правительства Российской Федерации от 3 марта 2021 года № 2044п-П11 был утвержден план действий, известный как "дорожная карта", нацеленный на снижение негативного воздействия угольной промышленности на окружающую среду. Этот план основан на НДТ, которые предполагают применение передовых методов для минимизации выбросов загрязняющих веществ, сокращения энергопотребления и улучшения использования природных ресурсов. В этом контексте методика оценки состояния

растительного покрова по данным ДЗЗ, разработанная на основе лимитирующих факторов, является примером наилучшей доступной технологии, которая может быть внедрена для решения задач мониторинга и контроля.

Современные требования к безопасности и охране окружающей среды при эксплуатации месторождений полезных ископаемых становятся всё более строгими. Это связано с возрастающими рисками, вызванными изменениями климата, такими как ураганы, шквалы, наводнения и паводки, которые могут оказывать разрушительное воздействие на добывающие предприятия. Кроме того, снижается возможность полного покрытия ущерба страховыми компаниями, что требует повышения точности прогнозирования и использования современных технологий мониторинга состояния окружающей среды и объектов промышленности.

Одной из ключевых задач в угольной промышленности является восстановление нарушенных земель, и для решения этой проблемы необходимы эффективные рекомендации по контролю и мониторингу таких участков. Одним из перспективных направлений является применение методов ДЗЗ, которые позволяют оперативно обнаруживать изменения в состоянии растительного покрова на территориях, подвергшихся разработке.

Рекомендуется внедрение следующих мер:

1. Использование облачных платформ для мониторинга восстановления ландшафтов в горнодобывающих регионах. Платформа позволяет работать с данными ДЗЗ, предоставляя возможности как для ретроспективного, так и для оперативного анализа. Интервалы наблюдений с дискретностью 10-15 суток обеспечивают достаточную частоту для отслеживания изменений растительного покрова.

2. Оперативное обнаружение изменений в состоянии растительного покрова. ДЗЗ способны выявлять динамику состояния растительности, включая случаи резкой деградации или восстановления. Это позволяет выявить участки, требующие особого внимания в плане экологического контроля и восстановления. Особенно это актуально для угольных разрезов, где изменения могут быть как резкими, так и постепенными.

3. Включение ДЗЗ в систему государственного и производственного контроля. Государственный контроль, регламентируемый Федеральным законом №7 «Об охране окружающей среды», часто не охватывает все возможности ДЗЗ, что снижает эффективность мониторинга. Внедрение данных ДЗЗ в обязательные требования к экологическим инспекциям поможет повысить точность и частоту наблюдений. Также это позволит обнаруживать экологические нарушения на ранних этапах и сократить риски неполного контроля. Спутниковые данные обладают высокой точностью и регулярностью,

что делает их незаменимыми для оценки состояния растительного покрова и выявления нарушений. Для устранения этих ограничений необходимо пересмотреть нормативно-правовую базу и включить ДЗЗ в обязательные методы при составлении экологических отчетов и проверок. Это значительно повысит оперативность и точность мониторинга, заменив традиционные разовые проверки, которые часто не отражают реального состояния экосистем.

4. Расширение производственного экологического контроля. Использование данных ДЗЗ может значительно повысить уровень контроля за участками, подвергшимися разработке угля. Предприятия, осуществляющие угольную добычу, должны использовать спутниковые данные для более детального отслеживания изменений в почвах, водоемах и растительном покрове. Это позволит своевременно корректировать производственные процессы и минимизировать экологический ущерб. Использование ДЗЗ может значительно расширить возможности производственного контроля. Спутниковые данные дают точное представление о состоянии растительности, почвы и водных объектов, особенно в районах с активной добычей полезных ископаемых. Это позволит выявлять изменения и нарушения на ранних стадиях, оперативно принимая меры для их устранения. Внедрение ДЗЗ обеспечит более точный мониторинг и снизит риски, связанные с недооценкой экологических изменений.

5. Активизация общественного экологического контроля. Независимые эксперты и общественные организации также могут использовать открытые данные ДЗЗ для мониторинга состояния нарушенных земель. Применение доступных платформ, таких как Google Earth Engine, может способствовать прозрачности в вопросах экологии и улучшить участие общества в экологическом контроле. Использование ДЗЗ в общественном контроле позволит общественным организациям и гражданам более эффективно участвовать в экологическом мониторинге, повысит прозрачность процессов и позволит быстрее реагировать на экологические угрозы.

Существенное снижение рисков в угольной промышленности возможно за счет внедрения «умных» решений, включающих автоматизированные системы мониторинга, комплексные информационно-коммуникационные и геоинформационные технологии. Это позволит не только контролировать состояние окружающей среды, но и повысить уровень устойчивости и экологической безопасности горнодобывающих предприятий.

4.5 Выводы по главе 4

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. Применение данных ДЗЗ для мониторинга экологических последствий горнодобывающих работ является обоснованным, поскольку позволяет выявлять и отслеживать даже незначительные изменения в экосистемах. Этот подход обеспечивает способ анализа влияния деятельности угольных разрезов на окружающую среду.

Предложенная методика была применена для анализа района Талдинского месторождения. Полученные результаты подтвердили, что методика способна выявлять ключевые показатели и оценивать влияние угольных разрезов на окружающую среду. Таким образом, данный подход доказал свою эффективность в условиях реального мониторинга.

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. Её реализация позволяет установить связь между классификацией экосистем и нормативными требованиями, что способствует стандартизированному подходу к оценке экологического состояния территорий. Такое соответствие упрощает оценку воздействия промышленной деятельности на окружающую среду и помогает определить, насколько действия предприятий отвечают установленным экологическим стандартам.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов Е.В.* Почвообразование в Посттехногенных экосистемах карьеров на Северо-Западе Русской равнины / Е.В. Абакумов, Э.И. Гагарина. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 2006. – 208 с.
- Абишева М.Т., Хлебникова Е.П.* Комплексное использование данных аэрофотосъемки и наземных измерений при оценке радиационной обстановки водных объектов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – № 1. – С. 68–74. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-68-75.
- Авсеенко А.Д., Медведева И.М., Терехина К.Ф., Рагозин А.А.* Особенности внедрения облачных вычислений в качестве инноваций в организации. // Инновационное развитие науки и образования: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС Наука и Просвещение. – 2023. – С. 55–58.
- Александрова Л.Н.* Органическое вещество почв и процессы его трансформации / Л.Н. Александрова. – Л.: Наука, 1980. – 286 с.
- Али М.С., Воробьев О.Н., Курбанов Э.А.* Алгоритм "дерево решений" для классификации лесов Сирийской Арабской Республики по снимку SENTINEL-2 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2020. – № 1 (45). – С. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5.
- Андреева А.В., Бузников А.А., Тимофеев А.А., Алексеева-Попова Н.В., Беляева А.И.* Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Вып. 3. – Т. 2. – С. 265–270.
- Андронов Е.Е.* Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляции вегетационных процессов / Е.Е. Андронов, Е.А. Иванова, Е.В. Першина, О.В. Орлова, Ю.В. Круглов, А.А. Белимов, И.А. Тихонович // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – № 80. – С. 83–94.
- Артаев О.Н.* Методы полевых экологических исследований: учеб. пособие / О.Н. Артаев, Д.И. Башмаков, О.В. Безина и др. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2014. – 412 с.
- Баширова Ч.Ф.* Индекс NDVI для дистанционного мониторинга растительности // Молодой Ученый. – 2019. – № 269. – С. 30–31. – URL: <https://moluch.ru/archive/269/61895/> (дата обращения: 11.10.2022).

- Белимов А.А., Сафронова В.И.* АЦК-деаминаза и растительно-микробные взаимодействия // Сельскохозяйственная биология. – 2011. – № 3. – С. 23–28. DOI: 10.19047/0136-1694-2015-80-83-94.
- Белоусов А.О., Уварова Е.Л.* Геоинформационные технологии в землеустройстве // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – 2021. – С. 124–127.
- Битюцкий Н.П.* Минеральное питание растений: учебник. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2014. – 540 с.
- Бобылев С.Н., Порфирьев Б.Н.* Устойчивое развитие крупнейших городов и мегаполисов: фактор экосистемных услуг // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. – 2016. – № 6. – С. 3–21. DOI: 10.38050/01300105201661.
- Бузников А.А., Тимофеев А.А.* Региональный экологический мониторинг: метод и аппаратно-программный комплекс для дистанционной оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжёлыми металлами // Региональная экология. – 2010. – № 3 (29). – С. 9–17.
- Вахромеев Г.С.* Экологическая геофизика: учеб. пособие для вузов / Г.С. Вахромеев. – Иркутск : Изд-во ИрГГУ, 1995. – 216 с.
- Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю., Загорский В.Е., Макагон В.М.* Геофизические и геохимические методы поисков редкометалльных пегматитов. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. – 121 с.
- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
- Волошин В.И.* От оценки состояния природной среды методами дистанционного зондирования Земли к обеспечению устойчивого развития общества / В.И. Волошин, Е.И. Бушуев, А.Г. Шапарь, Н.А. Емец и др. // Космические науки и технологии. – 2006. – Т. 12. – № 2/3. – С. 70–78.
- Выгодская Н.Н., Горшкова Р.И.* Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. – 250 с.
- Вытрицкий А.А.* Сравнительный анализ сохранности водораздельных государственных защитных лесных полос Волгоградской области по данным Sentinel-2 NDVI и информационных продуктов типов земного покрова // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 458–470. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-458-470.

- Галанина Т.В., Овсянникова С.В.* Экологическая обстановка в угледобывающей отрасли Кузбасса: проблемы и пути решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 3. – С. 187–194.
- Гальперин А.М.* Геология: учебник для вузов / А.М. Гальперин, В.С. Зайцев. – Москва: Горная книга, 2010. – Часть 4. Инженерная геология. – 568 с.
- Герасимов И.П.* Научные основы современного мониторинга окружающей среды / И.П. Герасимов // Известия АН СССР. – 1975. – № 3. – С. 13–25.
- Гермак О.В.* Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга опустынивания // Научное обозрение. – 2013. – № 12. – С. 59–62.
- Глазырина М.А.* Особенности формирования флоры и растительности в условиях отвалов и карьеров открытых угольных разработок (на примере Челябинского бурогоугольного бассейна). Автореферат дисс. ... канд. биол. наук. – Екатеринбург, 2002. – 17 с.
- Голицын А.Н.* Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды / А.Н. Голицын. – М.: ОНИКС, 2007 – 336 с.
- Голохваст К.С., Куприянов А.Н.* Техногенное загрязнение территории // Экологический мониторинг в районах угледобычи. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео». – 2017. – С. 25–58.
- Голубева Е.И. и др.* Индекс листовой поверхности: методы полевых инструментальных измерений и использование материалов дистанционного зондирования / Е.И. Голубева, М.В. Зимин, О.В. Тутубалина и др. // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2020. – Т. 2. – № 5. – С. 70–74. DOI: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-70-74.
- Гонин Г.Б.* Космическая фотосъемка для изучения природных ресурсов / Г.Б. Гонин. – Л.: Недра, 1980. – 320 с.
- Горбачева Е.Н.* Применение универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при оценке интенсивности водно-эрозионных процессов на основе ГИС // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 2. – С. 42–51.
- ГОСТ-Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков, восстановление биологического разнообразия.
- Государственный доклад «О реализации в 2022 году Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года». – М.: Минэкономразвития России, 2016. – 24 с.
- Государственный доклад «О состоянии окружающей среды 2021». – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2022. – С. 195–200.

- Государственный доклад «Прогноз научно-технического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года». – М.: Министерство энергетики Российской Федерации., 2016. – С. 57–61.
- Гуримский А.И. Сравнительная оценка видов экологического воздействия при добыче полезных ископаемых / А.И. Гуримский, А.Л. Рейшахрит // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – С. 259–262.
- Данилов А.С., Матвеева В.А., Пашкевич М.А. Оценка техногенных массивов как источников экологической опасности // Мир русского слова. – 2017. – № 2. – С. 126–131.
- Двойников М.В., Сидоркин Д.И., Юртаев С.Л., Грохотов Е.И., Ульянов Д.С. Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с целью поиска и разведки новых месторождений полезных ископаемых // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 945–955. DOI: 10.31897/PMI.2022.55.
- Диколенко Е.Я. Экологические проблемы угольной отрасли и пути их решения // Уголь. – 2003. – № 1. – С. 25–27.
- Дмитриев В.Г. Оценка экологического риска. Аналитический обзор публикаций / В.Г. Дмитриев // Арктика и север. – 2014. – № 14. – С. 126–147.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2020 году. Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса. – Кемерово, 2021. – 237 с.
- Евтушенко Е.М. Развивающая аттестация как способ совершенствования функционала горного мастера (на примере филиала ОАО «СУЭК Красноярск» «Бородинский разрез им. М.И. Щадова») / Е.М. Евтушенко, С.В. Самарин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 12. – 48 с.
- Единый региональный центр дистанционного зондирования Земли Красноярского края – URL: <http://ksc.krasn.ru/news/2017-05-12/> (дата обращения 05.04.2022).
- Живичин А.Н., Соколов В.С. Дешифрирование фотографических изображений. – М.: Недра, 1980. – 253 с.
- Зарина Л.М., Гильдин С.М. Геоэкологический практикум: Учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. – 60 с.
- Зеньков И.В. и др. Разработка стартапа цифровой платформы горнодобывающей промышленности России с использованием информационных ресурсов дистанционного зондирования Земли из космоса: монография / Сибирский федеральный университет, Институт экологии и географии. – Красноярск: СФУ, 2021. – 816 с.

- Израэль Ю.А.* Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменения окружающей среды. Основы мониторинга / Ю.А. Израэль // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 7. – С. 3–8.
- Израэль Ю.А.* Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 375 с.
- Качурин Н.М., Стась Г.В., Калаева С.З., Корчагина Т.В.* Геоэкологическая оценка эффективности защиты окружающей среды и природоохранных мероприятий при подземной добыче угля // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2016. – №3. – С. 63–81.
- Кизеев А.Н.* Применение спектроскопии отражения для неdestructивного анализа пигментов в растительных тканях / А.Н. Кизеев, М.Н. Мерзляк, А.Е. Соловченко // Молодой ученый. – 2010. – № 6 (17). – С. 90–97.
- Киреева А.С.* Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятий угольной промышленности // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – №1. – С. 62–71. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71.
- Коваленко В.С.* Землесберегающие и землевоспроизводящие технологии на угольных разрезах / В.С. Коваленко, В.Б. Артемьев, П.И. Опанасенко. – М.: Горное дело: ООО "Киммерийский центр", 2013. – 440 с.
- Козлов А.В.* Значение микроорганизмов в поддержании устойчивости почв к воздействию антропогенных факторов / А.В. Козлов, О.В. Селицкая // Вестник Мининского университета. – 2015. – № 3 (11). – С. 27.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В.* Методы оценки почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. Учебное пособие. – М.: МФТИ, 2008. – 222 с.
- Комаров А.И.* Оценка качества аэрокосмической информации: проблемы и пути их решения // Геодезия и картография. – 2010. – № 6. – С. 47–50.
- Копылов В.Н., Кочергин Г.А., Полищук Ю.М., Хамедов В.А.* Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – В. 6. – Т. 1. – С. 33–41.
- Крутских Н.В.* Оценка трансформации природной среды в зоне воздействия горнодобывающих предприятий с использованием данных дистанционного зондирования земли // Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 88–93.

- Кузнецова И.А., Сериков К.К.* Анализ лесных пожаров в резервате «Семей Орманы»: применение машинного обучения в Google Earth Engine // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2021. – № 5. – С. 12–21.
- Куприянов А.Н.* Интегральный показатель состояния нарушенных земель после добычи угля / А.Н. Куприянов, Ю.А. Манаков // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 3. – С. 29–35.
- Куприянов А.Н.* Экологический мониторинг в районах угледобычи. Гео. Новосибирск: 2017. – 208 с.
- Куриленко В.В., Зайцева О.В., Новикова Е.А., Осмоловская Н.Г., Уфимцева М.Д.* Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем: Учеб. пособие. / Под ред. В.В. Куриленко. – СПб.: Изд-во СПбГУ. 2004. – 448 с.
- Лавренов П.Ф., Снежко Б.А., Щигрев А.Ф. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Кузбасская. Лист N-45-XVI (Осиновое Плесо). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018. – 151 с.
- Ларионов А.Г.* Влияние крутизны склонов на впитывание воды в почву // Эрозия почв и русловые процессы. – М.: Изд-во АН СССР, 1972. – С. 142–155.
- Литвиненко В.С., Пашкевич Н.В., Шувалов Ю.В.* Экологическая емкость природной среды Кемеровской области. Перспективы развития промышленности // Эко-бюллетень ИнЭКА. – 2008. – № 3 (128). – С. 28–34.
- Манаков Д.В.* Модели восприятия визуальной информации. – URL: <https://www.graphicon.ru/html/2017/papers/pp129-132.pdf> (дата обращения: 15.04.2023).
- Манаков Ю.А.* Восстановление растительного покрова в техногенных ландшафтах Кузбаса / Ю.А. Манаков // Автореферат дисс. ... канд. биол. наук. – Кемерово, 2012. – 30 с.
- Матвеев Н.М., Павловский В.А., Прохорова Н.В.* Экологические основы аккумуляции тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Самар. ун-т, 1997. – 100 с.
- Мелехова О.П. и др.* Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: Учеб. пос. / Под ред. О.П. Мелеховой, Е.И. Егоровой. – М.: Академия, 2007. – 288 с.
- Мерзляк М.Н., Гительсон А.А., Чивкунова О.Б., Соловченко А.Е., Погосян С.И.* Использование спектроскопии отражения в анализе пигментов высших растений // Физиология растений. – 2003. – Т. 50. – С. 785–792.

- Минеев В.Г.* Агрохимия: учебник / В.Г. Минеев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, Наука, 2006. – 720 с.
- Митрофанов Е.В., Шашнев И.В., Бубненко Д.И.* О применении узкоспектральных вегетационных индексов для оценки состояния лесной растительности // Вестник МГОУ. Сер. «Естественные науки». – 2012. – № 4. – С. 118–122.
- Митусов А.В.* Роль рельефа в формировании плодородия почв биогеоценозов лесостепной зоны. – М.: Изд-во АН СССР, 2001. – 141 с.
- Мозер Д.В., Туякбай А.С., Гей Н.И., Нагибин А.А., Сатбергенова А.К.* Мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна с использованием спутниковой радарной интерферометрии / Интерэкспо «ГЕО-Сибирь-2014» (16–18 апреля 2014 г., Новосибирск). – Новосибирск: изд. СГГА. – Т. 4. – № 1. – С. 14–18.
- Мясков А.В., Зайцев В.С., Шмелев В.С.* Использование особо охраняемых природных территорий для мониторинга негативного воздействия промышленных предприятий на естественные экосистемы. // Безопасность и экология горного производства: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 5 (специальный выпуск 10). – С. 3–19.
- Неволина Т.С.* Создание картографического источника в QGIS // Синергия наук. – 2019. – № 38. – С. 141–148.
- Нешатаев В.Ю.* Практическое пособие по восстановлению растительного покрова на землях, нарушенных открытыми горными разработками при освоении месторождений полезных ископаемых в условиях Камчатского края / В.Ю. Нешатаев, Н.С. Карапухин, Д.Ф. Ефремов, В.В. Кноль, М.В. Нешатаев, К.Д. Штак. – СПб., 2012. – 159 с.
- Низаметдинов Ф.К., Мозер Д.В., Гей Н.И., Туякбай А.С., Каранеева А.Д.* Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна // Геоматика. – 2014. – № 4. – С. 70–77.
- Николаева О.В.* Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв / О.В. Николаева, В.А. Терехова // Почвоведение. – 2017. – № 9. – С. 1141–1152. DOI: 10.7868/S0032180X17090052.
- Николайченко В.П.* Естественное лесовозобновление на отвалах угольных разрезов // Эко-бюллетень ИнЭКА. – 2004. – № 5 (100). – С. 10–11.
- О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2015 году: государственный доклад. – Кемерово: Департамент природных ресурсов и экологии Кемеровской области, 2016. – 212 с.

- Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 27.12.2019) // СПС КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 01.06.2023).
- Околелова А.А., Заикина В.Н.* Биоиндикация загрязненных нефтью светло-каштановых почв // Естественно-гуманитарные исследования. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 16–23.
- Поздняков А.И.* Зависимости удельного электрического сопротивления от некоторых свойств антропогенно-преобразованных легких почв агроландшафтов гумидной зоны / А.И. Поздняков, П.И. Елисеев // Вестник ОГУ. – 2012. – № 10 (146). – С. 98–104.
- Полонская Д.Е.* Микробиологический мониторинг состояния экосистем земледельческой части Красноярского края / Д.Е. Полонская // Автореферат дисс. ... д-ра биол. наук. – Красноярск, 2002. – 32 с.
- Померанц Л.И., Чукин В.Т.* Аппаратура и оборудование для геофизических методов исследования скважин. – М.: Недра, 1978. – 293 с.
- Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 № 800 «О проведении рекультивации и консервации земель» (вместе с «Правилами проведения рекультивации и консервации земель»).
- Потанин М.Ю.* Веб-ГИС технологии: обзор основных направлений развития // Системный анализ в науке и образовании. – 2014. – № 2. – С. 43–52.
- Потапенко В.А., Кузнецов Ю.Н., Гавришин С.С.* Комплексная оценка природного и техногенного ресурсных потенциалов Подмосковского бурогоугольного бассейна // Горная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 104–106.
- Потапов В.П.* Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. – Новосибирск: Наука, 2005. – 650 с.
- Проект расширения разреза «Талдинский» филиала «УК «Кузбассразрезуголь», пояснительная записка 4643П/01-ОВОС-Т. Том 1, 2020.
- Проект расширения разреза «Талдинский» филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез» (Талдинское поле). Проектная документация. Оценка воздействия на окружающую природную среду. Книга 1. Том 1. – Кемерово, 2020. – 364 с.
- Путилов В.Я., Путилова И.В.* Золошлаки энергетики: наилучшие доступные технологии, наука и образование // Материалы конференции Coal Ash Asia – 2016. Шуожоу, 23–26 сентября 2016. – С. 312–317.

- Пчельников Д.В., Добрецов Н.Н.* Построение временных рядов с одновременным использованием данных дистанционного зондирования SUOMI NPP VIIRS и TERRA/AQUA MODIS // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». – 2017. – № 23 (3). – С. 46–51.
- Раскатов В.А., Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Писарева А.В.* Экологическое состояние почвенного покрова городских ландшафтов различного функционального использования (на примере г. Москвы) // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 5. – С. 5–18.
- Русанов А.М.* Биоразнообразие растительности и разнообразие почв прилегающих к Бузулукскому бору ландшафтов // Экология. – 2007. – № 1. – С. 13–17.
- Сборник инновационных решений по сохранению биоразнообразия для угледобывающего сектора / под ред. С.А. Шейнфельд, Ю.А. Манаков. – Кемерово, Новокузнецк: ИнЭка, – 2015. – 208 с.
- Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 165–177.
- Сизов А.П.* Оценка качества и мониторинг земель сверхкрупного города (на примере Москвы): монография. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2012. – 242 с.
- Синдирева А.В.* Использование технологических видов червей *Eisenia fetida* для биотестирования почв, загрязненных свинцом / А.В. Синдирева, А.А. Абашкина, С.Ю. Князев // Проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов: сборник I региональной (заочной) научнопрактической конференции молодых ученых и обучающихся посвященной 100-летию Омского государственного аграрного университета. Омск, 06 декабря 2017 г. – Омск, 2018. – С. 378–382.
- Соколов А.Г.* Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых: учебное пособие / А.Г. Соколов, Н.В. Черных // Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 144 с.
- Соколова Г.Г.* Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений // Acta Biologica Sibirica. – 2016. – № 3. – С. 34–45. DOI: 10.14258/abs.v2i3.1453.
- Станкевич С.А., Пестова И.А.* Картирование конфигураций растительного покрова Киевской агломерации на базе долгосрочных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat // Современные трудности дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 2. – С. 187–196.

- Сугак Е.В. Расчет экологических рисков / Е.В. Сугак, Е.Н. Бельская // Международный Научный Институт «Educatio». – 2014. – № 4. – С. 124–127.
- Тарасова Л.В., Курбанов Э.А., Воробьев О.Н. Использование разносезонных изображений Sentinel-2 для картографирования водоохранных лесов Марийского Заволжья // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. – 2022. – № 8. – С. 76–94. – DOI: 10.25686/2022.79.42.008.
- Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. – Смоленск: Универсум, 2005. – 386 с.
- Тихонова Т.В. Современные методы оценки экосистемных услуг и потенциал их применения на практике // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – № 4 (36). – С. 122–135. DOI: 10.19110/1994-5655-2018-4-122-135.
- Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Альманах «Пространство и время». – 2016. – Т. 11. – Вып. 1. – 20 с.
- Хаустов А.П., Редина М.М. Экологический мониторинг. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 489 с.
- Цыдыпов Б.З., Миронов И.А., Куликов А.И. Выявление опустыненных территорий на основе комплексного анализа мультиспектральных (Landsat) и радарных (SRTM) спутниковых данных // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 4. – С. 67–73.
- Черенкова Е.А., Черенкова А.А. Возможности использования спутниковых данных влажности почвы при анализе урожайности яровой пшеницы (на примере Саратовской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 267–273.
- Черенцова А.А. Оценка воздействия золоотвалов на окружающую среду (на примере Хабаровской ТЭЦ-3): дисс. ... канд. биол. наук: 03.02.08: защищена 05.10.2013 / А.А. Черенцова. – Хабаровск, 2013. – 296 с.
- Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика: Интернет-журнал. – 2011. – № 2. – С. 98–102. – URL: https://sovzond.ru/upload/iblock/f46/2011_02_017.pdf (дата обращения: 25.12.2019).
- Чернавский Д.С., Иерусалимский Н.Д. О принципе минимума в кинетике ферментативных реакций // Управляемый биосинтез. – М., 1966. – С. 19–24.
- Чувакин В.С. Основы инженерной геологии: учебное пособие / В.С. Чувакин. – 3-е изд., перераб. – Томск: Издательство Томского государственного университета, 2017. – 136 с.

- Чумаковский Н.Н.* Основы общей экологии / Н.Н. Чумаковский и др. – Краснодар: КубГУ, КНИИСХ, 2002. – 220 с.
- Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. – М.: Техно-сфера, 2010. – 560 с.
- Шокин Ю.И., Потапов В.П.* ГИС сегодня: состояние, перспективы, решения // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20. – № 5. – С. 175–213.
- Шугалей Л.С., Яшихин Г.И., Дмитриенко В.К.* Биологическая рекультивация нарушенных земель КАТЭКа. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1996. – 186 с.
- Шукилович А.Ю., Федотова Е.В., Маглинец Ю.А.* Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 9 (7). – С. 1035–1044.
- Яроцкая Е.В., Патов А.М.* Развитие отечественных географических информационных систем в условиях импортозамещения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 117. – С. 175–188.
- Allan R.J.* Impact of mining activities on the terrestrial and aquatic environment with emphasis on mitigation and remedial measures. In Heavy metals: problems and solutions / R.J. Allan. – Edited by W. Salomons, U. Forstner, and P. Mader. Springer-Verlag, Berlin. 1995. P. 119–140.
- Andongma W.T. et al.* Mapping of hydrothermal alterations related to gold mineralization within parts of the Malumfashi Schist Belt, North-Western Nigeria // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2021. Vol. 24. № 3. P. 401–417. DOI: 10.1016/j.ejrs.2020.11.001.
- Ash H.J.* The introduction of native plant species on industrial waste heaps: a test of immigration and other factors affecting primary succession / H.J. Ash, R.P. Gemmell, A.D. Bradshaw // J. Appl. Ecol. 1994. № 31. P. 74–84.
- As-Syakur Abd.R. et al.* Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for mapping Built-Up and bare land in an urban area // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. № 10. P. 2957–2970. DOI: 10.3390/rs4102957.
- Baret F., Guyot G.* Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. Vol. 35. № 2–3. P. 161–173.
- Baret F., Guyot G., Major D.* TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation // Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1989. Vol. 3. P. 1355–1358.

- Benavidez R. et al.* A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. № 11. P. 6059–6086. DOI: 10.5194/hess-22-6059-2018.
- Bendini H.D.N. et al.* Estimating winter cover crop biomass in France using optical Sentinel-2 dense image time series and machine learning // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. № 5. P. 834. DOI: 10.3390/rs16050834.
- Bernier N.* Structural relationships among vegetation, soil fauna and humus form in a subalpine forest ecosystem: a Hierarchical Multiple Factor Analysis (HMFA) / N. Bernier, F. Gillet // *Pedobiologia*. 2012. № 55. P. 321–334.
- Blackman F.F.* Optima and limiting factors // *Annals of Botany*. 1905. Vol. 19. № 2. P. 281–296.
- Bonn S.* *Ausbreitungsbiologie der Pflanzen. Grundlagen und kulturhistorische Aspekte* / S. Bonn, P. Poschlod. Quelle & Meyer, Wiesbaden, 1998. – 205 p.
- Burrows C.J.* *Process of vegetation change* / C.J. Burrows. – London e.a.: Unwin Hyman, 1990. – 551 p.
- Buschmann C., Nagel E.* In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation // *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14. P. 711–722. DOI: 10.1080/01431169308904370.
- Cairns Jr.J.* Setting ecological goals for technical feasibility and scientific validity / Jr.J. Cairns // *Ecol. Eng.* 2000. № 15. P. 171–180.
- Chen W. et al.* Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multi-temporal TM images // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2004. Vol. 5. P. 3379–3382. DOI: 10.1109/igarss.2004.1370429.
- Condego L.* Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS // *Journal of Open-Source Software*. 2021. Vol. 6. № 64. P. 3172. DOI: 10.21105/joss.03172.
- De Oliveira Junior J.G. et al.* Space-temporal detection of environmental changes in the Brazilian semiarid through Google Earth Engine and GIS // *Journal of South American Earth Sciences*. 2023. Vol. 127. P. 104403. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104403.
- Deng Y. et al.* RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. Vol. 39. P. 40–48. DOI: 10.1016/j.jag.2015.02.010.
- Diek S. et al.* Barest pixel composite for agricultural areas using Landsat Time Series // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. № 12. P. 1245. DOI: 10.3390/rs9121245.

- Elvidge C.D., Lyon R.J.P.* Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // *Remote Sensing of Environment*. 1985. Vol. 17. P. 265–269.
- Estornell J. et al.* Principal component analysis applied to remote sensing // *Modelling in Science Education and Learning*. 2013. Vol. 6. P. 83–89. DOI: 10.4995/msel.2013.1905.
- Ferretti A., Perissin D., Prati C. et al.* ERS-ENVISAT permanent scatterers interferometry // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2003. Vol. 2. P. 1130–1132. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294034.
- Frouz J.* Development of soil microbial properties in topsoil layer during spontaneous succession in heaps after brown coal mining in relation to humus microstructure development / J. Frouz, A. Novakova // *Geoderma*. 2005. № 129. P. 54–64.
- Gao B.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. Iss. 3. P. 257–266. DOI:10.1016/s0034-4257(96)00067-3.
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. № 3. P. 257–266. DOI:10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- Gerhards M. et al.* Challenges and Future Perspectives of Multi-/Hyperspectral Thermal Infrared Remote Sensing for Crop Water-Stress Detection: A Review // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. № 10. P. 1240. DOI: 10.3390/rs11101240.
- 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. Vol. 58. № 3. P. 289–298. DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00072-7.
- 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. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Habibie M.I. et al.* The development land utilization and cover of the Jambi district are examined and forecasted using Google Earth Engine and CNN1D // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 34. P. 101175. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101175.
- Huete A. R.* A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25. P. 295–309.
- 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. Vol. 83. P. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

- Huete A., Justice C., Liu H.* Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 49. № 3. P. 224–234. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90018-3.
- Huete A.R., Jackson R.D., Post D.F.* Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds // *Remote Sensing of Environment*. 1985. Vol. 17. P. 37–53.
- Hunt E.R., Rock B.N.* Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances // *Remote Sensing of Environment*. 1989. Vol. 30. № 1. P. 43–54.
- Jamalabad M.S.* Forest Canopy Density Monitoring using Satellite Images // *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2004. – URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10030103611> (дата обращения: 30.03.2024).
- Kaufman Y.J., Tanre D.* Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS // *In Proc. IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symposium*. 1992. P. 261–270.
- Kumar M. et al.* Global-scale application of the RUSLE model: a comprehensive review // *Hydrological Sciences Journal*. 2022. Vol. 67. № 5. P. 806–830. DOI: 10.1080/02626667.2021.2020277.
- Lagutin A., Mordvin E.Yu., Volkov N.* Estimates of the terrestrial gross primary production for the south of Western Siberia in 2014-2021 according to OCO-2 and OCO-3 data // *28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2022. DOI: 10.1117/12.2645053.
- Li H. et al.* Mapping Urban Bare Land Automatically from Landsat Imagery with a Simple Index // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. № 3. P. 249. DOI: 10.3390/rs9030249.
- Li P. et al.* Soil erosion assessment by RUSLE model using remote sensing and GIS in an arid zone // *International Journal of Digital Earth*. 2023. Vol. 16. № 1. P. 3105–3124. DOI: 10.1080/17538947.2023.2243916.
- Liebig J.* Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie / von Justus Liebig, 1841. – 352 p.
- Lin H. et al.* Studies on urban areas extraction from landsat TM images // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2005. P. 3826–3829. DOI: 10.1109/igarss.2005.1525743.
- Lindon K.A.* Sear Coal Fired Power Station Ash Products and EU Regulation // *Coal Combustion and Gasification Products*. 2009. Vol. 1. P. 63–66.
- Loi D.T., Chou T.Y., Fang Y.-M.* Integration of GIS and remote sensing for evaluating forest canopy density index in Thai Nguyen Province, Vietnam // *International Journal of Environmental Sciences and Development*. 2017. Vol. 8. № 8. P. 539–542. DOI: 10.18178/ijesd.2017.8.8.1012.

- Lu B. et al.* Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. 16. P. 2659. DOI: 10.3390/rs12162659.
- Madasa A., Orimoloye I.R., Ololade O.O.* Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area // *Journal of African Earth Sciences*. 2021. Vol. 175. P. 104108.
- Mansourmoghaddam M. et al.* Monitoring of Carbon Monoxide (CO) changes in the atmosphere and urban environmental indices extracted from remote sensing images for 932 Iran cities from 2019 to 2021 // *International Journal of Digital Earth*. 2023. Vol. 16. № 1. P. 1205–1223. DOI: 10.1080/17538947.2023.2196445.
- McFeeters S.K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17. P. 1425–1432.
- Mitscherlich E.A.* Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. *Landwirtsch Jahrbuch*. 1909. Vol. 38. P. 537–552.
- Mitscherlich E.A.* Die Bestimmung des Düngerbedürfnisses des Bodens, 1925. – 99 p.
- Mushkin A. et al.* Validation of ASTER emissivity retrieval using the MAKO Airborne TIR imaging spectrometer at the Algodones Dune Field in southern California, USA // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. № 5. P. 815. DOI: 10.3390/rs12050815.
- Nguyen C. T. et al.* A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8 // *Land*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 231. DOI: 10.3390/land10030231.
- Nioti F., Dimopoulos P., Koutsias N.* Correcting the fire scar perimeter of a 1983 wildfire using USGS-Archived Landsat satellite data // *GIScience & Remote Sensing*. 2011. Vol. 48. № 4. P. 600–613. DOI: 10.2747/1548-1603.48.4.600.
- Ombiro S. et al.* Application of remote sensing in mapping hydrothermally altered zones in a highly vegetative area – A case study of Lolgorien, Narok County, Kenya // *Indian Journal of Science and Technology*. 2021. Vol. 14. № 9. P. 810–825. DOI: 10.17485/IJST/v14i9.68.
- Padma S. et al.* Simulation of Land Use/Land Cover Dynamics using Google Earth Data and QGIS: A case study on Outer Ring Road, Southern India // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 24. P. 16373. DOI: 10.3390/su142416373.
- Papaiordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T.* Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform // *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2019. № 100. P. 36–52. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-36-52.

- Passah A. et al.* Synthetic Aperture Radar image analysis based on deep learning: A review of a decade of research // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 123. P. 106305. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106305.
- Peng B. et al.* Assessing the benefit of satellite-based Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in crop yield prediction // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Vol. 90. P. 102126. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102126.
- Pennypacker C.R. et al.* FUEGO – Fire urgency estimator in geosynchronous orbit – a proposed Early-Warning fire Detection system // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. № 10. P. 5173–5192. DOI: 10.3390/rs5105173.
- Piyooash A.K., Ghosh S.K.* Development of a modified bare soil and urban index for Landsat 8 satellite data // *Geocarto International*. 2017. Vol. 33. № 4. P. 423–442. DOI: 10.1080/10106049.2016.1273401.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H.* Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48, P. 119–126.
- Qi J., Kerr Y., Chehbouni A.* External Factor Consideration in Vegetation Index Development // *In Proc. of the 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. 1994. P. 723–730.
- Radocaj D. et al.* Global Open Data Remote Sensing Satellite Missions for Land Monitoring and Conservation: A review // *Land*. 2020. Vol. 9. № 11. P. 402. DOI: 10.3390/land9110402.
- Ramdani F., Setiani P.* Data of satellite observation for environmental assessment before and during COVID-19 pandemic in part of Indonesia using the cloud-computing platform // *Geoscience Data Journal*. 2022. Vol. 9. № 2. P. 304–314. DOI: 10.1002/gdj3.144.
- Rasul A. et al.* Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates // *Land*. 2018. Vol. 7. № 3. P. 81. DOI: 10.3390/land7030081.
- Renard K.G. et al.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), 1997. – 382 p.
- Rocha-Nicoleite E., Overbeck G.E., Müller S.C.* Degradation by coal mining should be priority in restoration planning // *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017. Vol. 15. № 3. P. 202–205. DOI: 10.1016/j.pecon.2017.05.006.
- Rocha-Nicoleite E., Overbeck G.E., Müller S.C.* Degradation by coal mining should be priority in restoration planning // *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017. Vol. 15. Iss. 3. p. 202–205. DOI: 10.1016/j.pecon.2017.05.006.
- Rogers A.S., Kearney M.* Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. № 12. P. 2317–2335. DOI: 10.1080/01431160310001618103.

- Rouse J. et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERST // NASA Special Publication. 1974. Vol. 351. P. 309–317.
- Rovai M., Andreoli M., Monacci F.* A GIS-Based Model for the Enhancement of Rural Landscapes: The Case Study of Valdera – Tuscany (Italy) // Landscape Modelling and Decision Support. 2020. P. 143–162. DOI: 10.1007/978-3-030-37421-1_8.
- Rufin P. et al.* Post-Soviet changes in cropping practices in the irrigated drylands of the Aral Sea basin // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17. № 9. P. 095013. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8daa.
- Van Remortel R.D., Hamilton M.E., Hickey R.* Estimating the LS Factor for RUSLE through Iterative Slope Length Processing of Digital Elevation Data within ArcInfo Grid // The Australian Surveyor. 2001. Vol. 30. № 1. P. 27–35. DOI: 10.1080/00690805.2001.9714133.
- Vermote E., Wolfe R.* MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V061. 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09GA.061. – URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09gav061/> (дата обращения 15.11.2023).
- Wentzel K.* Determination of the overall soil erosion potential in the Nsikazi District (Mpumalanga Province, South Africa) using remote sensing and GIS // Canadian Journal of Remote Sensing. 2002. Vol. 28. № 2. P. 322–327. DOI: 10.5589/m02-013.
- Xiao X. et al.* The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park // Sustainable Cities and Society. 2018. Vol. 40. P. 428–439.
- Yang N. et al.* Downscaled satellite Solar-Induced chlorophyll fluorescence detects the early response of sugarcane to drought stress in a major Sugarcane-Planting region of China // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. № 16. P. 3937. DOI: 10.3390/rs15163937.
- Young N.E. et al.* A survival guide to Landsat preprocessing // Ecology. 2017. Vol. 98. № 4. P. 920–932. DOI: 10.1002/ecy.1730.
- Zhao H., Chen X.* Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+ // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005. P. 1666–1668. DOI: 10.1109/igarss.2005.1526319.
- Zheng G., Moskal L.M.* Retrieving Leaf Area Index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors // Sensors. 2009. Vol. 9. № 4. P. 2719–2745. DOI: 10.3390/s90402719.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



ПУБЛИЧНО-ПРАВОВАЯ КОМПАНИЯ
«РОСКАДАСТР»
(ППК «Роскадастр»)

Орликов пер., д. 10, стр. 1, Москва, 107078

тел. +7 (495) 587-80-80

e-mail: ros@kadastr.ru, <http://www.kadastr.ru>

ОГРН 1227700700633

ИНН/КПП 7708410783/770801001

«31» марта 2025 г.

СПРАВКА

В рамках научно-исследовательских и технологических работ ППК «Роскадастр», направленных на развитие Национальной системы пространственных данных (НСПД) Российской Федерации, были апробированы результаты диссертационного исследования Маневич Полины Павловны на тему «Разработка методики оценки состояния растительности рекультивированных земель угледобывающих районов на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса».

Разработанная методика позволяет комплексно оценивать состояние растительного покрова на территориях с различной степенью антропогенной трансформации и техногенного воздействия. Она основана на использовании данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных ресурсов НСПД. Методика позволяет оценивать состояние растительного покрова на территориях с различной степенью техногенной трансформации, учитывая природно-климатические и морфометрические особенности.

Проведённые исследования подтвердили универсальность и высокую адаптивность методики к различным природно-климатическим условиям и морфометрическим особенностям рельефа нарушенных земель. Достоверность полученных результатов обеспечена за счёт использования сведений из Базы знаний НСПД и сопоставления с полевыми наблюдениями и аналитическими материалами.

Начальник Управления научно-технического развития и инноваций в сфере геодезии, картографии и геоинформационных технологий (подпись)



Ф.В. Шкуров
(ФИО)