

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

УДК 711.2:528.9

На правах рукописи

Сушкова Варвара Геннадьевна

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

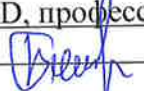
«Комплексная оценка физиологического состояния
растительности в ботаническом саду г. Алматы с
применением вегетационного индекса NDVI»

Направление подготовки

7M07324 – Землеустройство

Научный руководитель

PhD, профессор

 Байгурин Ж.Д.

" 12 " 01 2026 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

Рецензент

Доктор философии PhD,

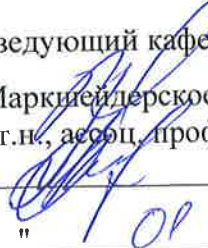
 Омарбекова А.Д.

" 12 " 01 2026 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

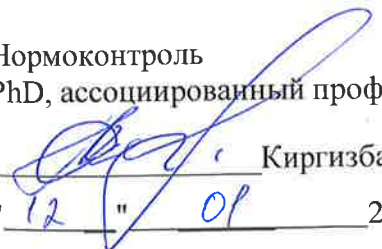
«Маркшейдерское дело и геодезия»
к.т.н., ассоц. профессор,

 Мейрамбек Г

" 12 " 01 2026 г.

Нормоконтроль

PhD, ассоциированный профессор

 Киргизбаева Д.М

" 12 " 01 2026 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

7M07324 – Землеустройство

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Маркшейдерское дело и геодезии»

к.т.н., ассоциированный профессор

Мейрамбек Г.М.
«12» 01 2026 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Сушковой Варваре Геннадьевне

Тема: Комплексная оценка физиологического состояния растительности в ботаническом саду г. Алматы с применением вегетационного индекса NDVI

Утверждена приказом проректора по академическим вопросам Жаутиковой Б.А. от «28» марта 2024 г. года № 133-П/О

Срок сдачи законченной диссертации «15» января 2026 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли Sentinel-2 (COPERNICUS/S2_SR), векторные границы Ботанического сада г. Алматы, результаты обработки на платформе Google Earth Engine.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Анализ теоретических и методологических подходов к оценке физиологического состояния растительности по данным дистанционного зондирования Земли;
б) Разработка и апробация методики геоинформационного анализа состояния растительного покрова Ботанического сада г. Алматы на основе расчёта вегетационного индекса NDVI;

в) Анализ пространственного распределения, сезонной и многолетней динамики значений NDVI и оценка физиологического состояния растительности;

Перечень графического материала:

а) Карты пространственного распределения NDVI за весенние и осенние периоды 2019, 2021 и 2023 гг.

б) Карты сезонной динамики NDVI (весна–осень) за 2019, 2021 и 2023 гг.

в) Графики многолетних изменений NDVI за период 2013–2022 гг.

Рекомендуемая основная литература:

1 Sentinel-2 User Handbook. – European Space Agency (ESA), 2015.

2 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.

ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретические основы оценки физиологического состояния растительности. Сбор и изучение научной литературы по теме	сентябрь 2024 г.	—
Объект исследования, исходные данные и методика геоинформационного анализа	май 2025 г.	—
Геоинформационная оценка физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы	сентябрь 2025 г.	—

Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	PhD, профессор Байгурин Ж.Д.	20.09.2024	
Практическая часть	PhD, профессор Байгурин Ж.Д.	27.05.2025	
Нормоконтролер	PhD, ассоциированный профессор Киргизбаева Д.М.	12.01.2025	

Научный руководитель
Байгурин Ж.Д.

Задание принял к исполнению обучающийся
Сушкова В.Г.

Дата

«12» 01 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

ОТЗЫВ

на магистерскую диссертацию

Сушкова Варвара Геннадьевна

по специальности 7М07324 – “Землеустройство”

на тему «Комплексная оценка физиологического состояния растительности в
ботаническом саду г. Алматы с применением вегетационного индекса NDVI»
представленную на соискание степени магистра

Магистерская диссертация Сушковой Варвары Геннадьевны посвящена актуальной задаче оценки состояния растительного покрова в условиях городской среды с использованием методов дистанционного зондирования Земли и геоинформационного анализа. Актуальность работы обусловлена необходимостью мониторинга состояния зелёных насаждений и выявления изменений физиологического состояния растительности под воздействием природных и антропогенных факторов.

Работа имеет логически выстроенную структуру и включает теоретическую, методическую и практическую части. В диссертации рассмотрены теоретические основы применения вегетационных индексов, обоснован выбор индекса NDVI, охарактеризованы используемые спутниковые данные Sentinel-2 и платформа Google Earth Engine.

В практической части выполнена геоинформационная оценка пространственного распределения, сезонной динамики и многолетних изменений значений NDVI для территории Ботанического сада г. Алматы. Полученные результаты позволили выявить зоны с различным физиологическим состоянием растительного покрова, а также участки, требующие повышенного внимания.

Магистерская диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня, и рекомендуется к защите.

Научный руководитель

 Байгурин Ж.Д.

12.01.2026г.

Доктор PhD, профессор

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертацию Сушковой В.Г.
на тему «Комплексная оценка физиологического состояния растительности в
ботаническом саду г. Алматы с применением вегетационного индекса NDVI»
представленную на соискание степени магистра
по специальности 7М07324 – Землеустройство

На магистерскую диссертацию Сушковой В.Г.

Рецензируемая магистерская диссертация посвящена актуальной задаче
оценки физиологического состояния растительности в условиях городской среды с
использованием данных дистанционного зондирования Земли и
геоинформационных технологий. Применение вегетационного индекса NDVI
является обоснованным и современным подходом к мониторингу зелёных
насаждений.

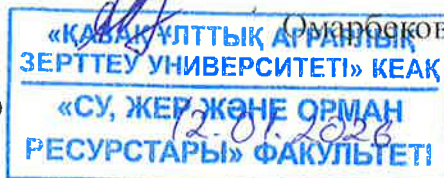
В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты:

- выполнен анализ спутниковых данных Sentinel-2 и значений индекса NDVI;
- изучены особенности и качество исходных данных дистанционного зондирования;
- проанализирован отечественный и зарубежный опыт применения NDVI;
- реализована методика расчёта и геоинформационного анализа NDVI;
- выполнен анализ пространственного распределения и динамики NDVI.

Работа выполнена на хорошем научно-методическом уровне, отличается
логичной структурой и корректным применением современных методов
дистанционного зондирования и ГИС-анализа. Полученные результаты имеют
практическую значимость.

Рецензент

Доктор PhD



Омарбекова А.Д.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сушкова Варвара

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Диссертация Сушкова

Научный руководитель:

Коэффициент Подобия 1: 0.4

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 12.06.2026



проверяющий эксперт

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагияттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Сушкова Варвара

Тақырыбы: Диссертация Сушкова

Жетекшісі:

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.4

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0

Әріптерді ауыстыру: 0

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 0

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні 12.01.2026

Кафедра меңгерушісі



АНДАТПА

Алматы қаласының Ботаникалық бағы аумағындағы өсімдіктер жамылғысының физиологиялық жағдайын бағалау үшін Жерді қашықтан зондтау және геоақпараттық талдау әдістерін қолдану қарастырылған. Sentinel-2 спутниктік деректері негізінде NDVI вегетациялық индексі есептеліп, Google Earth Engine платформасы пайдаланылды. Алынған нәтижелер өсімдіктер жамылғысының кеңістіктік таралуын, маусымдық және көпжылдық динамикасын бағалауға мүмкіндік береді.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается применение методов дистанционного зондирования Земли и геоинформационного анализа для оценки физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы. Выполнен расчёт и анализ вегетационного индекса NDVI по спутниковым данным Sentinel-2 с использованием платформы Google Earth Engine. Полученные результаты позволяют оценить пространственное распределение, сезонную и многолетнюю динамику состояния растительного покрова в условиях городской среды.

ABSTRACT

The application of remote sensing and geoinformation analysis methods for assessing the physiological state of vegetation within the Almaty Botanical Garden is considered. The NDVI vegetation index is calculated and analyzed using Sentinel-2 satellite data and the Google Earth Engine platform. The results enable the assessment of spatial distribution as well as seasonal and long-term dynamics of vegetation condition in an urban environment.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	1
Глава 1. Теоретические основы оценки физиологического состояния растительности	2
1.1 Физиологическое состояние растительности и его основные характеристики.....	2
1.2 Дистанционное зондирование Земли в исследованиях растительного покрова.....	3
1.3 Вегетационные индексы и их применение в мониторинге растительности	4
1.4 Индекс NDVI: физический смысл, особенности расчёта и ограничения	6
1.5 Анализ отечественных и зарубежных исследований по применению NDVI	8
Глава 2. Объект исследования, исходные данные и методика геоинформационного анализа.....	11
2.1 Физико-географическая характеристика Ботанического сада г. Алматы..	11
2.2 Характеристика спутниковых данных и источников информации.....	12
2.3 Методика расчёта вегетационного индекса NDVI.....	13
2.4 Геоинформационные методы обработки и анализа спутниковых данных	15
2.5 Методика комплексной оценки физиологического состояния растительности	16
Глава 3. Геоинформационная оценка физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы	18
3.1. Пространственное распределение значений NDVI в 2019, 2021 и 2023 гг.	18
3.2 Анализ сезонной динамики NDVI растительного покрова.....	25
3.3 Многолетние изменения NDVI по данным временных рядов	28
3.4 Оценка состояния растительности и выявление зон деградации и устойчивого развития	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ А	35

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью объективной оценки состояния растительного покрова в условиях урбанизированной среды. Городские зелёные насаждения испытывают комплексное воздействие природных и антропогенных факторов, включая изменение микроклимата, рекреационную нагрузку и трансформацию окружающей застройки, что напрямую отражается на физиологическом состоянии растительности.

Целью магистерской диссертации является комплексная оценка физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы на основе анализа вегетационного индекса NDVI с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Основные задачи работы

1. Анализ теоретических и методологических подходов к оценке физиологического состояния растительности по данным дистанционного зондирования.
2. Подбор и характеристика спутниковых данных, используемых для расчёта вегетационного индекса NDVI.
3. Разработка методики расчёта и анализа NDVI с применением геоинформационных технологий.
4. Проведение пространственной оценки состояния растительного покрова Ботанического сада за репрезентативные годы.
5. Анализ многолетней динамики изменений значений NDVI и выявление проблемных участков растительности.

Научная новизна работы заключается в применении комплексного подхода к оценке физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы, основанного на сочетании пространственного анализа NDVI за отдельные годы и анализа многолетней динамики вегетационного индекса. В рамках исследования выполнена интеграция данных дистанционного зондирования и геоинформационного анализа, что позволяет получить объективную оценку состояния растительного покрова и выявить особенности его пространственно-временных изменений в условиях городской среды.

Глава 1. Теоретические основы оценки физиологического состояния растительности

1.1 Физиологическое состояние растительности и его основные характеристики

Физиологическое состояние растительности является интегральной характеристикой жизнедеятельности растений, отражающей интенсивность процессов фотосинтеза, дыхания, транспирации и накопления биомассы. Оно формируется под воздействием совокупности природных и антропогенных факторов и служит важным показателем устойчивости растительных сообществ к изменениям условий окружающей среды.

В эколого-географических исследованиях физиологическое состояние растительного покрова рассматривается как индикатор общего состояния экосистемы. Его изменение может свидетельствовать как о естественных сезонных и межгодовых колебаниях, так и о негативных воздействиях, связанных с антропогенной нагрузкой, нарушением водного режима, деградацией почв и изменением микроклиматических условий. В условиях городской среды данные процессы, как правило, проявляются более выражено, что обусловлено высокой степенью трансформации природных ландшафтов.

К основным факторам, влияющим на физиологическое состояние растительности, относятся климатические условия, обеспеченность влагой и питательными веществами, а также степень антропогенного воздействия. Температурный режим и количество осадков определяют интенсивность вегетационных процессов, тогда как свойства почвенного покрова оказывают влияние на доступность влаги и элементов питания. Антропогенные факторы, такие как рекреационная нагрузка, загрязнение атмосферы и почв, а также изменение структуры землепользования, способны приводить к снижению жизнеспособности растений и нарушению устойчивости растительных сообществ.

Традиционные методы оценки физиологического состояния растительности основаны преимущественно на наземных наблюдениях и лабораторных исследованиях. Они позволяют получать детальную информацию о биофизических и биохимических параметрах растений, однако отличаются высокой трудоёмкостью и ограниченной пространственной репрезентативностью. Это существенно затрудняет их применение при анализе крупных территорий и при необходимости регулярного мониторинга состояния растительного покрова.

В связи с этим в современных исследованиях всё более широкое распространение получают методы дистанционного зондирования Земли, позволяющие оценивать физиологическое состояние растительности

опосредованно — через спектральные характеристики отражённого излучения. Отражательная способность растительности в различных диапазонах электромагнитного спектра тесно связана с содержанием хлорофилла, плотностью листового покрова и интенсивностью фотосинтетической активности, что делает возможным использование спутниковых данных для анализа состояния растительного покрова.

Физиологическое состояние растительности характеризуется выраженной пространственной и временной изменчивостью. Сезонные фазы вегетации, межгодовые климатические колебания и локальные особенности условий произрастания обуславливают неоднородность состояния растительного покрова даже в пределах одной территории. В этой связи его объективная оценка требует применения методов, обеспечивающих как пространственную детализацию, так и возможность анализа временной динамики.

1.2 Дистанционное зондирование Земли в исследованиях растительного покрова

Дистанционное зондирование Земли является одним из ключевых инструментов исследования состояния растительного покрова и широко применяется в эколого-географических и природоохранных исследованиях [1]. Его использование позволяет получать объективную, пространственно распределённую информацию о состоянии растительности на обширных территориях и анализировать изменения, происходящие во времени, без необходимости проведения трудоёмких наземных обследований.

Основу методов дистанционного зондирования составляет регистрация отражённого и собственного излучения земной поверхности в различных диапазонах электромагнитного спектра. Растительный покров обладает специфическими спектральными характеристиками, обусловленными строением листового аппарата и содержанием пигментов, прежде всего хлорофилла [2]. В красной области спектра наблюдается интенсивное поглощение излучения, связанное с процессами фотосинтеза, тогда как в ближнем инфракрасном диапазоне отражательная способность растительности существенно возрастает за счёт внутренней структуры листа. Данные особенности лежат в основе большинства методов дистанционной оценки состояния растительного покрова.

Применение спутниковых данных в исследованиях растительности позволяет решать широкий круг задач, включая оценку продуктивности, выявление деградированных участков, анализ сезонной и межгодовой динамики, а также мониторинг последствий антропогенного воздействия. В условиях городской среды методы дистанционного зондирования приобретают особую значимость, поскольку позволяют учитывать пространственную неоднородность растительного покрова, обусловленную различиями в землепользовании, плотности застройки и уровне рекреационной нагрузки.

Современные спутниковые системы дистанционного зондирования обеспечивают получение данных с различным пространственным, временным и спектральным разрешением, что позволяет адаптировать методы анализа под конкретные задачи исследования. Высокая периодичность съёмки даёт возможность формировать временные ряды наблюдений и анализировать динамику состояния растительности на протяжении длительных периодов. Это особенно важно при изучении тенденций изменения физиологического состояния растительного покрова и выявлении устойчивых закономерностей его развития.

В последние годы существенное развитие получили облачные геоплатформы обработки спутниковых данных, обеспечивающие доступ к обширным архивам дистанционного зондирования и инструменты для их анализа. Использование таких платформ позволяет автоматизировать процессы обработки изображений, выполнять расчёты показателей состояния растительности и формировать пространственные модели без необходимости хранения больших объёмов данных на локальных носителях.

Методы дистанционного зондирования Земли обеспечивают получение объективной и пространственно детализированной информации о состоянии растительного покрова и позволяют анализировать его изменения во времени. Их применение создаёт методологическую основу для использования вегетационных индексов при оценке физиологического состояния растительности [1, 2].

1.3 Вегетационные индексы и их применение в мониторинге растительности

Вегетационные индексы представляют собой числовые показатели, рассчитываемые на основе спектральных характеристик отражённого излучения и предназначенные для оценки состояния растительного покрова. Их применение основано на различиях в отражательной способности растительности в отдельных диапазонах электромагнитного спектра, прежде всего в красной и ближней инфракрасной областях, что связано с процессами фотосинтеза и структурой листового аппарата растений.

Использование вегетационных индексов позволяет перейти от визуальной интерпретации спутниковых изображений к количественной оценке состояния растительности. Это особенно важно при анализе больших территорий и при необходимости сопоставления данных, полученных в различные временные периоды. Вегетационные индексы широко применяются для оценки продуктивности растительного покрова, выявления деградационных процессов, анализа сезонной динамики и мониторинга изменений, обусловленных антропогенным воздействием.

В научных исследованиях и прикладных задачах мониторинга растительности используется широкий спектр вегетационных индексов, различающихся по физическому смыслу и области применения. Наиболее

распространёнными являются индексы, основанные на соотношении отражённого излучения в красной и ближней инфракрасной зонах спектра, а также индексы, учитывающие влияние почвенного фона и атмосферных факторов. Выбор конкретного индекса определяется целями исследования, характеристиками исходных спутниковых данных и особенностями исследуемой территории.

Спектральные особенности отражательной способности растительности, почвы и водной поверхности в различных диапазонах электромагнитного спектра представлены на рисунке 1.

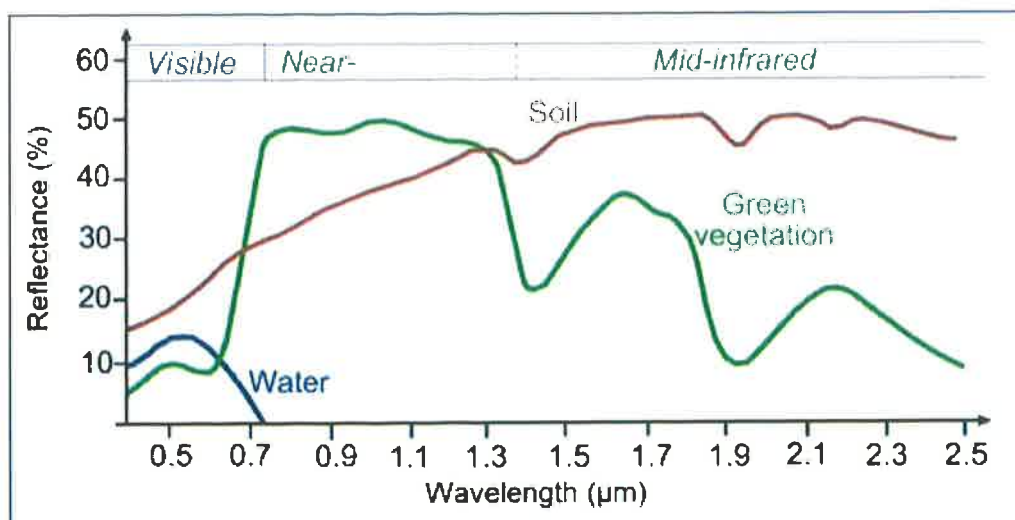


Рисунок 1 – Спектральная отражательная способность растительного покрова

Применение вегетационных индексов в мониторинге растительности позволяет выявлять пространственную неоднородность состояния растительного покрова и анализировать его изменения во времени. Значения индексов чувствительны к изменениям плотности листового покрова, содержанию хлорофилла и уровню фотосинтетической активности, что делает их информативными показателями физиологического состояния растений.

В условиях городской среды вегетационные индексы используются для оценки состояния зелёных насаждений, выявления участков с пониженной жизнеспособностью растительности и анализа влияния факторов урбанизации. С их помощью возможно сопоставление состояния растительного покрова на различных функциональных зонах территории, а также оценка эффективности мероприятий по озеленению и благоустройству.

В зависимости от целей исследования и особенностей анализируемой территории для оценки состояния растительного покрова используются различные вегетационные индексы, основанные на сочетании спектральных каналов и отличающиеся чувствительностью к отдельным физиологическим характеристикам растительности. Сравнительная характеристика наиболее распространённых вегетационных индексов, применяемых в исследованиях состояния растительности, приведена в таблице 1 [8].

Таблица 1. Вегетационные индексы, используемые в исследованиях состояния растительности

Индекс	Спектральные каналы	Назначение в исследованиях	Особенности применения
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	Красный, ближний инфракрасный	Оценка физиологического состояния растительности и плотности зелёной биомассы	Универсальный индекс, применяется для пространственного и временного анализа, чувствителен к состоянию фотосинтетически активной растительности
EVI (Enhanced Vegetation Index)	Красный, ближний инфракрасный, синий	Анализ густой растительности и участков с высокой биомассой	Менее подвержен эффекту насыщения, требует дополнительных коэффициентов и каналов
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	Красный, ближний инфракрасный	Оценка растительности на территориях с выраженным почвенным фоном	Учитывает влияние почвы, используется при разреженном растительном покрове
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	Зелёный, ближний инфракрасный	Анализ содержания хлорофилла и ранних стадий вегетации	Более чувствителен к изменениям в зелёной массе
NDWI (Normalized Difference Water Index)	Ближний инфракрасный, средний инфракрасный	Оценка водного стресса и увлажнённости растительности	Применяется как дополнительный показатель состояния растений

Использование вегетационных индексов позволяет перейти от качественной интерпретации спутниковых изображений к количественной оценке состояния растительного покрова. Данный подход широко применяется при мониторинге растительности и служит основой для дальнейшего использования конкретных индексов, в том числе индекса NDVI, в задачах пространственного анализа.

1.4 Индекс NDVI: физический смысл, особенности расчёта и ограничения

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является одним из наиболее широко применяемых показателей для оценки состояния

растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли. Его использование основано на различиях в отражательной способности растительности в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра, что обусловлено физиологическими особенностями растений и процессами фотосинтеза [4, 7].

Физический смысл индекса NDVI заключается в том, что здоровая растительность интенсивно поглощает излучение в красном диапазоне спектра и в то же время характеризуется высокой отражательной способностью в ближней инфракрасной области. Это позволяет количественно оценить степень развития зелёной биомассы и активность фотосинтетических процессов. Спектральные предпосылки расчёта индекса NDVI были рассмотрены ранее и проиллюстрированы на рисунке 1.

Индекс NDVI рассчитывается по следующей формуле [3, 4]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

где *NIR* — отражательная способность растительности в ближнем инфракрасном диапазоне спектра;
RED — отражательная способность в красной области спектра.

Значения индекса NDVI варьируют в диапазоне от -1 до +1. Отрицательные значения и значения, близкие к нулю, характерны для водных поверхностей, застроенных территорий и открытых почв. Низкие положительные значения соответствуют разреженному или угнетённому растительному покрову, тогда как более высокие значения свидетельствуют о высокой плотности зелёной биомассы и хорошем физиологическом состоянии растительности.

В практике экологических и географических исследований интерпретация значений NDVI осуществляется с учётом природных и территориальных особенностей объекта исследования. Для городских территорий, включая ботанические сады и парковые зоны, индекс NDVI позволяет выявлять пространственную неоднородность состояния растительного покрова, определять участки с пониженной жизнеспособностью растений и анализировать динамику изменений во времени.

Обобщённая интерпретация значений индекса NDVI и их соответствие состоянию растительного покрова приведены в таблице 2.

Несмотря на широкое распространение и простоту расчёта, индекс NDVI имеет ряд ограничений. В частности, его чувствительность снижается при высокой плотности растительного покрова, что может приводить к эффекту насыщения значений. Кроме того, на результаты расчёта NDVI могут оказывать влияние почвенный фон, атмосферные условия и особенности съёмки, особенно при анализе разреженной растительности или территорий с неоднородным землепользованием [7, 8].

Таблица 2. Интерпретация значений вегетационного индекса NDVI

Диапазон значений NDVI	Характеристика поверхности	Физиологическое состояние растительности
< 0	Водные поверхности, тени, искусственные объекты	Растительность отсутствует
0,00 – 0,10	Открытая почва, застроенные территории	Растительность отсутствует либо крайне разреженная
0,10 – 0,20	Разреженный растительный покров	Слабое физиологическое состояние
0,20 – 0,40	Умеренно развитая растительность	Средний уровень физиологического состояния
0,40 – 0,60	Плотный растительный покров	Хорошее физиологическое состояние
> 0,60	Густая и активно вегетирующая растительность	Высокий уровень физиологического состояния

Указанные ограничения обуславливают необходимость корректного подбора исходных данных и аккуратной интерпретации результатов. В то же время простота расчёта, высокая наглядность и возможность анализа временных рядов делают индекс NDVI эффективным инструментом для оценки физиологического состояния растительности, особенно при использовании многолетних спутниковых данных и геоинформационных технологий.

Несмотря на наличие определённых ограничений, индекс NDVI остаётся одним из наиболее универсальных и интерпретируемых показателей состояния растительного покрова. Простота расчёта, наглядность результатов и возможность анализа временных рядов обуславливают его широкое применение в исследованиях, направленных на оценку физиологического состояния растительности.

1.5 Анализ отечественных и зарубежных исследований по применению NDVI

Применение вегетационного индекса NDVI в исследованиях растительного покрова является одним из наиболее распространённых подходов в области дистанционного зондирования Земли. В зарубежной и отечественной научной литературе NDVI рассматривается как базовый индикатор, позволяющий оценивать пространственную неоднородность растительности, выявлять деградационные процессы и анализировать сезонную и многолетнюю динамику состояния растительного покрова на различных территориальных уровнях.

В зарубежных исследованиях NDVI широко используется для мониторинга состояния растительности в природных и антропогенно трансформированных ландшафтах. Особое внимание уделяется анализу временных рядов NDVI, что позволяет выявлять устойчивые тенденции

изменения растительного покрова, оценивать реакцию растительности на климатические колебания и антропогенные воздействия, а также прогнозировать возможные изменения в экосистемах. Важным направлением является применение NDVI для оценки эффективности природоохранных мероприятий и управления зелёной инфраструктурой городов, поскольку индекс позволяет оперативно выявлять участки с ухудшением состояния растительности и оценивать результативность мер по озеленению [16].

В отечественных исследованиях NDVI активно применяется для оценки состояния растительности на территории России и стран Центральной Азии, включая Казахстан. В научных работах подчёркивается целесообразность использования NDVI при мониторинге растительного покрова в условиях континентального климата и выраженной сезонности. Отдельное внимание уделяется вопросам сопоставимости данных разных лет и разных сенсоров, корректному выбору сезонных интервалов, а также учёту влияния облачности, атмосферных эффектов и почвенного фона на итоговые значения индекса. В исследованиях городских территорий NDVI используется для анализа состояния зелёных насаждений, выявления зон с повышенной антропогенной нагрузкой и оценки пространственных различий между функциональными зонами города [17].

Анализ публикаций показывает, что в большинстве работ NDVI применяется в сочетании с геоинформационными технологиями, что обеспечивает возможность пространственного анализа, классификации территории по диапазонам значений индекса и построения тематических карт. В качестве исходных данных чаще всего используются спутниковые системы Landsat и Sentinel-2, позволяющие формировать временные ряды наблюдений и анализировать динамику растительного покрова на протяжении длительных периодов. Существенное развитие в последние годы получили облачные платформы обработки данных, которые повышают воспроизводимость исследований и позволяют проводить расчёты индексов без необходимости локального хранения больших объёмов спутниковых данных.

Вместе с тем в научной литературе отмечаются и ограничения применения NDVI. К основным из них относятся эффект насыщения при высокой плотности растительного покрова, чувствительность к почвенному фону при разреженной растительности, а также влияние атмосферных факторов и условий съёмки. В связи с этим ряд исследований предлагает использование дополнительных индексов и методов предварительной обработки данных, включая маскирование облаков и формирование композитов, что позволяет повысить достоверность результатов. Однако, несмотря на указанные ограничения, NDVI сохраняет статус одного из наиболее универсальных и интерпретируемых показателей состояния растительного покрова.

Анализ отечественных и зарубежных научных работ подтверждает эффективность применения индекса NDVI для оценки состояния растительного покрова в природных и урбанизированных условиях. Используемые в исследованиях подходы к пространственному анализу и изучению временной

динамики NDVI формируют методологическую основу настоящей работы и обосновывают выбор данного индекса в качестве ключевого инструмента оценки физиологического состояния растительности.

В рамках настоящего исследования индекс NDVI рассматривается как базовый показатель, позволяющий интегрально характеризовать состояние растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли. Применение данного индекса в сочетании с геоинформационными технологиями обеспечивает системный подход к анализу пространственных и временных изменений физиологического состояния растительности.

Общая схема применения индекса NDVI в исследованиях состояния растительности представлена на рисунке 3.

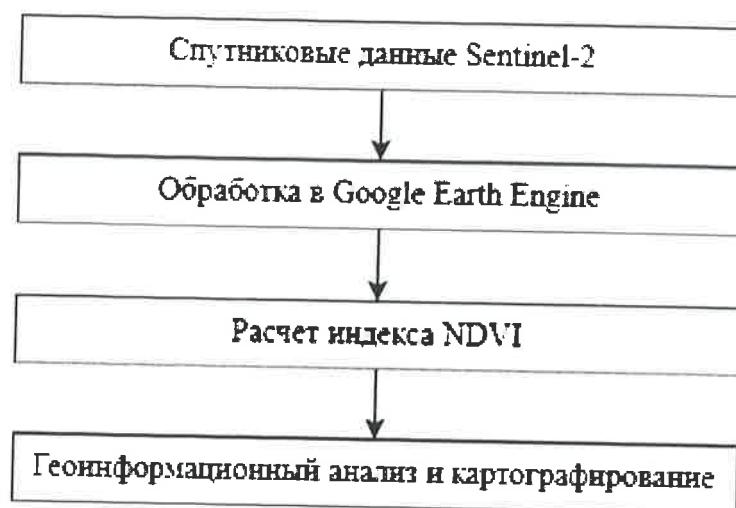


Рисунок 3 – Схема применения индекса NDVI в мониторинге состояния растительности

Представленная схема отражает последовательность основных этапов обработки спутниковых данных, начиная от получения исходных материалов и заканчивая геоинформационным анализом и картографированием результатов. Такая структура обработки данных обеспечивает сопоставимость результатов, воспроизводимость методики и позволяет применять её для анализа состояния растительности на различных временных срезах.

Проведённый анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что вегетационный индекс NDVI является универсальным и информативным показателем для оценки физиологического состояния растительности, широко применяемым при анализе пространственного распределения, сезонной и многолетней динамики растительного покрова. Несмотря на различия в подходах к обработке данных и интерпретации результатов, большинство исследований подтверждают целесообразность использования NDVI в сочетании с геоинформационными технологиями и данными дистанционного зондирования Земли [17].

Глава 2. Объект исследования, исходные данные и методика геоинформационного анализа

2.1 Физико-географическая характеристика Ботанического сада г. Алматы

Ботанический сад г. Алматы расположен в южной части города Алматы и является одним из крупнейших научно-природных объектов региона, выполняющим функции сохранения биоразнообразия, научных исследований и рекреационного использования. Территория ботанического сада находится в пределах предгорной зоны Заилийского Алатау и характеризуется сложными природными условиями, обусловленными сочетанием горного рельефа и городской застройки.

В физико-географическом отношении территория ботанического сада относится к зоне континентального климата, для которого характерны значительные сезонные колебания температуры воздуха, выраженная засушливость летнего периода и неравномерное распределение атмосферных осадков в течение года. Указанные климатические особенности оказывают существенное влияние на вегетационные процессы и физиологическое состояние растительного покрова.

Рельеф территории в целом слабо наклонный, с незначительными перепадами высот, что способствует формированию относительно однородных условий увлажнения и почвообразования. Почвенный покров представлен преимущественно серозёмами и их модификациями, характерными для предгорных территорий юго-востока Казахстана. Почвенные условия в сочетании с системой искусственного орошения создают благоприятные предпосылки для произрастания широкого спектра древесных, кустарниковых и травянистых растений.

Растительный покров ботанического сада отличается высоким видовым разнообразием и включает как местные, так и интродуцированные виды растений, адаптированные к условиям региона. В пределах территории представлены различные типы растительности, включая древесные насаждения, кустарниковые группы, газонные и цветочные композиции. Наличие разнообразных фитоценозов обуславливает пространственную неоднородность физиологического состояния растительности, что делает данную территорию репрезентативным объектом для проведения геоинформационной оценки на основе данных дистанционного зондирования Земли.

В то же время ботанический сад функционирует в условиях интенсивного антропогенного воздействия, связанного с плотной городской застройкой, транспортной инфраструктурой и рекреационной нагрузкой. Данные факторы оказывают влияние на микроклиматические условия и состояние растительного покрова, что обуславливает необходимость регулярного мониторинга и оценки

физиологического состояния растительности с использованием современных методов анализа.

Ботанический сад г. Алматы представляет собой сложный природно-антропогенный объект, сочетающий высокую экологическую ценность и уязвимость к внешним воздействиям. Его физико-географические особенности и функциональная роль в структуре городской среды обуславливают целесообразность использования данной территории в качестве объекта исследования при проведении геоинформационной оценки физиологического состояния растительности.

2.2 Характеристика спутниковых данных и источников информации

В качестве исходных данных для проведения геоинформационной оценки физиологического состояния растительности в работе использовались материалы дистанционного зондирования Земли, полученные со спутников семейства Sentinel-2. Обработка и анализ спутниковых данных выполнялись с применением облачной геоплатформы Google Earth Engine, обеспечивающей доступ к архивам дистанционного зондирования и инструментам их обработки [9, 13].

В исследовании применялась коллекция спутниковых данных *COPERNICUS/S2_SR*, представляющая собой продукты уровня Surface Reflectance [10, 11, 12]. Данная коллекция содержит изображения, прошедшие атмосферную коррекцию, что обеспечивает более высокую сопоставимость спектральных характеристик и повышает точность расчёта вегетационных индексов. Использование данных одного уровня предварительной обработки позволило обеспечить методическую однородность анализа и снизить влияние атмосферных и радиометрических искажений на результаты исследования.

Для наглядного представления характеристик спутниковых данных Sentinel-2, использованных в настоящем исследовании, приведена их обобщённая характеристика.

Таблица 3. Характеристика спутниковых данных Sentinel-2, использованных в исследовании

Параметр	Характеристика
Спутниковая система	Sentinel-2
Используемая коллекция	COPERNICUS/S2_SR
Уровень обработки	Surface Reflectance
Пространственное разрешение	10 м
Используемые спектральные каналы	Красный (B4), ближний инфракрасный (B8)
Анализируемые годы	2018, 2021, 2023
Платформа обработки	Google Earth Engine

Представленные в таблице 3 характеристики спутниковых данных обеспечивают возможность проведения сопоставимого пространственного анализа состояния растительного покрова.

Для оценки пространственного распределения значений вегетационного индекса NDVI были выбраны репрезентативные годы 2018, 2021 и 2023, для которых в коллекции COPERNICUS/S2_SR представлены стабильные и полноформатные данные с достаточным временным покрытием. Выбор указанных временных срезов обусловлен необходимостью получения сопоставимых картографических материалов при сохранении единого источника спутниковых данных и идентичной методики обработки.

Расчёт индекса NDVI осуществлялся на основе спектральных каналов красного и ближнего инфракрасного диапазонов, предоставляемых спутниками Sentinel-2. Пространственное разрешение используемых данных составляет 10 м, что позволяет детально анализировать структуру растительного покрова и выявлять пространственную неоднородность состояния растительности в пределах территории Ботанического сада г. Алматы.

Помимо картографических срезов для отдельных лет, в работе использовались данные временных рядов NDVI за период 2013–2022 гг., полученные на основе архивных спутниковых наблюдений. Анализ временных рядов позволил оценить многолетнюю динамику изменений физиологического состояния растительности и дополнить пространственный анализ результатами долгосрочного мониторинга.

Используемые спутниковые данные и источники информации обеспечивают возможность проведения комплексной оценки физиологического состояния растительности, сочетающей анализ пространственного распределения значений NDVI для отдельных репрезентативных лет и исследование многолетней динамики вегетационного индекса. Выбранный подход позволяет обеспечить методическую однородность анализа и сопоставимость полученных результатов [10, 11].

2.3 Методика расчёта вегетационного индекса NDVI

Методика расчёта вегетационного индекса NDVI в рамках настоящего исследования основана на использовании спутниковых данных Sentinel-2 уровня Surface Reflectance и реализована с применением облачной геоплатформы Google Earth Engine. Выбор данной платформы обусловлен возможностью обработки больших массивов спутниковых данных, формирования временных композитов и воспроизводимости результатов анализа.

На первом этапе выполнялась подготовка исходных спутниковых данных, включающая пространственную фильтрацию изображений по границам территории Ботанического сада г. Алматы и временную фильтрацию по заданным периодам наблюдений. Для каждого анализируемого года формировалась совокупность изображений, соответствующих вегетационному

периоду, что позволило минимизировать влияние сезонных колебаний и обеспечить сопоставимость результатов.

На втором этапе осуществлялась предварительная обработка спутниковых данных, включающая маскирование облаков и облачных теней. Для этой цели использовались стандартные средства, предусмотренные в коллекции COPERNICUS/S2_SR, что позволило исключить пиксели с искажёнными спектральными характеристиками и повысить достоверность расчёта вегетационного индекса [9, 13].

Последовательность обработки спутниковых данных Sentinel-2 при расчёте индекса NDVI представлена на рисунке 4.

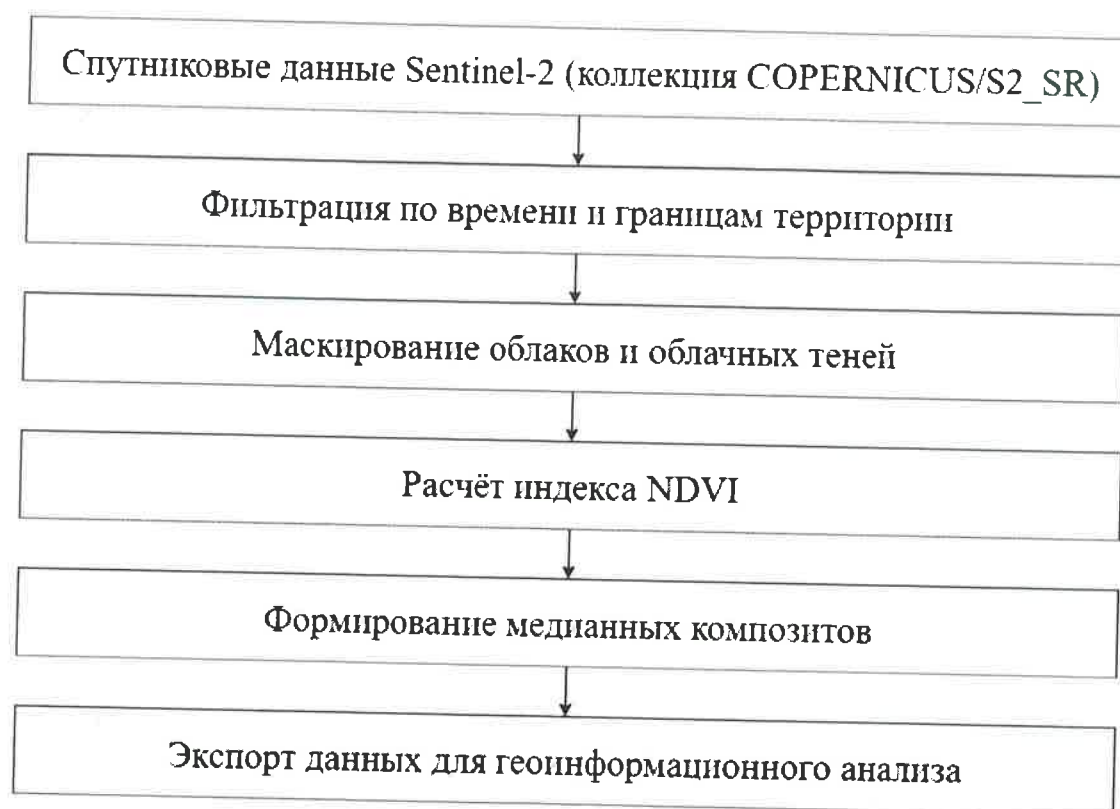


Рисунок 4 – Последовательность обработки спутниковых данных Sentinel-2 при расчёте индекса NDVI

Расчёт индекса NDVI выполнялся на основе значений отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Формула расчёта индекса NDVI и её физический смысл были рассмотрены в главе 1. В рамках данной работы расчёт индекса осуществлялся автоматически для каждого пикселя спутникового изображения с использованием встроенных инструментов платформы Google Earth Engine [12].

Для получения устойчивых и репрезентативных значений NDVI применялся метод агрегирования данных, основанный на формировании медианных композитов. Использование медианных значений позволило снизить влияние остаточной облачности и аномальных значений отражательной

способности, а также обеспечить более стабильное представление пространственного распределения индекса NDVI на исследуемой территории.

Результаты расчёта индекса NDVI для отдельных лет экспортировались в виде растровых слоёв и использовались для последующего геоинформационного анализа и картографирования. Полученные данные послужили основой для оценки пространственного распределения физиологического состояния растительности и их сопоставления между различными временными срезами [4].

Применённая методика расчёта NDVI обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет проводить сопоставимый анализ состояния растительного покрова для различных периодов наблюдений. Использование единого источника данных и унифицированного алгоритма обработки создаёт надёжную основу для дальнейшего анализа пространственно-временных изменений физиологического состояния растительности [3].

2.4 Геоинформационные методы обработки и анализа спутниковых данных

Геоинформационная обработка и анализ спутниковых данных в рамках настоящего исследования выполнялись с целью получения наглядных и сопоставимых картографических материалов, отражающих пространственное распределение значений вегетационного индекса NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы [15]. Геоинформационные методы позволили интегрировать результаты расчёта индекса NDVI с пространственными данными и обеспечить их последующий анализ в контексте территориальных особенностей объекта исследования.

Растровые данные NDVI, полученные на платформе Google Earth Engine, экспортировались в формате, совместимом с геоинформационными системами, и использовались для дальнейшей обработки в ГИС-среде. На данном этапе выполнялась проверка корректности пространственной привязки данных и их соответствия границам исследуемой территории. Все операции осуществлялись в единой системе координат, что обеспечило корректность пространственного анализа и сопоставимость результатов.

Для интерпретации значений индекса NDVI применялся метод классификации растровых данных по диапазонам значений, соответствующим различным уровням физиологического состояния растительности. Границы классов были определены на основе общепринятых интерпретационных шкал NDVI, рассмотренных в главе 1. Классификация позволила выделить участки с различной степенью развития и жизнеспособности растительного покрова и обеспечить наглядное представление результатов анализа.

На основе классифицированных растровых данных выполнялось картографирование пространственного распределения NDVI для каждого из анализируемых лет. При создании карт использовались единые параметры визуализации, включая цветовую шкалу, диапазоны значений и легенду, что

позволило обеспечить корректное визуальное сравнение карт между различными временными срезами. Применение унифицированного картографического оформления исключило влияние субъективных факторов на интерпретацию результатов.

Дополнительно в рамках геоинформационного анализа осуществлялось сопоставление карт NDVI за различные годы с целью выявления пространственных изменений физиологического состояния растительности. Такой подход позволил определить участки с устойчивыми значениями индекса, а также зоны, характеризующиеся ухудшением или улучшением состояния растительного покрова в исследуемый период.

Использование геоинформационных методов обработки и анализа спутниковых данных обеспечило наглядное представление результатов расчёта NDVI и создало основу для последующей комплексной оценки физиологического состояния растительности. Полученные картографические материалы используются в следующей главе при анализе пространственного распределения и динамики значений индекса NDVI.

2.5 Методика комплексной оценки физиологического состояния растительности

Комплексная оценка физиологического состояния растительности в рамках настоящего исследования основывалась на сочетании пространственного анализа значений вегетационного индекса NDVI и анализа его временной динамики. Такой подход позволил рассматривать состояние растительного покрова не только как статическую характеристику для отдельных временных срезов, но и как процесс, изменяющийся под воздействием природных и антропогенных факторов.

На первом этапе комплексной оценки использовались картографические материалы, отражающие пространственное распределение значений NDVI для выбранных репрезентативных лет. Анализ данных карт позволил выявить пространственную неоднородность физиологического состояния растительности в пределах территории Ботанического сада г. Алматы, а также определить участки с различным уровнем развития растительного покрова в соответствии с интерпретационной шкалой значений NDVI.

Применение картографического анализа на данном этапе позволило не только визуализировать пространственную структуру распределения значений NDVI, но и количественно оценить соотношение площадей с различным уровнем физиологического состояния растительного покрова. Это обеспечило основу для дальнейшего сопоставления пространственных характеристик с результатами анализа временной динамики индекса.

На втором этапе выполнялся анализ многолетней динамики значений NDVI на основе временных рядов за период 2013–2022 гг. Рассматривались общие тенденции изменения индекса, сезонные особенности и межгодовые колебания, что позволило оценить устойчивость растительного покрова и

выявить возможные периоды ухудшения или улучшения физиологического состояния растительности. Анализ временных рядов дополнял пространственную оценку и обеспечивал более полное представление о состоянии растительного покрова.

Использование временных рядов значений NDVI позволило сгладить влияние краткосрочных колебаний, обусловленных погодными условиями отдельных лет, и выявить устойчивые тенденции изменения физиологического состояния растительности. Такой подход повысил надёжность оценки и обеспечил более объективную интерпретацию полученных результатов.

Для интеграции результатов пространственного и временного анализа использовался сравнительный подход, предполагающий сопоставление картографических срезов NDVI с динамическими характеристиками индекса. Это позволило определить зоны с устойчиво высокими значениями NDVI, а также участки, характеризующиеся пониженной стабильностью физиологического состояния растительности. Особое внимание уделялось территориям, испытывающим повышенную антропогенную нагрузку и рекреационное воздействие.

Сопоставление пространственных и временных характеристик NDVI является ключевым элементом комплексной оценки физиологического состояния растительности. Данный подход позволяет учитывать как текущее состояние растительного покрова, так и особенности его изменения во времени, что особенно важно при анализе зелёных насаждений в условиях городской среды.

Результаты комплексной оценки физиологического состояния растительности использовались для формирования обобщённой характеристики состояния растительного покрова Ботанического сада г. Алматы. Полученные данные послужили основой для выявления проблемных зон, требующих повышенного внимания, и участков с устойчивым состоянием растительности, выполняющих важные экологические функции в структуре городской среды.

Таким образом, разработанная методика комплексной оценки физиологического состояния растительности, основанная на интеграции пространственного анализа карт NDVI и анализа временных рядов индекса, обеспечивает всестороннюю характеристику состояния растительного покрова и служит методической основой для последующей геоинформационной оценки растительности Ботанического сада г. Алматы.

Предложенная методика ориентирована на практическое применение при мониторинге состояния городских зелёных насаждений и может быть адаптирована для анализа других территорий с аналогичными природно-антропогенными условиями. Использование единого методического подхода обеспечивает сопоставимость результатов и повышает информативность оценки физиологического состояния растительности.

Глава 3. Геоинформационная оценка физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы

В третьей главе представлены результаты геоинформационной оценки физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы, полученные на основе анализа вегетационного индекса NDVI. Рассматриваются особенности пространственного распределения значений индекса для отдельных репрезентативных лет, а также анализируется динамика изменения физиологического состояния растительного покрова во времени.

Оценка выполнена с использованием спутниковых данных Sentinel-2 и единой методики расчёта и интерпретации NDVI, что обеспечивает сопоставимость результатов и позволяет выявить пространственные различия состояния растительности в пределах исследуемой территории. Полученные результаты направлены на выявление зон с различным уровнем физиологического состояния растительного покрова и определение общих тенденций его изменения.

Геоинформационный анализ, основанный на интерпретации карт пространственного распределения значений NDVI и результатов анализа их сезонной и многолетней динамики, позволяет получить целостное представление о физиологическом состоянии растительного покрова Ботанического сада г. Алматы. Такой подход обеспечивает выявление как устойчивых, так и проблемных участков растительности и создаёт основу для детального рассмотрения пространственных особенностей распределения значений NDVI за отдельные репрезентативные годы.

3.1. Пространственное распределение значений NDVI в 2019, 2021 и 2023 гг.

Пространственное распределение значений вегетационного индекса NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы анализировалось *отдельно для весеннего и осеннего периодов* 2019, 2021 и 2023 гг., что позволило учесть сезонные особенности вегетационного цикла растительности. Выбор указанных временных срезов и сезонного подхода обеспечил сопоставимость картографических материалов и позволил более детально выявить пространственные особенности физиологического состояния растительного покрова.

Для каждого анализируемого года были построены тематические карты распределения значений NDVI, отражающие неоднородность физиологического состояния растительного покрова в пределах исследуемой территории. Значения индекса варьировали в широком диапазоне, что указывает на наличие участков с различным уровнем развития и жизнеспособности растительности.

В весенний период значения NDVI характеризуют начальные стадии вегетации и позволяют оценить общее физиологическое состояние растительного покрова после зимнего периода. Пространственное распределение значений NDVI в весенний период 2019 года представлено на рисунке 5. Анализ карты показывает преобладание участков со средними и повышенными значениями индекса, соответствующими удовлетворительному и хорошему физиологическому состоянию растительности. Пониженные значения NDVI локализуются преимущественно в зонах с разреженным растительным покровом и элементами антропогенного воздействия, что может быть связано с особенностями почвенных условий и уровнем увлажнения.

Карта NDVI весны 2019 г.

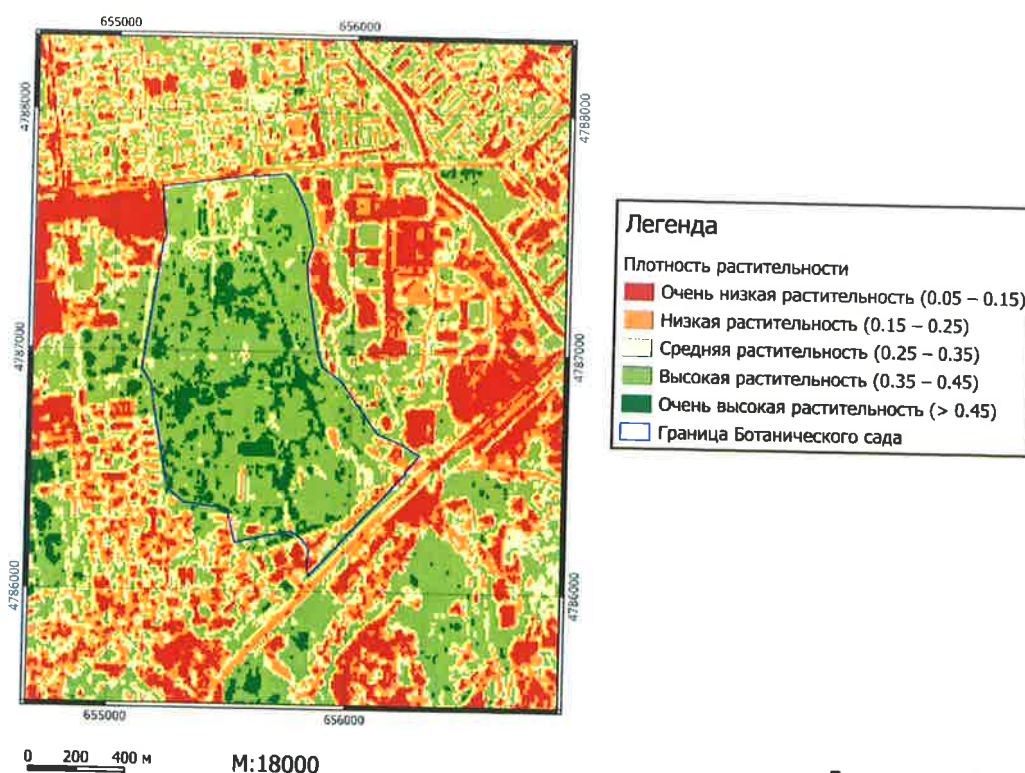


Рисунок 5 – Карта пространственного распределения значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в весенний период 2019 г.

Пространственная структура распределения значений NDVI в весенний период отражает общее состояние растительного покрова на начальном этапе вегетации и позволяет выявить зоны с различной степенью жизнеспособности растительности. Анализ весенних карт NDVI является важным этапом оценки, так как характеризует потенциал восстановления растительного покрова после зимнего периода.

Пространственное распределение значений NDVI в весенний период 2021 года представлено на рисунке 6. По сравнению с 2019 годом в структуре распределения значений индекса сохраняются общие пространственные

закономерности, однако отмечаются изменения в соотношении площадей с различными значениями NDVI. В отдельных участках фиксируется снижение значений индекса, что может свидетельствовать о временном ухудшении физиологического состояния растительности под воздействием неблагоприятных природных или антропогенных факторов.

Карта NDVI весны 2021 г.

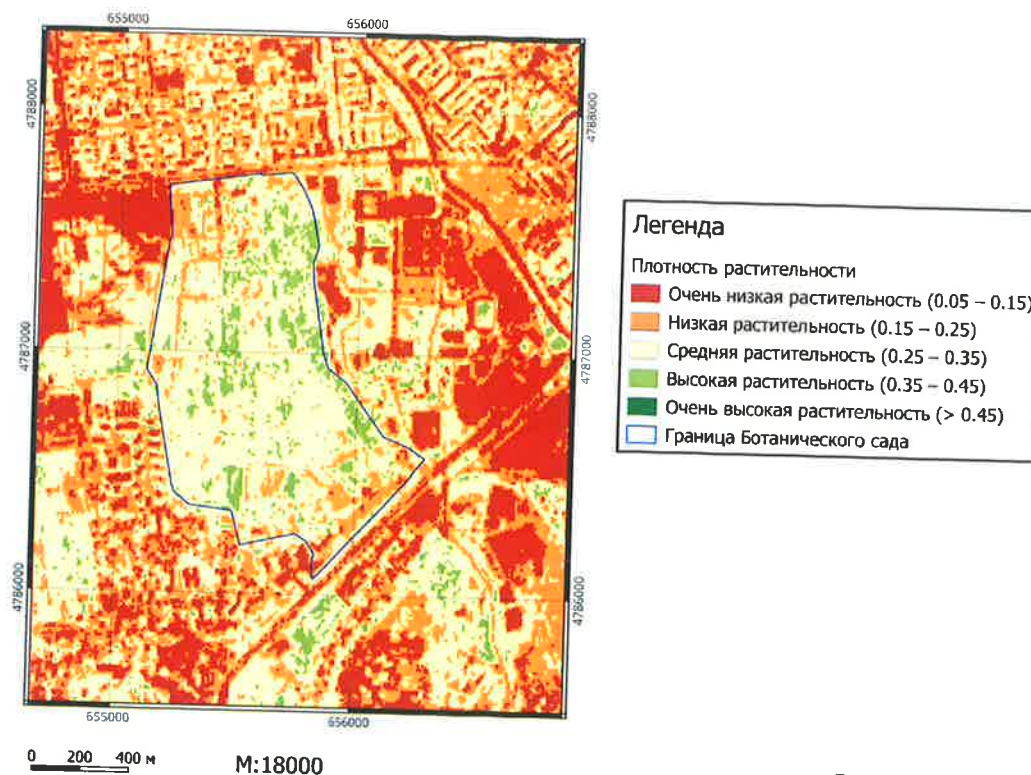


Рисунок 6 – Карта пространственного распределения значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в весенний период 2021 г.

Сравнительный анализ весенних карт NDVI за 2019 и 2021 гг. позволяет отметить сохранение общей пространственной структуры распределения значений индекса при одновременном изменении соотношения площадей с различным уровнем физиологического состояния растительности. Это свидетельствует о динамичном характере состояния растительного покрова и его чувствительности к изменяющимся природным и антропогенным условиям.

Карта NDVI за весенний период 2023 года представленная на рисунке 7 отражает наличие участков с повышенными значениями индекса по сравнению с предыдущими годами, что указывает на улучшение или восстановление физиологического состояния растительного покрова в отдельных частях территории. Вместе с тем сохраняется пространственная неоднородность значений NDVI, обусловленная различиями в типах растительности и условиях их произрастания.

Карта NDVI весны 2023 г.

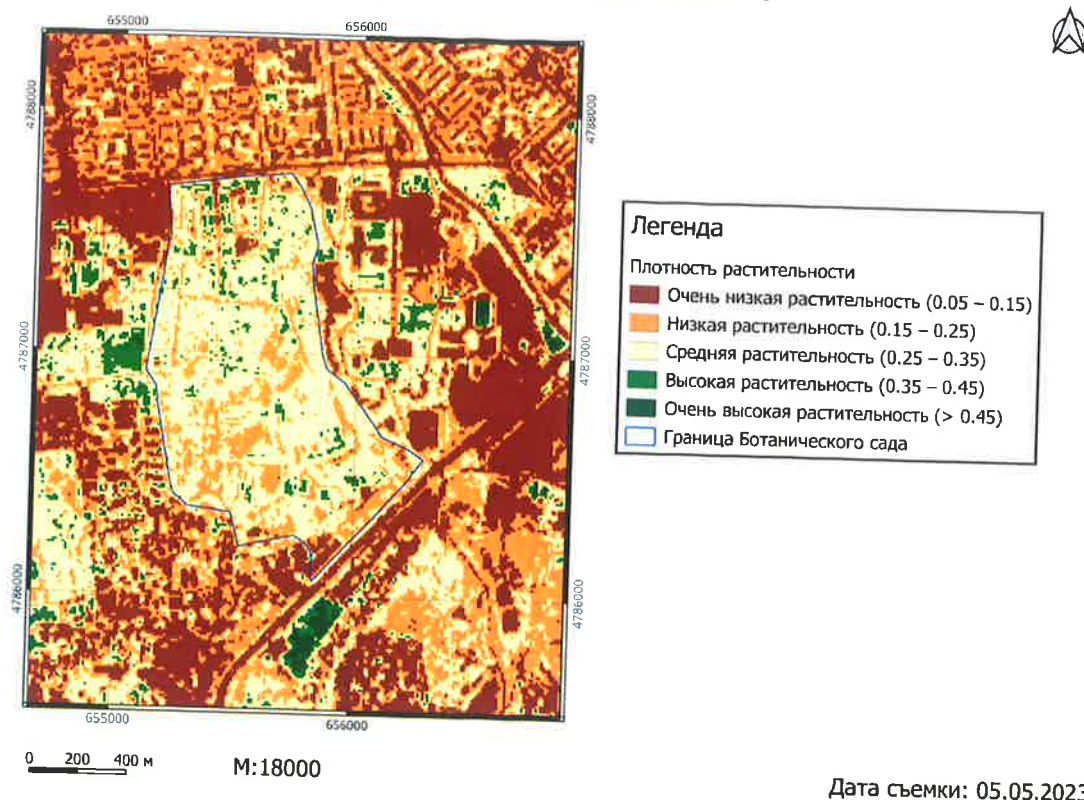


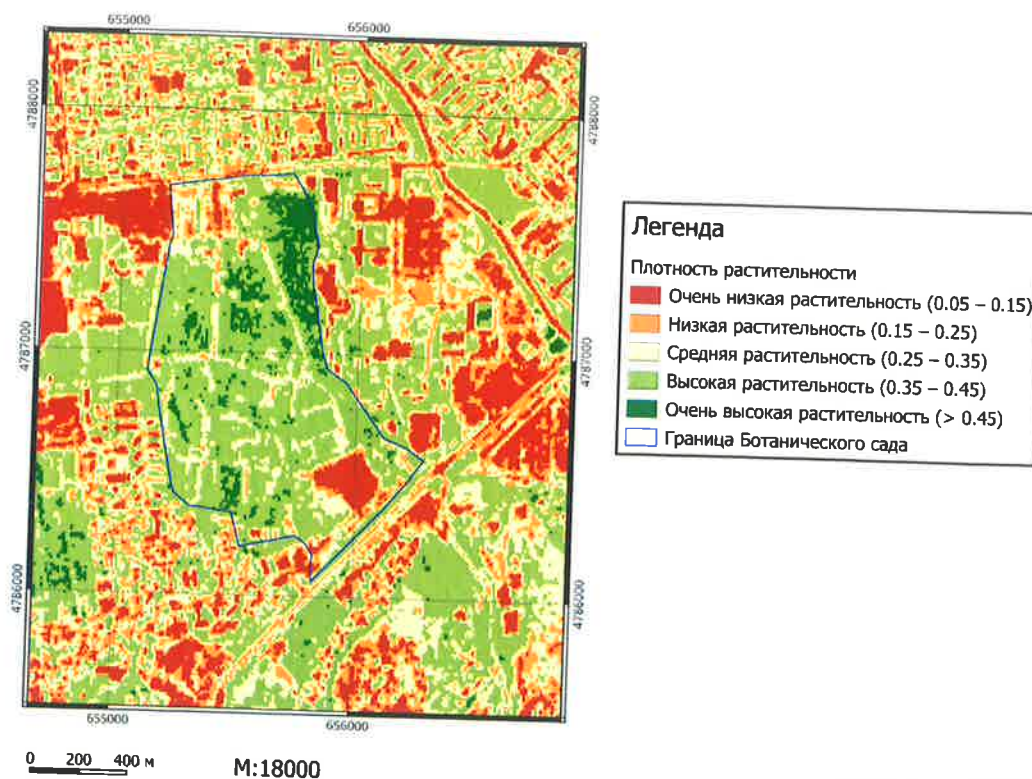
Рисунок 7 – Карта пространственного распределения значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в весенний период 2023 г.

Сопоставление карт пространственного распределения значений NDVI за весенние периоды 2019, 2021 и 2023 гг. позволяет выделить участки с относительно стабильными значениями индекса, а также зоны, характеризующиеся повышенной изменчивостью физиологического состояния растительности.

Осенний период характеризует завершающую стадию вегетационного цикла и позволяет оценить физиологическое состояние растительного покрова перед наступлением зимнего периода. Пространственное распределение значений NDVI в осенний период 2019 года представлено на рисунке 8. В сравнении с весенним периодом отмечается общее снижение значений индекса, что связано с естественным завершением вегетационных процессов. При этом сохраняются зоны с относительно высокими значениями NDVI, соответствующие участкам с устойчивым растительным покровом.

В целом анализ весенних карт NDVI за 2019, 2021 и 2023 гг. показывает наличие как устойчивых участков растительного покрова, так и зон с повышенной чувствительностью к изменяющимся условиям среды. Выявленные пространственные особенности отражают неоднородность физиологического состояния растительности и формируют основу для дальнейшего анализа сезонной динамики индекса.

Карта NDVI осени 2019 г.



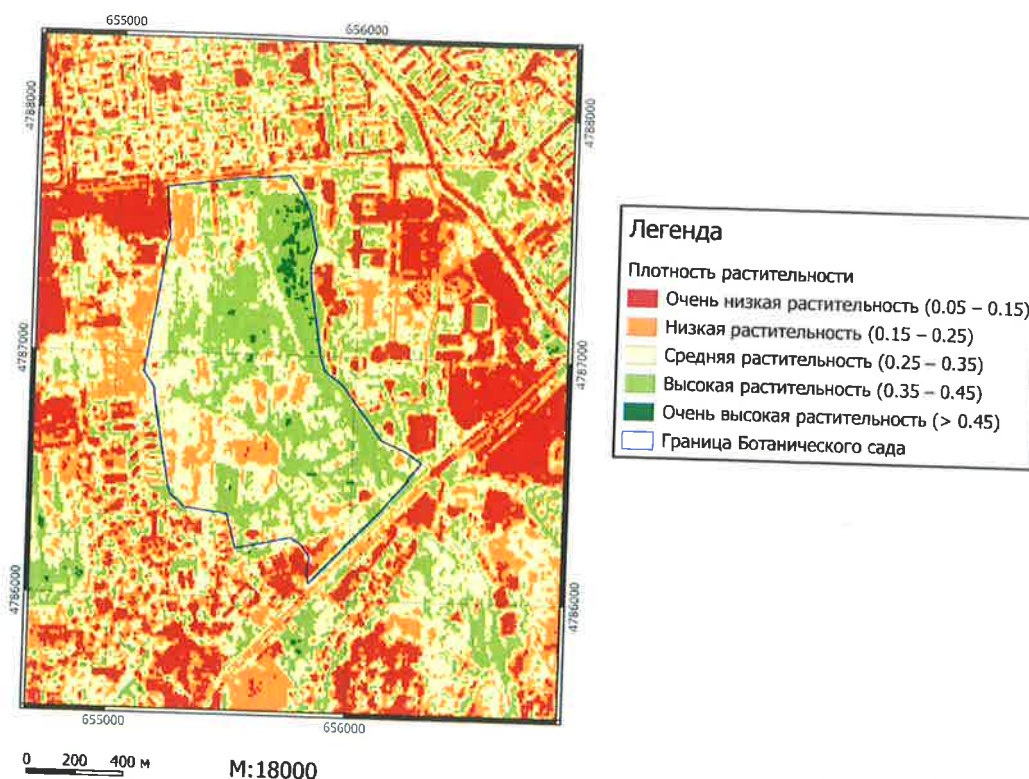
Дата съемки: 27.09.2019

Рисунок 8 – Карта пространственного распределения значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в осенний период 2019 г.

Пространственное распределение значений NDVI в осенний период 2019 года отражает общее снижение значений индекса по сравнению с весенним периодом, что соответствует завершающей стадии вегетационного цикла. При этом в пределах территории Ботанического сада сохраняются участки с относительно высокими значениями NDVI, характеризующиеся устойчивым физиологическим состоянием растительного покрова. Пониженные значения индекса преимущественно локализуются в зонах, подверженных антропогенному воздействию и сезонным стрессовым факторам.

Карта NDVI за осенний период 2021 года (см. Рис. 9) характеризуется усилением пространственной контрастности значений индекса. В ряде участков фиксируются пониженные значения NDVI, что может свидетельствовать о повышенной чувствительности растительности к сезонным стрессовым факторам и антропогенной нагрузке.

Карта NDVI осени 2021 г.



Дата съемки: 27.09.2021

Рисунок 9 – Карта пространственного распределения значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в осенний период 2021 г.

Пространственное распределение значений NDVI в осенний период 2021 года характеризуется выраженной неоднородностью физиологического состояния растительного покрова в пределах исследуемой территории. Наряду с участками, сохраняющими относительно высокие значения индекса, фиксируются зоны со сниженным уровнем NDVI, что может быть связано с усилением сезонных стрессовых факторов и антропогенного воздействия. Такая структура распределения отражает переходный характер состояния растительности в завершающей фазе вегетационного периода.

Пространственное распределение значений NDVI в осенний период 2023 года представлено на рисунке 10. Анализ карты показывает сохранение участков с повышенными значениями индекса, что указывает на относительно устойчивое физиологическое состояние растительного покрова в завершающей фазе вегетационного цикла. Одновременно выявляются зоны с пониженными значениями NDVI, отражающие неоднородность состояния растительности в пределах исследуемой территории.

Карта NDVI осени 2023 г.

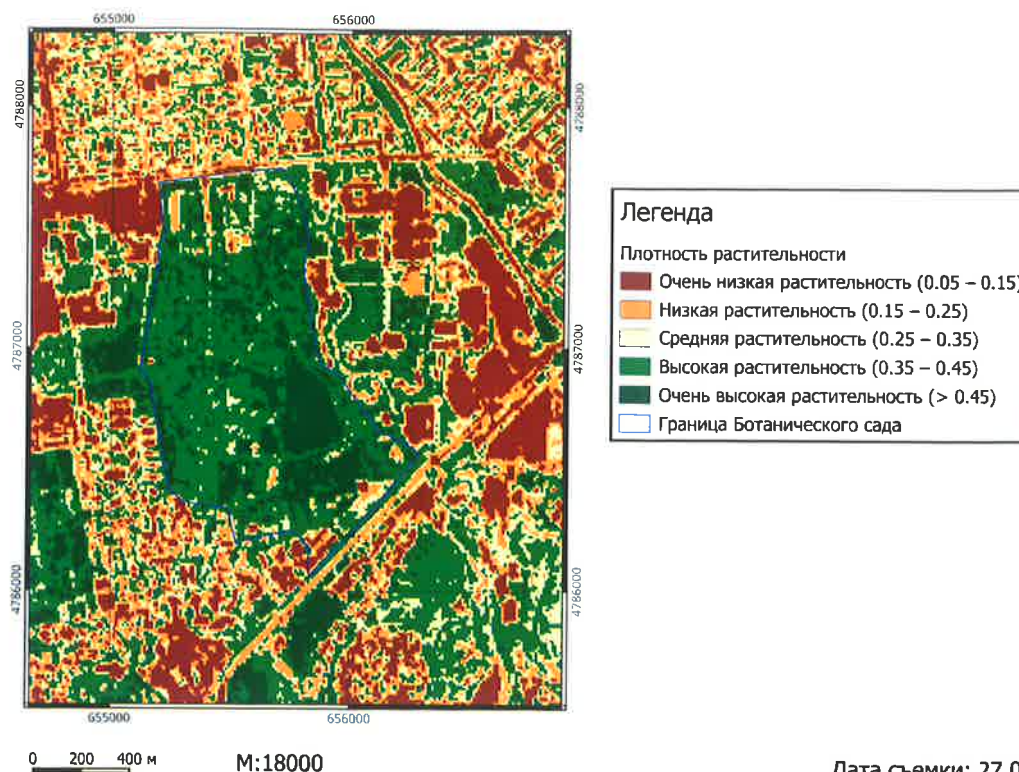


Рисунок 10 – Карта пространственного распределения значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в осенний период 2023 г.

Сравнительный анализ пространственного распределения значений NDVI в весенний и осенний периоды 2019, 2021 и 2023 гг. позволяет выявить сезонные особенности физиологического состояния растительного покрова и различия в степени выраженности пространственной неоднородности. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования сезонного подхода при геоинформационной оценке состояния растительности Ботанического сада г. Алматы и создают основу для дальнейшего анализа динамики изменений NDVI.

Пространственное распределение значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы в 2019, 2021 и 2023 гг. характеризуется устойчивой неоднородностью, отражающей различия в физиологическом состоянии растительного покрова. В течение рассматриваемого периода сохраняются участки с преимущественно средними и повышенными значениями индекса, соответствующими удовлетворительному и хорошему состоянию растительности, наряду с зонами, где фиксируются пониженные значения NDVI. Выявленные изменения в распределении значений индекса свидетельствуют о динамичности физиологического состояния растительности и формируют основу для дальнейшего анализа сезонной и многолетней динамики NDVI.

3.2 Анализ сезонной динамики NDVI растительного покрова

Анализ сезонной динамики вегетационного индекса NDVI позволяет оценить изменения физиологического состояния растительного покрова во времени и выявить пространственные особенности его трансформации. В отличие от анализа статического распределения значений NDVI, рассмотренного в пункте 3.1, анализ динамики направлен на выявление направлений и интенсивности изменений растительности в пределах исследуемой территории.

Для оценки сезонной динамики физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы были построены карты динамики значений NDVI для 2019, 2021 и 2023 гг., отражающие пространственное распределение положительных и отрицательных изменений индекса. Использование карт динамики позволяет выявить зоны улучшения и ухудшения состояния растительного покрова, а также оценить неоднородность изменений в пределах анализируемых периодов.

Сравнительный анализ карт сезонной динамики NDVI позволяет оценить направленность изменений физиологического состояния растительного покрова между весенним и осенним периодами, а также выявить участки с устойчивыми и неустойчивыми тенденциями развития растительности. Такой подход обеспечивает более глубокое понимание процессов трансформации растительного покрова в пределах исследуемой территории.

Карта динамики значений NDVI за 2019 год представлена на рисунке 11. Анализ данной карты показывает наличие участков с положительной динамикой значений индекса, что свидетельствует об улучшении физиологического состояния растительности в пределах отдельных функциональных зон территории. Одновременно выявляются зоны с отрицательной динамикой NDVI, указывающие на возможное ухудшение состояния растительного покрова, что может быть связано с природными условиями, особенностями увлажнения или антропогенным воздействием.

Выявленные особенности динамики NDVI за 2019 год служат основой для последующего сопоставления с результатами анализа сезонных изменений индекса в последующие годы. Это позволяет оценить устойчивость выявленных тенденций и степень их повторяемости во времени.

Анализ сезонной динамики NDVI за 2019, 2021 и 2023 гг. свидетельствует о неоднородности и изменчивости физиологического состояния растительного покрова Ботанического сада г. Алматы. Выявленные закономерности подчёркивают значимость учёта сезонного фактора при оценке состояния растительности и дополняют результаты пространственного анализа, представленные в предыдущем подразделе.

Карта динамики NDVI (весна — осень 2019 г.)

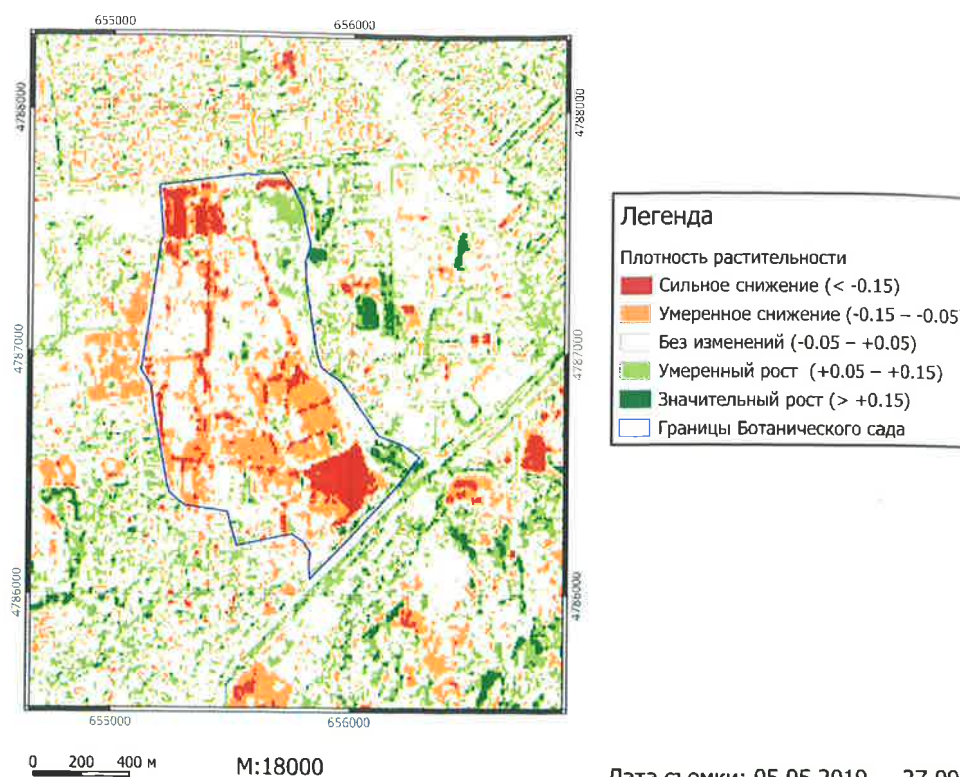


Рисунок 11 — Карта динамики значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за 2019 г.

Карта динамики значений NDVI за период весна–осень 2019 года отражает пространственную неоднородность изменений физиологического состояния растительного покрова в пределах Ботанического сада г. Алматы. В структуре распределения динамики индекса выделяются участки как с положительными, так и с отрицательными изменениями NDVI, что свидетельствует о разнонаправленных процессах, протекающих в растительном покрове в течение вегетационного сезона. Зоны с отрицательной динамикой могут быть связаны с воздействием сезонных климатических факторов, а также локальным антропогенным влиянием.

Пространственное распределение динамики значений NDVI за 2021 год представлено на рисунке 12. По сравнению с предыдущим периодом отмечается усиление пространственной неоднородности изменений индекса. В ряде участков фиксируется преобладание отрицательной динамики NDVI, что может свидетельствовать о повышенной чувствительности растительности к сезонным стрессовым факторам и изменению условий среды.

Карта динамики NDVI (весна — осень 2021 г.)

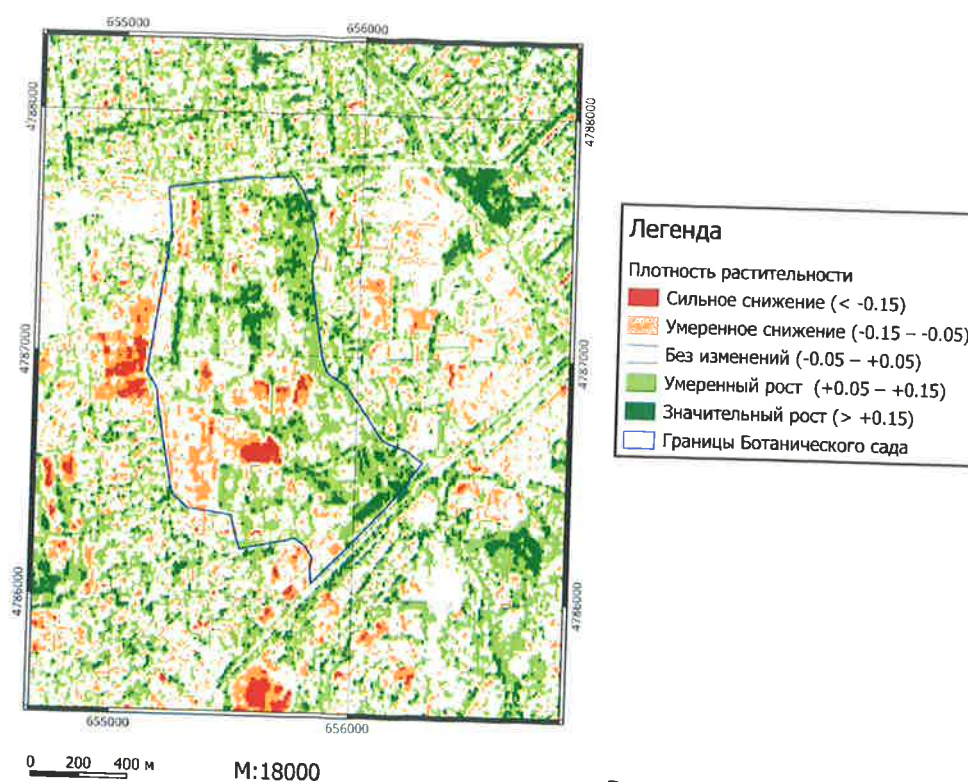


Рисунок 12 – Карта динамики значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за 2021 г.

Сопоставительный анализ карт динамики NDVI за 2019, 2021 и 2023 гг. позволяет выявить устойчивые зоны с преимущественно положительной или отрицательной направленностью изменений индекса, а также участки с высокой изменчивостью физиологического состояния растительного покрова. Полученные результаты подтверждают пространственную неоднородность сезонной динамики растительности и подчёркивают необходимость комплексного подхода к оценке её состояния с использованием как статических карт распределения NDVI, так и карт динамики индекса.

Карта динамики значений NDVI за 2023 год (Рис. 13) характеризуется наличием участков с положительной динамикой индекса, что указывает на частичное восстановление или стабилизацию физиологического состояния растительного покрова. Вместе с тем сохраняются зоны с отрицательной динамикой NDVI, отражающие неоднородность изменений состояния растительности в пределах территории Ботанического сада г. Алматы.

Карта динамики значений NDVI за период весна–осень 2021 года отражает сочетание участков с положительной и отрицательной направленностью изменений индекса. В пределах исследуемой территории сохраняются зоны со стабильным или умеренно положительным изменением NDVI, что указывает на относительную устойчивость физиологического состояния растительного покрова.

Карта динамики NDVI (весна — осень 2023 г.)

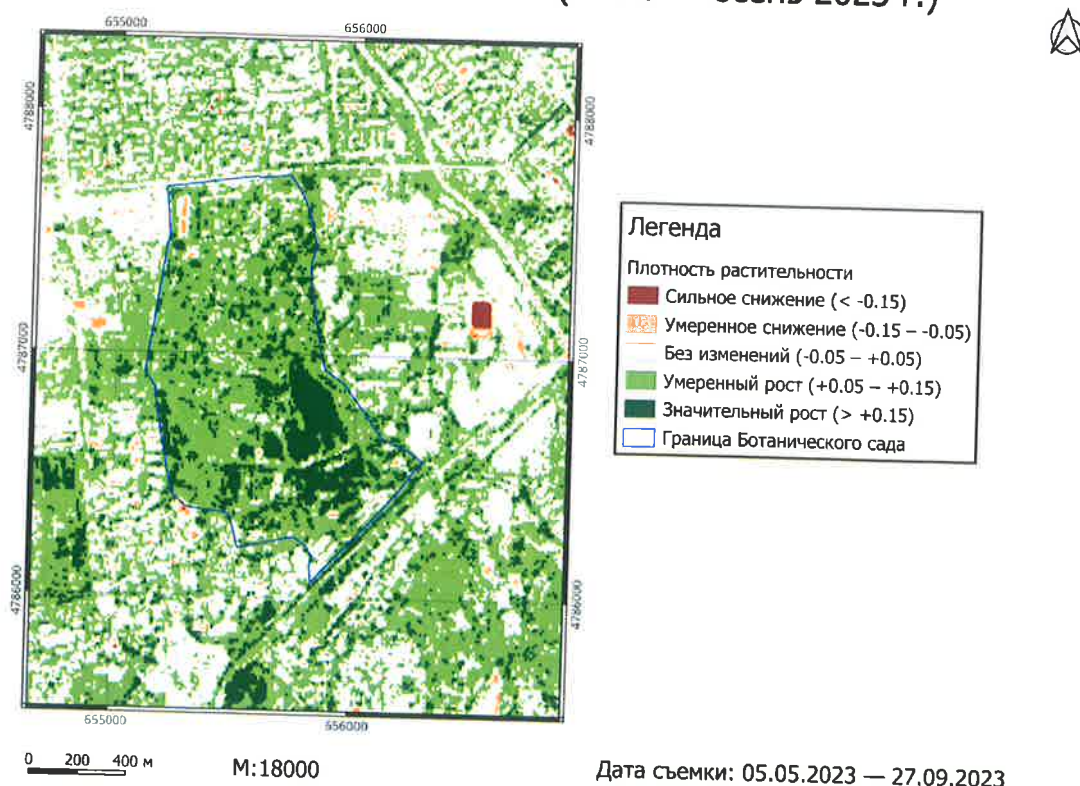


Рисунок 13 – Карта динамики значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за 2023 г.

Сопоставительный анализ карт динамики NDVI за 2019, 2021 и 2023 гг. позволяет выявить устойчивые зоны с преимущественно положительной или отрицательной направленностью изменений индекса, а также участки с высокой изменчивостью физиологического состояния растительного покрова. Полученные результаты подтверждают пространственную неоднородность сезонной динамики растительности и подчёркивают необходимость комплексного подхода к оценке её состояния с использованием как статических карт распределения NDVI, так и карт динамики индекса.

3.3 Многолетние изменения NDVI по данным временных рядов

Анализ многолетних изменений значений вегетационного индекса NDVI позволяет выявить общие тенденции изменения физиологического состояния растительного покрова Ботанического сада г. Алматы за длительный период наблюдений. В отличие от картографического анализа распределения и динамики NDVI, рассмотренных в пунктах 3.1 и 3.2, анализ временных рядов направлен на оценку направленности и устойчивости изменений растительности во времени.

Для исследования многолетних изменений NDVI использовались временные ряды значений индекса за период 2013–2022 гг., сформированные на основе спутниковых данных и обработанные с применением единой методики.



Использование временных рядов позволило проследить изменение средних значений NDVI, а также оценить межгодовую вариабельность показателей физиологического состояния растительности. Динамика средних значений NDVI за период 2013–2022 гг. представлена на рисунке 14.

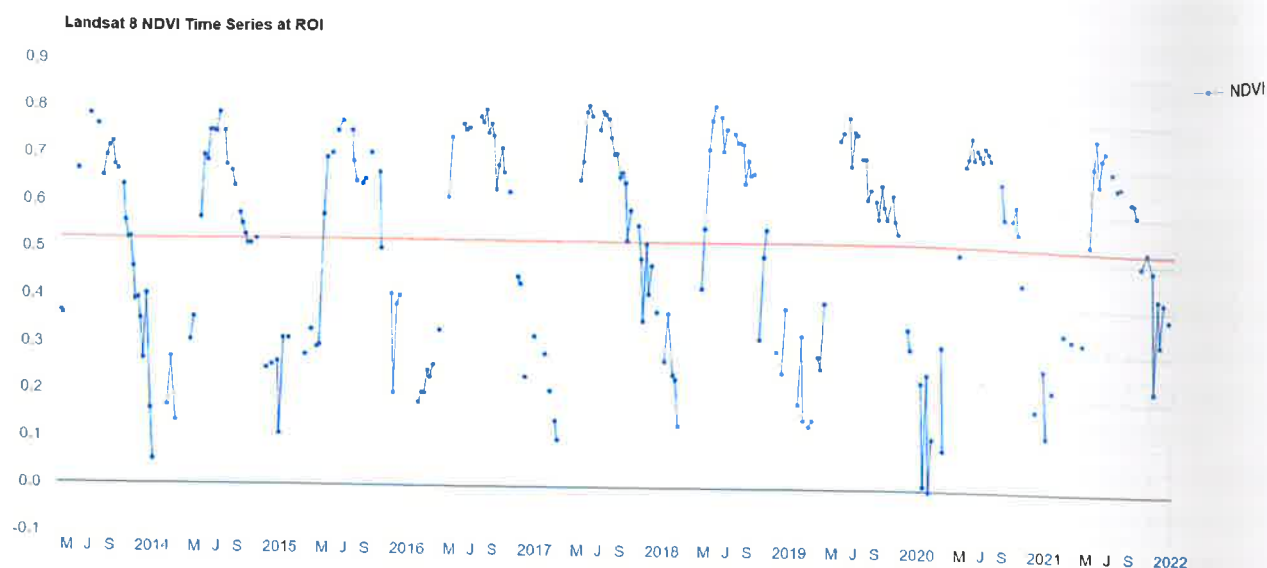


Рисунок 14 – График изменения средних значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за период 2013–2022 гг.

Для выявления общей тенденции изменения физиологического состояния растительного покрова и сглаживания краткосрочных колебаний временного ряда было выполнено моделирование сложных временных рядов NDVI. Результаты моделирования временного ряда NDVI представлены на рисунке 15.

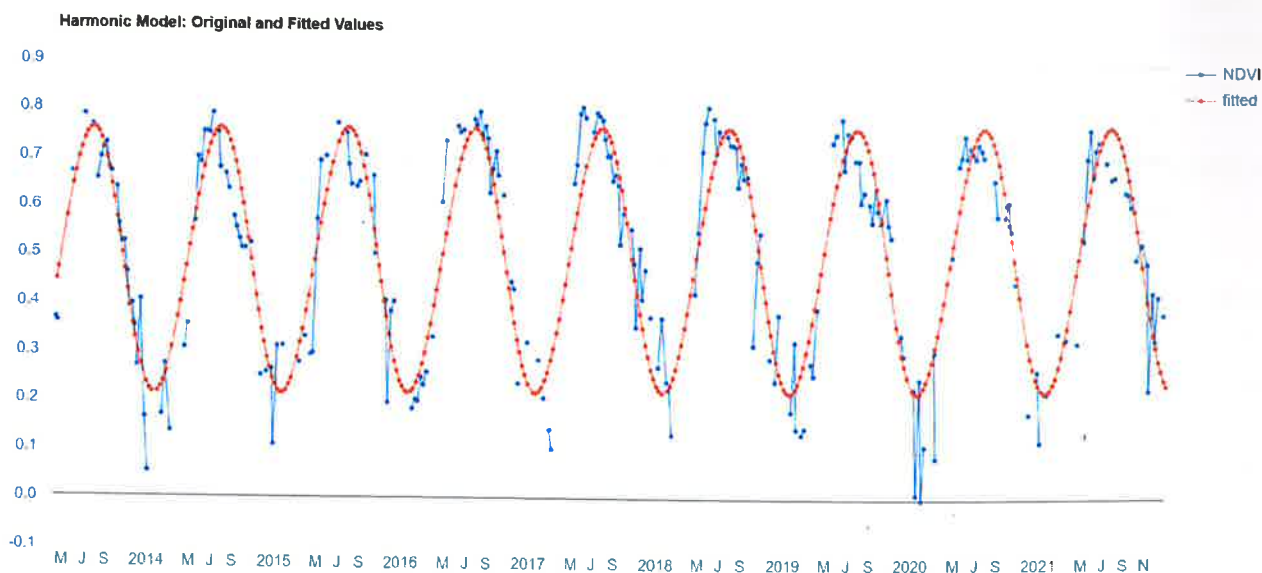


Рисунок 15 – График моделирования сложных временных рядов NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за период 2013–2022 гг.

Анализ временных рядов NDVI показал, что значения индекса характеризуются выраженной межгодовой изменчивостью, обусловленной совокупным влиянием природно-климатических условий и антропогенных факторов. В отдельные годы наблюдаются периоды повышения значений NDVI, свидетельствующие об улучшении физиологического состояния растительного покрова, в то время как в другие периоды фиксируется снижение индекса, указывающее на возможное ослабление вегетационных процессов.

Сопоставление результатов анализа временных рядов с картографическими материалами за 2019, 2021 и 2023 гг. позволяет установить согласованность выявленных тенденций. Годы, для которых по данным временных рядов фиксируются относительно повышенные значения NDVI, в целом характеризуются наличием участков с положительной динамикой индекса и более благоприятным физиологическим состоянием растительности. Напротив, периоды снижения средних значений NDVI находят отражение в пространственном распределении зон с отрицательной динамикой индекса.

Полученные результаты анализа многолетних изменений NDVI свидетельствуют о неоднородности и динамичности физиологического состояния растительного покрова Ботанического сада г. Алматы и подчёркивает целесообразность использования комплексного геоинформационного подхода, сочетающего анализ временных рядов, пространственного распределения и динамики значений NDVI при оценке состояния растительности.

Таким образом, анализ временных рядов NDVI в сочетании с картографическими материалами позволяет не только выявить общие тенденции изменения физиологического состояния растительного покрова, но и оценить устойчивость выявленных закономерностей во времени. Полученные результаты формируют основу для последующей комплексной оценки состояния растительности и выявления зон с различной степенью устойчивости.

3.4 Оценка состояния растительности и выявление зон деградации и устойчивого развития

Комплексная геоинформационная оценка физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы, выполненная на основе анализа пространственного распределения значений NDVI, сезонной динамики индекса и многолетних временных рядов, позволила выявить пространственные и временные особенности состояния растительного покрова исследуемой территории [15].

Результаты анализа пространственного распределения значений NDVI за весенние и осенние периоды 2019, 2021 и 2023 гг. показали выраженную неоднородность физиологического состояния растительности. На территории Ботанического сада выделяются участки с устойчиво средними и повышенными значениями NDVI, характеризующиеся относительно

благоприятным состоянием растительного покрова, а также зоны с пониженными значениями индекса, свидетельствующие о сниженной жизнеспособности растительности и повышенной чувствительности к внешним воздействиям.

Анализ карт динамики NDVI позволил выявить зоны с различной направленностью изменений физиологического состояния растительности. Участки с преимущественно положительной динамикой индекса могут быть отнесены к зонам устойчивого развития растительного покрова, тогда как территории, характеризующиеся устойчивой отрицательной динамикой NDVI, могут рассматриваться как потенциальные зоны деградации.

Пространственное распределение выявленных зон отражает различную реакцию растительного покрова на сочетание природных условий и антропогенной нагрузки. Это подчёркивает необходимость дифференцированного подхода к оценке состояния растительности и учёта локальных особенностей территории при интерпретации значений NDVI.

Пространственное распределение таких зон указывает на неодинаковую реакцию растительности на природные условия и антропогенную нагрузку в пределах исследуемой территории.

Результаты анализа многолетних временных рядов NDVI за период 2013–2022 гг. дополняют картографические материалы и подтверждают выявленные закономерности. Межгодовая вариабельность значений индекса отражает динамичность физиологического состояния растительного покрова, при этом прослеживается согласованность общих тенденций изменения NDVI с результатами пространственного анализа и карт динамики для репрезентативных лет.

Выделение зон деградации и устойчивого развития растительного покрова позволяет перейти от качественной оценки состояния растительности к практическим рекомендациям по её сохранению и восстановлению.

Проведённая геоинформационная оценка позволяет выделить на территории Ботанического сада г. Алматы участки с относительно стабильным физиологическим состоянием растительности, зоны устойчивого развития, а также территории, требующие повышенного внимания в связи с признаками ухудшения состояния растительного покрова. Полученные результаты могут быть использованы в качестве научной основы для мониторинга состояния растительности, планирования природоохранных мероприятий и обоснования управленческих решений, направленных на сохранение и устойчивое развитие зелёных насаждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации была проведена комплексная геоинформационная оценка физиологического состояния растительности Ботанического сада г. Алматы на основе анализа вегетационного индекса NDVI с использованием данных дистанционного зондирования Земли. В рамках исследования решены поставленные задачи и достигнута цель работы, заключающаяся в оценке пространственных и временных особенностей состояния растительного покрова исследуемой территории.

Анализ теоретических и методологических основ применения вегетационных индексов показал, что индекс NDVI является информативным и широко применяемым показателем, позволяющим оценивать физиологическое состояние растительности, выявлять пространственную неоднородность растительного покрова и анализировать его динамику во времени. Рассмотрение отечественных и зарубежных исследований подтвердило актуальность использования NDVI для мониторинга состояния растительности в условиях городской среды.

В практической части исследования разработана и реализована методика обработки спутниковых данных Sentinel-2 на платформе Google Earth Engine, включающая формирование сезонных композитов, расчёт значений NDVI и последующий геоинформационный анализ полученных данных. Применение единого подхода к обработке обеспечило сопоставимость результатов для различных периодов наблюдений.

Анализ пространственного распределения значений NDVI за весенние и осенние периоды 2019, 2021 и 2023 гг. выявил выраженную неоднородность физиологического состояния растительного покрова Ботанического сада г. Алматы. На территории сада выделяются участки с устойчиво средними и повышенными значениями NDVI, соответствующие относительно благоприятному состоянию растительности, а также зоны с пониженными значениями индекса, характеризующиеся сниженной жизнеспособностью и повышенной чувствительностью к внешним воздействиям.

Исследование сезонной динамики NDVI показало, что изменения физиологического состояния растительного покрова носят разнонаправленный характер и зависят как от природно-климатических условий, так и от антропогенной нагрузки. Анализ карт динамики индекса позволил выделить участки с положительной и отрицательной направленностью изменений NDVI, что послужило основой для их отнесения к зонам устойчивого развития и потенциальной деградации.

Анализ многолетних временных рядов NDVI за период 2013–2022 гг. показал выраженную межгодовую изменчивость значений индекса и наличие общих тенденций изменения физиологического состояния растительного покрова. Сопоставление результатов анализа временных рядов с картографическими материалами за репрезентативные годы подтвердило

согласованность выявленных закономерностей и целесообразность комплексного геоинформационного подхода.

Полученные в ходе исследования результаты пространственного и временного анализа NDVI позволили рассмотреть состояние растительного покрова Ботанического сада г. Алматы как динамичную систему, изменяющуюся под воздействием природных и антропогенных факторов. Комплексное использование карт распределения значений индекса, карт сезонной динамики и временных рядов обеспечило целостность оценки и повысило достоверность интерпретации выявленных закономерностей.

Проведённое исследование показало, что использование вегетационного индекса NDVI в сочетании с геоинформационным анализом является эффективным инструментом для оценки физиологического состояния растительного покрова в условиях городской среды. Применение комплексного подхода, включающего анализ пространственного распределения значений индекса, сезонной динамики и многолетних временных рядов, позволяет получить обоснованные и сопоставимые результаты при мониторинге состояния зелёных насаждений.

В результате проведённого исследования на территории Ботанического сада г. Алматы выделены участки с относительно стабильным физиологическим состоянием растительности, зоны устойчивого развития, а также территории, требующие повышенного внимания в связи с признаками ухудшения состояния растительного покрова. Полученные результаты могут быть использованы в качестве научной основы для мониторинга состояния зелёных насаждений, планирования природоохранных мероприятий и обоснования управленческих решений, направленных на сохранение и устойчивое развитие растительного покрова Ботанического сада г. Алматы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. — New York: John Wiley & Sons, 2015. — 736 p.
2. Turner B.L., Cohen J.E. Remote Sensing of Environment. — Cambridge: Cambridge University Press, 2014. — 512 p.
3. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings of the Third ERTS Symposium. — 1974. — P. 309–317.
4. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. — 1979. — Vol. 8. — P. 127–150.
5. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. — 1988. — Vol. 25. — P. 295–309.
6. 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. — P. 257–266.
7. Pettorelli N. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). — Oxford: Oxford University Press, 2013. — 224 p.
8. Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9(6). — P. 1–25.
9. 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.
10. Sentinel-2 User Handbook. — European Space Agency (ESA), 2015.
11. Sentinel-2 MSI Level-2A Product Definition. — European Space Agency (ESA), 2021.
12. Copernicus Open Access Hub. — Official documentation. — <https://scihub.copernicus.eu>
13. Google Earth Engine Documentation. — <https://developers.google.com/earth-engine>
14. Кодекс Республики Казахстан «О земле» от 20 июня 2003 года № 442.
15. Официальный портал нормативных правовых актов Республики Казахстан. — <https://adilet.zan.kz>
16. Сушкова В.Г. Геоинформационная оценка здоровья растительности ботанического сада г. Алматы с использованием NDVI // Современные научные исследования и инновации. 2025. № 12
17. Сушкова В.Г. Геоинформационный анализ влияния урбанизации на растительный покров Ботанического сада г. Алматы с использованием NDVI // Молодой учёный. 2025. № 43 (594). С. 42–47.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Фрагменты авторского кода Google Earth Engine, использованного для расчёта NDVI

```
44 // === 1. Создаём Feature из геометрии ===
45 var gardenFeat = ee.Feature(polygons).set("zone", "garden");
46 var garden = ee.FeatureCollection([gardenFeat]);
47
48 // === 2. Простые буферы ===
49 var buffer100 = ee.FeatureCollection([ee.Feature(gardenFeat.geometry().buffer(100)).set("zone", "100m")]);
50 var buffer300 = ee.FeatureCollection([ee.Feature(gardenFeat.geometry().buffer(300)).set("zone", "300m")]);
51 var buffer500 = ee.FeatureCollection([ee.Feature(gardenFeat.geometry().buffer(500)).set("zone", "500m")]);
52
53 var zones = garden.merge(buffer100).merge(buffer300).merge(buffer500);
54
55 function maskS2(image) {
56   var scl = image.select('SCL');
57   var mask = scl.neq(3) // cloud shadow
58     .and(scl.neq(8)) // cloud medium
59     .and(scl.neq(9)) // cloud high
60     .and(scl.neq(10)) // cirrus
61     .and(scl.neq(11)); // snow
62   return image.updateMask(mask);
63 }
```

Рисунок А.1 – Фрагмент авторского кода: маскирование облачности по слою SCL спутниковых изображений Sentinel-2

```
65 // === 3. Функция NDVI ===
66 function getNDVicol(start, end) {
67   var col = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR")
68     .filterBounds(gardenFeat.geometry())
69     .filterDate(start, end)
70     .map(maskS2)
71     .filter(ee.Filter.lt("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE", 20))
72     .select(["B4", "B8"]);
73   var composite = col.median();
74   return composite.normalizedDifference(["B8", "B4"]).rename("NDVI");
75 }
76
```

Рисунок А.2 – Фрагмент авторского кода Google Earth Engine: загрузка спутниковых данных Sentinel-2 и расчёт вегетационного индекса NDVI

```
77 // === 4. NDVI весна и осень 2023 ===
78 var ndviSpring = getNDVicol("2023-03-01", "2023-05-31");
79 var ndviAutumn = getNDVicol("2023-09-01", "2023-11-30");
80 var ndviDiff = ndviAutumn.subtract(ndviSpring).rename("NDVI_Diff");
81
```

Рисунок А.3 – Фрагмент авторского кода: расчёт сезонных различий вегетационного индекса NDVI

МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2072-0297

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



16+

43 2025
ЧАСТЬ I

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Власенко И. С.**
Интерактивная визуализация алгоритмов
оптимизации с помощью JavaScript 1
- Ульбрихт О. И., Есенбаева Г. А.**
О наилучших приближениях периодических
функций по гармоническим интервалам 4

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Борисова Н. О.**
Учет информации в оперативной дежурной
смене (на примере Центра управления
в кризисных ситуациях Главного управления
МЧС России по Алтайскому краю) 8
- Бызова Н. С.**
Разработка мобильного приложения
«Теремок» для улучшения коммуникации
родителей и педагогов детского сада 10
- Моряков А. В.**
Оценка рисков при эксплуатации уязвимого
и устаревшего программного обеспечения
в автоматизированных системах управления
технологическими процессами 13
- Прокопьев С. Е.**
Разработка модели управления
эффективностью обмена корпоративной
информацией в малом бизнесе автосервисов ... 15
- Прокопьев С. Е.**
Методы и модели управления
эффективностью обмена корпоративной
информацией в малом бизнесе 18
- Рыспаев Р. С.**
Применение искусственного интеллекта
в прогнозировании киберугроз:
сравнительный анализ методов
предиктивной аналитики 22

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Антовоьяк А. А.**
Обзор инструментария системного
инжиниринга на практическом примере
разработки автоматизированной системы
управления инцидентами по качеству
металлургического предприятия 25
- Маношкин В. В.**
Системный подход к выбору оптимальной
технологии обработки пазов дисков
газотурбинных двигателей 29
- Ниязов А. И.**
Оборудование, используемое для
комплексного метода защиты от коррозии
на месторождениях с содержанием
сероводорода 32
- Петров А. В.**
Выбор межсоединения: переходная
плата или кабельное решение для
высокоскоростных схем 40
- Сушкова В. Г.**
Геоинформационный анализ влияния
урбанизации на растительный
покров Ботанического сада г. Алматы
с использованием NDVI 42

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Алексеев Е. С.**
Методы повышения точности прогноза
стоимости реализации объекта на стадии
концептуального проектирования 47

МЕДИЦИНА

- Беркелиева М. М., Ишангулыев И.**
Индекс округлости тела в диагностике
метаболического синдрома и неалкогольной
жировой болезни печени 53
- Овеляев К. Р., Реджепгельдиев А. В.**
Особенности метода аутотрансплантации
при повреждениях селезенки 55

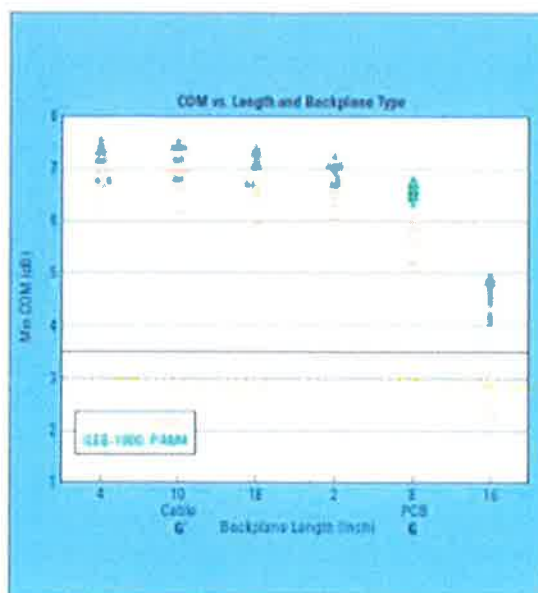


Рис. 4. Канальные модели

В модели портов 800 GbE каждая линия выступает жертвой, а семь других — агрессорами. На рисунке 4 зелеными точками обозначены CEE-112G-LR-PAM4, оранжевыми — IEEE 802.3-400GBASE-KR4; три графика слева — кабельная объединительная плата (G), справа — печатная (G).

При росте скорости передачи запас уменьшается, что видно на графиках. Кабельная плата длиной 4 дюйма почти не уступает печатной длиной 2 дюйма по производительности и показывает стабильный COM на длинах 4, 10 и 18 дюймов. Печатная плата теряет способность SERDES компенсировать потери и помехи на каналах длиннее 8 дюймов. Для 8- и 16-дюймовых плат разница

в COM между скоростями 100G и 112G становится более выраженной. При 112G PAM4 на 16-дюймовой плате COM отрицательный, несмотря на запас относительно предельной линии потерь OIF CEE-112-LR.

Ранее запас в 6 дБ (см. рисунок 3) позволял завершать разработку с уверенностью в незначительности ошибок. Для скоростей 112G и выше это уже недостаточно: требуется учитывать системные многополосные эффекты и все важные участки межсоединений. Современные системы соединителей с межзатяжными и кабельно-платными вариантами позволяют оптимизировать проектирование, ускорить интеграцию и увеличить срок службы системы.

Литература:

1. Данные о продукте Samtec Twinax, URL: <https://www.samtec.com/s2s/system-optimizations/twinax-flyovers>
2. Б. Саймонвич, «Контроль электромагнитных излучений от краёв печатных плат в объединительных панелях», Signal Integrity Journal, январь 2017 г., URL: <https://www.signalintegrityjournal.com/articles/292>

Геоинформационный анализ влияния урбанизации на растительный покров Ботанического сада г. Алматы с использованием NDVI

Сушкова Варвара Геннадьевна, студент магистратуры

Научный руководитель: Байгурии Жаксыбек Джампубекович, доктор технических наук, профессор

Казахский национальный исследовательский геоинформационный университет имени К. И. Сатпаева (Satpaev University) (г. Алматы, Казахстан)

Приведены предварительные результаты оценки влияния урбанизации на состояние растительного покрова Ботанического сада города Алматы на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве основного инструмента использовался вегетационный индекс NDVI, рассчитанный по данным спутника Sentinel-2 за весну и осень 2023

люба. Рассмотрены современные методы геоинформационного анализа, примененные на платформе Google Earth Engine, для визуализации результатов и создания карт, осуществлялись в среде QGIS. На основе вездного анализа выявлены зоны, наи- более подверженные влиянию урбанизации. Полученные результаты отражают сезонную динамику растительности и по- зволяют оценить степень антропогенной нагрузки как в пределах Ботанического сада, так и на прилегающих территориях.

Ключевые слова: ботанический сад, растения, урбанизация, NDVI, Sentinel-2, научные исследования, экологическое просвещение, сохранение биоразнообразия, охрана природы, дистанционное зондирование Земли, геоинформационные си- стемы, картографирование, Google Earth Engine, QGIS.

Введение

Алматинский ботанический сад — главный ботаниче- ский сад, расположен в южной части города Алматы на высоте 856–906 метров над уровнем моря. В настоящее время площадь сада составляет 103,6 гектаров. Главным ботанический сад — особо охраняемая природная тер- ритория со статусом природоохранной и научной орга- низации, предназначенная для проведения исследований и научных разработок по охране, защите, воспроизвод- ству и использованию растительного мира, в том числе редких и находящихся под угрозой исчезновения видов растений [5].

В условиях активной урбанизации и роста антропо- генной нагрузки особенно важно проводить комплексный мониторинг состояния растительного покрова. Использо- вание данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС) позволяет оцени- вать динамику состояния растительности, выявлять зоны деградации и разрабатывать рекомендации по управ- лению зелеными территориями [1].

Современные методы геоинформационного анализа в сочетании с технологиями дистанционного зондиро- вания Земли предоставляют новые возможности для ком- плексного мониторинга экосистем и оценки состояния ра- стительности [3; 7]. Использование спутниковых данных высокого пространственного разрешения позволяет по- лучать объективную информацию о текущем состоянии и динамике изменений растительного покрова. Одним из наиболее информативных и широко применяемых ин- струментов является нормализованный разностный ве- гетационный индекс (NDVI), который позволяет количе- ственно оценивать физиологическое состояние растений и выявлять пространственные различия в их продуктив- ности на основе отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах [6; 8].

В данной статье рассматривается геоинформационная оценка состояния растительности Ботанического сада г. Алматы на основе анализа NDVI с использованием платформы Google Earth Engine. Для исследования ис- пользовались спутниковые данные Sentinel-2 за 2023 год, охватывающие весь вегетационный период [2]. Для на- глядности анализа были выбраны два репрезентативных снимка — 05.05.2023 (весенний период) и 27.09.2023 (осенний период), которые позволяют продемонстриро- вать сезонные различия в физиологическом состоянии растительности. Вместе с тем, при расчете NDVI учитыва-

лись серии изображений за оба сезона, что повышает до- стоверность оценки. Процесс анализа включал несколько этапов: выбор наиболее качественных спутниковых изо- бражений, расчет значений NDVI для территории сада, а также визуализацию полученных результатов. В рамках исследования построены карты распределения NDVI, от- ражающие пространственные изменения состояния ра- стительного покрова в разные сезоны, а также расче- тана карта разности NDVI между весенним и осенним периодами.

В ходе исследования основное внимание уделялось анализу изменений состояния растительного покрова, вы- явлению возможных причин этих изменений и их потен- циального влияния на биоразнообразие территории [3]. Для обработки данных использовалась платформа Google Earth Engine, которая обеспечила интеграцию временных рядов спутниковых изображений и автоматизацию рас- четов NDVI, что позволило повысить точность и досто- верность анализа. Использование данного подхода зна- чительно сократило время обработки больших массивов данных дистанционного зондирования. Визуализация ре- зультатов и оформление картографических материалов выполнялись в среде QGIS, что обеспечило детальное и наглядное представление пространственного распре- деления значений NDVI [7].

Цель исследования — анализ динамики растительного покрова Ботанического сада г. Алматы под влиянием ур- банизационных процессов с использованием геоинфор- мационных технологий и данных дистанционного зонди- рования Земли.

Методы исследования. Геоинформационное картогра- фирование состояния растительного покрова Ботаниче- ского сада г. Алматы выполнялось с использованием спут- никовых данных Sentinel-2 и платформа Google Earth Engine [2; 3]. Для анализа были выбраны изображения за 2023 год, охватывающие весенний и осенний периоды. На основе временных рядов снимков был рассчитан NDVI, что позволило выявить сезонные изменения состояния растительности [2].

Для анализа состояния растительности в весенний пе- риод использовались данные Sentinel-2 за весь вегетаци- онный сезон, однако для визуализации выбрана репрезен- тативная сцена от 05.05.2023 (рис. 1).

Карта отражает состояние растительного покрова в на- чале вегетационного сезона. Более высокие значения NDVI соответствуют активной фотосинтетической деятель- ности, что указывает на наличие здоровой растительности,

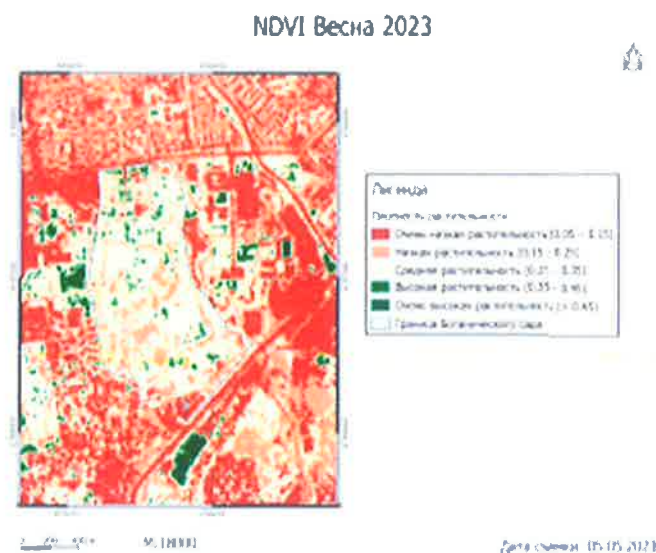


Рис. 1. Пространственное распределение значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за весенний период (05.05.2023)

тогда как низкие значения характерны для открытых почв, тропинок и антропогенно нарушенных территорий.

Преобладание жёлтых оттенков на карте весеннего периода объясняется тем, что на момент съёмки (05.05.2023) большая часть растительности находилась в стадии ранней вегетации. Листовой аппарат ещё не был полно-

стью развит, фотосинтетическая активность растений была относительно низкой, что отражается в умеренных значениях NDVI.

Аналогично, для осеннего периода использовались временные ряды спутниковых данных, а для построения карты выбрано изображение от 27.09.2023 (рис. 2).

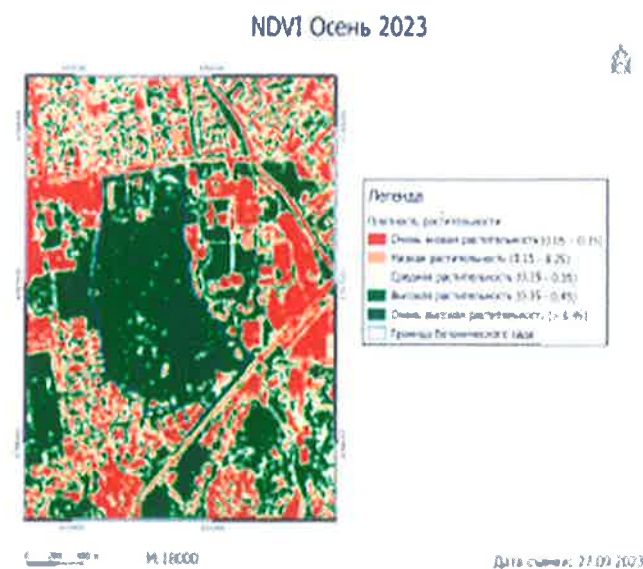


Рис. 2. Пространственное распределение значений NDVI на территории Ботанического сада г. Алматы за осенний период (27.09.2023)

В этот период значения NDVI ниже по сравнению с весной, что связано с низким развитием растительности. Карта позволяет выявить участки с максимальной биологической активностью, а также территории с пониженным уровнем вегетации, где наблюдаются признаки деградации растительного покрова.

Высокие значения NDVI и преобладание зеленых оттенков на осенней карте связаны с тем, что изображение

(27.09.2023) отражает период пика развития растительности в Алматы. В сентябре большинство древесных и кустарниковых пород сохраняют активную фотосинтетическую деятельность, что и обуславливает визуальные различия между картами весеннего и осеннего периодов.

Для выявления динамики растительности рассчитана карта разности значений NDVI между весенним и осенним периодами 2023 года (рис. 3).

Динамика NDVI (весна — осень 2023)

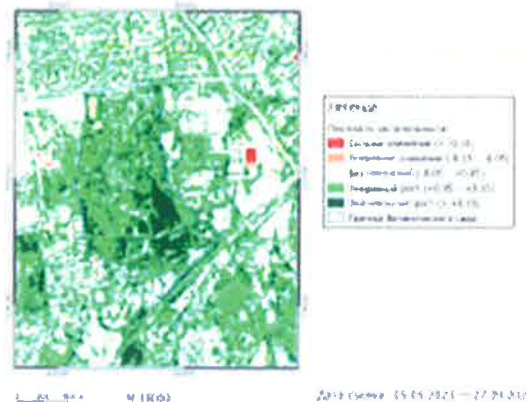


Рис. 3. Изменение значений NDVI между весенним (05.05.2023) и осенним (27.09.2023) периодами

Изменение значений индекса NDVI между весенним (05.05.2023) и осенним (27.09.2023) периодами на территории Ботанического сада г. Алматы.

Карта отражает динамику вегетации: зеленые участки показывают зоны, где в осенний период зафиксирован рост NDVI по сравнению с весной, что связано с активной фазой фотосинтеза и максимальным развитием растительности. Красные участки указывают на территории, где NDVI снизился, что может быть связано с деградацией

покрова, антропогенным воздействием либо сезонным спадом биологической активности. Белые или нейтральные оттенки соответствуют зонам без существенных изменений. Для закрепления результатов пространственного анализа и наглядного сравнения показателей NDVI по зонам было построено графическое представление данных. Такой подход позволяет не только визуализировать изменения на карте, но и количественно оценить различия между весенним и осенним периодами (рис. 4).

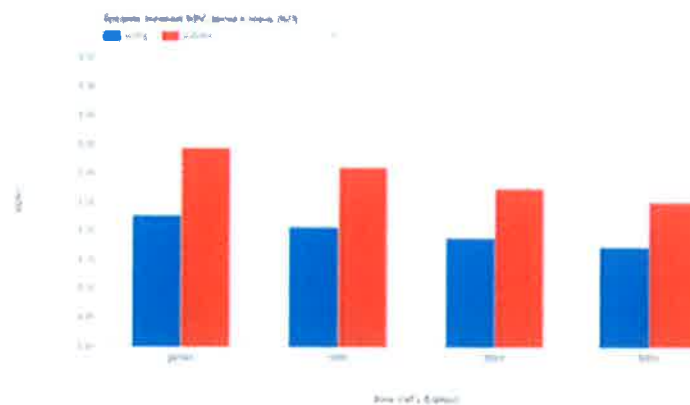


Рис. 4. Средние значения индекса NDVI в пределах Ботанического сада г. Алматы и буферных зон (100 м, 300 м, 500 м) за весенний (05.05.2023) и осенний (27.09.2023) периоды.

На графике отчётливо прослеживается закономерность: в весенний период значения NDVI составляют около 0.20-0.25 в пределах сада и постепенно снижаются до 0.18 на удалении 500 м, тогда как осенью показатели достигают 0.30-0.35 в саду и уменьшаются до 0.24 на периферии. Такая динамика объясняется фенологическими особенностями растительности: весной растения находятся в стадии активного роста, но ещё не достигли максимальной фотосинтетической активности, тогда как осенью зафиксирован её пик. Одновременно наблюдается пространственный градиент снижения NDVI от центра сада к периферийным зонам, что указывает на влияние урбанизационных факторов и более высокий уровень антропогенной нагрузки за пределами охраняемой территории.

Выводы. Использование вегетационного индекса NDVI, рассчитанного на основе спутниковых данных Sentinel-2 за 2023 год, позволило наглядно отразить сезонную динамику растительного покрова Ботанического сада города Алматы [2; 6; 8]. Весенний период характе-

ризуется умеренными значениями NDVI (0.20-0.25), что связано с ранней фазой вегетации, тогда как в осенний период индекс достигает 0.30-0.35, отражая пик фотосинтетической активности растений.

Построенные карты и результаты зональной статистики показали пространственную неоднородность состояния растительности: наиболее высокие значения NDVI отмечаются в пределах территории сада, а снижение индекса наблюдается по мере удаления в буферные зоны 100 м, 300 м и 500 м. Карта разности NDVI выявила как положительные, так и отрицательные изменения, что позволило определить участки, наиболее подверженные влиянию урбанизационных процессов.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало возможности геоинформационных технологий для мониторинга растительности и условий урбанизации. Полученные данные могут служить основой для экологического планирования, разработки природоохранных мероприятий и сохранения биоразнообразия на территории Ботанического сада [1; 7].

Литература:

1. Байгүрпін Ж. Ж., Сушкова В. Г. Геоинформационная оценка здоровья растительности Ботанического сада г. Алматы с использованием NDVI // Вестник Satbayev University. — 2024. — № 1. — С. 45–51.
2. European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook [Электронный ресурс]. — ESA, 2023. — Режим доступа: <https://dataspace.esa.int/sia/en> (дата обращения: 10.09.2025).
3. Google Earth Engine Developers. Earth Engine Data Catalog and API Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://developers.google.com/earth-engine> (дата обращения: 10.09.2025).
4. Huete A. R., Didan K., Miura T. и др. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices // Remote Sensing of Environment. — 2002. — Vol. 83. — P. 195–213.
5. Кодекс Республики Казахстан «О земле» от 20 июня 2003 г. № 442-III [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://adilet.zan.kz> (дата обращения: 10.09.2025).
6. Pettorelli N. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unraveling the Ecological Complexity Behind Remote Sensing Data // Ecological Indicators. — 2013. — Vol. 26. — P. 301–310.
7. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://qgis.org> (дата обращения: 10.09.2025).
8. Tucker C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation // Remote Sensing of Environment. — 1979. — Vol. 8. — P. 127–150.

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЗДОРОВЬЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ БОТАНИЧЕСКОГО САДА Г.АЛМАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NDVI

Сушкова Варвара Геннадьевна

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И.

Саппаева

студент магистратуры

Научный руководитель: Байгулин Жаксыбек Джакупбекович

Аннотация. Приведены предварительные результаты оценки состояния и динамики растительного мира в ботаническом саду города Алматы на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием ГИС. Рассмотрена необходимость использования современных географических информационных систем (ГИС) для анализа и мониторинга растительного покрова. Полученные результаты указывают на общее улучшение состояния растительности в саду, что связано с эффективным управлением и заботой за растениями. Отмечается активное развитие коллекции редких и экзотических растений, а также успешное восстановление и сохранение местных видов.

Ключевые слова: ботанический сад, Геоинформационные системы, дешифрирование, растения, экология

Введение

Алматинский ботанический сад – главный ботанический сад, расположен в южной части Алма-Аты на высоте 856 – 906 метров над уровнем моря. В настоящее время площадь сада составляет 103,6 гектаров. Главный ботанический сад – особо охраняемая природная территория со статусом природоохранной и научной организации, предназначенная для проведения исследований и научных разработок по охране, защите, воспроизводству и использованию растительного мира, в том числе редких и находящихся под угрозой исчезновения видов растений.

Любое строительство в ботаническом саду может привести к значительным изменениям в естественных ландшафтах, а его эксплуатация несет в себе риски, которые могут привести к локальным или даже региональным экологическим катастрофам. В условиях горного рельефа и обильных осадков высока интенсивность развития экзогенных геологических процессов, таких как эрозия и оползни. Поэтому изучение поверхности ботанического сада с помощью космической системы наблюдения – метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – представляет крайнюю важность. Дистанционное изучение земель широко используется для

решения вопросов безопасности, обороны, энергетики, использования недр и недр земли.

Современные технологии геоинформационного анализа и дистанционного зондирования земли предоставляют уникальные возможности для мониторинга экосистем, в том числе здоровья растительности в ботанических садах. Одним из эффективных инструментов для такого анализа является индекс (NDVI), который позволяет оценить физиологическое состояние растений на основе данных, полученных с космических спутников.

В данной статье рассматривается геоинформационная оценка здоровья растительности ботанического сада г.

Алматы с использованием NDVI на платформе Google Earth Engine (рис. 1). Процесс анализа включает в себя сбор данных с различных временных точек, а также их обработку и визуализацию для получения более полного представления о динамике зеленой массы.

Основной акцент делается на выявлении изменений в здоровье растительности, их причинах и воздействии на биоразнообразие ботанического сада. Использование Google Earth Engine позволяет упростить и автоматизировать процесс анализа больших объемов данных, делая исследование более эффективным и точным [3,4].



Рис. 1, а)- карта и б) вид ботанического сада г. Алматы

Цель исследования – анализ изменения состояния здоровья растительности ботанического сада г. Алматы с использованием индекса NDVI на основе геоинформационной оценки.

Методы исследования: Геоинформационное картографирование изменения состояния растительности в ботаническом саду г. Алматы на платформе Google Earth Engine за период с 2013 по 2022 гг. В ходе исследования решались следующие задачи:

– оценка изменений индекса вегетационного покрытия (NDVI) на территории ботанического сада.

– проведение анализа и картографирование изменений в растительном покрове для получения актуальной информации о состоянии изучаемого объекта.

– моделирование растительности в ботаническом саду за период с 2013–2022 гг.

Основными материалами послужили данные космических снимков Google Earth Engine в расчете индекса вегетации NDVI, главным образом для моделирования урожайности за период с 2012–2022 (рис 2) [4].

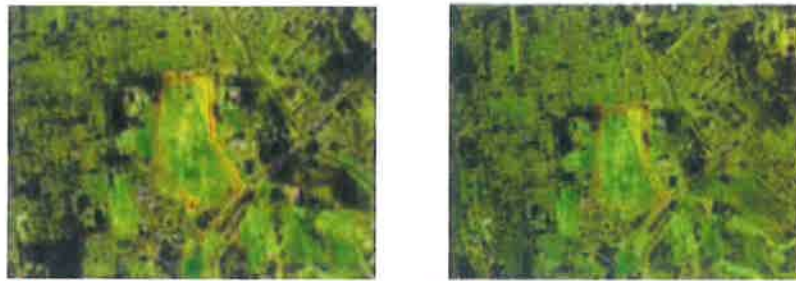


Рис.2 – Обработанные в Google Earth Engine снимки, полученные в ходе создания моделирования растительности 2013-2022 гг.

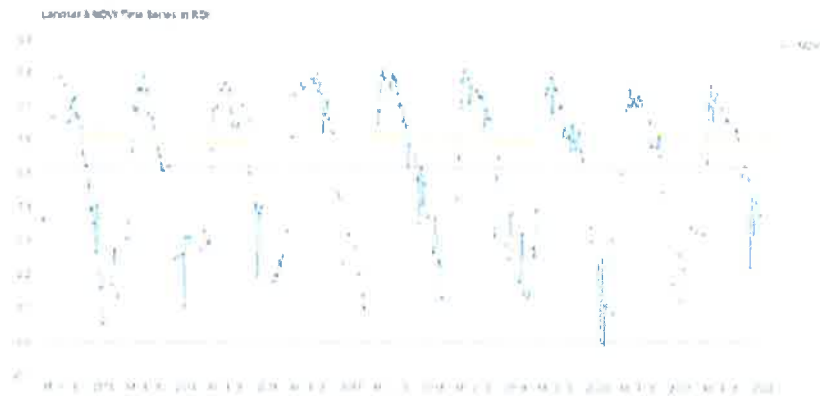


Рис.3 – График изменения растительности в ботаническом саду за период 2013-2022 гг..

На графике показана динамика данных за период 2013-2022 гг. Линия, соединяющая две точки, отображает последовательность этих данных, причем таких последовательных точек относительно немного. Заметны значительные изменения в данных, такие как восходящий тренд в период между мартом и концом апреля, а также спад в

конце августа. Каждый год отличается, что, вероятно, связано с сезонными особенностями, такими как весенние дожди и опадание листьев осенью. Общий тренд графика нисходящий, однако стоит отметить, что точка данных за февраль 2021 года может оказать существенное влияние на этот тренд [3].

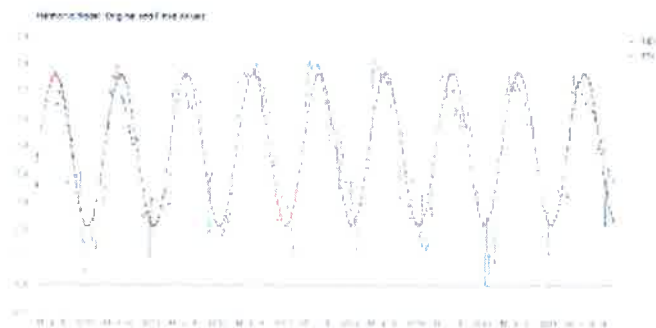


Рис.4 – График моделирования сложных временных рядов в ботаническом саду за период 2013-2022 гг..

График демонстрирует моделирование сложных временных рядов с использованием гармонической модели. Временной ряд разбит на сумму синусоид с различными частотами. Представленная модель может быть расширена путем добавления дополнительных полос, представляющих более высокие частоты, для более точного описания данных. На графике видно, что модель состоит из двух синусоид с разными частотами и амплитудами, что позволяет учесть два цикла в году. Однако модель имеет значительную погрешность и довольно неточно отражает данные. Например, она не учитывает экстремальные падения значений NDVI и несколько пиков в каждом году, которые не соответствуют модели.

По рисункам отслеживается динамика вегетационного индекса NDVI где максимальным значением является +1, минимальным значением является -1. Мы замечаем значительное изменение данных между мартом и концом апреля вероятно это связано с сезонными особенностями, такими как весенние дожди и опадание листьев осенью [1].

Проведенное моделирование сложных временных рядов с использованием гармонической модели и анализ вегетационного индекса на основе периодических космических снимков позволяют сделать следующие выводы:

1. Гармоническая модель, основанная на нескольких синусоидах с разными частотами и амплитудами, позволяет более точно описать динамику изменения

состояния растительного покрова во времени. Она отражает сезонные изменения и позволяет учитывать различные факторы, влияющие на растительность.

2. Использование вегетационного индекса на основе космических снимков дает возможность наглядно представить состояние растительного покрова и его динамику восстановления на изучаемой территории. В данном случае отмечается хорошее восстановление растительного покрова после завершения строительства зоны отдыха.

Оба метода анализа позволяют получить ценную информацию о состоянии и динамике растительного покрова, что может быть полезно для принятия решений по управлению и охране природы, а также для планирования дальнейших исследований и мероприятий по сохранению биоразнообразия.

Выводы

Использование вегетационного индекса, рассчитанного на основе периодических космических снимков, позволило наглядно представить состояние растительного покрова и динамику его восстановления в ботаническом саду города Алматы. Отмечается хорошее восстановление растительного покрова после завершения строительства зоны отдыха. Полученные данные позволяют более детально изучить изменения в растительности на территории ботанического сада и оценить эффективность мер по его сохранению и развитию.

Библиографический список

1. Лобанов Г.В., Чарочкина А.Ю., Авраменко М.В., Дроздов Н.Н. Ландшафтная интерпретация различий сезонной динамики вегетационного индекса EVI поверхности пахотных земель Брянской области // Вестн. северо-восточного федерального ун-та им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2020. – №3 (19). – С. 25–35.
2. Малинников В.А., Хатиб А. Анализ информативности зональных и индексных спутниковых изображений в детектировании деградации средиземноморских лесов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – №2 (48). – С. 47–52.

3. Баширова, Ч. Ф. Индекс NDVI для дистанционного мониторинга растительности /Ч. Ф. Баширова// Международный научный журнал Молодой ученый. 2019. № 31 (269). — 30-31с.
4. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: Учеб. пособие. – Иркутск: ИГУ, 2013. – 165 с

Примечание

Данный PDF-файл является авторским экземпляром (author's printout) и представляет собой распечатку статьи, опубликованной в электронном журнале. Официальной публикацией является версия, размещённая по адресу: <https://web.snauka.ru/issues/2025/12/103937>