

Н.Т. Шогелова^{1*}, С.А. Сартин², Ж.З. Толеубекова³

¹ Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

² Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан

³ Казахский агротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан

*e-mail: nazym-shogelova@mail.ru

АНАЛИЗ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ДАННЫХ КВАРТАЛОВ ЛЕСНИЧЕСТВА ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЛЕСНИЧЕСТВА «ДАЛЬНЕЕ»

В условиях изменения климата и роста антропогенной нагрузки особое значение приобретает мониторинг состояния лесных экосистем. Настоящее исследование направлено на оценку динамики растительного покрова лесничества «Дальнее», входящего в состав Государственного лесного природного резервата «Семей орманы» (Абайская область, Казахстан), за период 1991–2022 гг. Для анализа использовались спутниковые изображения Landsat 5, 7 и 8, на основе которых рассчитывался нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Полученные данные были интерпретированы с использованием авторской дискретной шкалы, адаптированной к структуре хвойных насаждений региона. Результаты показали значительное снижение NDVI в 1991–2010 гг., связанное с крупными лесными пожарами (в том числе в 1997 г.), и постепенное восстановление растительности в 2010–2018 гг. Однако в 2020–2022 гг. зафиксировано локальное снижение NDVI, что может быть следствием незаконных вырубок. В совокупности выявленные тенденции подчеркивают эффективность использования NDVI для дистанционного мониторинга деградации и восстановления лесов. Работа подчеркивает необходимость усиления природоохранных мер и регулярного спутникового контроля для обеспечения устойчивого управления лесными ресурсами в постпожарный и постантропогенный период.

Ключевые слова: вегетационный индекс, лесничество Дальнее, лесное хозяйство, лес, дискретная шкала.

N. Shogelova^{1*}, S. Sartin², Zh. Toleubekova³

¹International Educational Corporation, Kazakhstan, Almaty,

²North Kazakhstan University named after Manash Kozybayev, Petropavlovsk, Kazakhstan

³S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

*e-mail: nazym-shogelova@mail.ru

Analysis of vegetation data from the quarters of the “Dalnee” forestry district

In the context of climate change and increasing anthropogenic pressure, monitoring the condition of forest ecosystems is becoming particularly important. This study aims to assess the dynamics of the vegetation cover in the “Dalnee” forestry, which is part of the State Forest Nature Reserve “Semey Ormany” (Abai Region, Kazakhstan), over the period from 1991 to 2022. For the analysis, Landsat 5, 7, and 8 satellite images were used, based on which the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated. The obtained data were interpreted using a custom discrete scale adapted to the structure of coniferous stands in the region. The results showed a significant decline in NDVI during 1991–2010, associated with major forest fires (including in 1997), and a gradual recovery of vegetation from 2010 to 2018. However, in 2020–2022, a localized decrease in NDVI was recorded, which may be a result of illegal logging. Overall, the identified trends highlight the effectiveness of using NDVI for remote monitoring of forest degradation and recovery. The study emphasizes the need to strengthen conservation measures and ensure regular satellite monitoring to support sustainable forest resource management in the post-fire and post-anthropogenic period.

Key words: vegetation index, Dalnee forestry, forest management, forest, discrete scale.

Н.Т. Шогелова¹, С.А. Сартин², Ж.З. Тoleyбекова³

¹Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

²М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан

³С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

*e-mail: nazym-shogelova@mail.ru

«Дальнее» орман шаруашылығының өсімдік деректерін талдау

Климаттың өзгеруі мен антропогендік жүктеменің артуы жағдайында орман экожүйелерінің жай-күйін бақылау ерекше маңызға ие болуда. Осы зерттеу «Семей орманы» мемлекеттік орман табиғи резерватына (Абай облысы, Қазақстан) қарасты «Дальнее» орманшылығының өсімдік жамылғысының 1991–2022 жылдар аралығындағы динамикасын бағалауға бағытталған. Талдау үшін Landsat 5, 7 және 8 спутниктік суреттері қолданылып, олардың негізінде NDVI (нормаланған айырмалық вегетациялық индекс) есептелді. Алынған деректер аймақтағы қылқанжапырақты ормандардың құрылымына бейімделген авторлық дискреттік шкала арқылы интерпретацияланды. Зерттеу нәтижелері 1991–2010 жылдары NDVI көрсеткішінің айтарлықтай төмендегенін көрсетті, бұл кезеңде ірі орман өрттері (соның ішінде 1997 жылы) тіркелген. 2010–2018 жылдары өсімдіктер жамылғысының біртіндеп қалпына келгені байқалды. Алайда 2020–2022 жылдары NDVI көрсеткішінің жергілікті төмендеуі тіркеліп, бұл заңсыз ағаш кесулердің салдары болуы мүмкін. Жалпы алғанда, анықталған үрдістер орманның тозуы мен қалпына келуін қашықтықтан бақылау үшін NDVI қолданудың тиімділігін дәлелдейді. Бұл жұмыс орман ресурстарын өрттен кейінгі және антропогендік әсерден кейінгі кезеңдерде тұрақты басқаруды қамтамасыз ету мақсатында табиғатты қорғау шараларын күшейту мен тұрақты спутниктік бақылаудың қажеттілігін айқындайды.

Түйін сөздер: вегетациялық индекс, Дальнее орманшылығы, орман шаруашылығы, орман, дискреттік шкала.

Введение

Во всем мире леса являются важнейшим природным ресурсом, и разумное управление ими имеет решающее значение для здоровья и благополучия человека и экосистем. Усилия по управлению лесами зависят от надежных данных о состоянии и тенденциях развития лесных ресурсов. Когда такие данные получают из хорошо налаженных систем мониторинга природных ресурсов, это позволяет принимающим решения лицам опираться на научные основы при принятии своих решений. Национальные инвентаризации лесов являются краеугольным камнем, но для их реализации требуются потенциал и навыки. Эффективность может быть достигнута за счет включения вспомогательной информации, полученной с помощью дистанционного зондирования, в наземную инвентаризацию лесов.

Согласно данным FAO (The Food and Agriculture Organization) ежегодно от лесных пожаров страдают порядка 98 млн га лесной площади – это примерно 4 % от глобальной лесной территории (FAO, 2024:184).

Изменение климата, усиление пожаров и антропогенное воздействие могут изменить динамику и продуктивность лесов (Kasischke et al

2010, Bradshaw and Warkentin 2015). Дистанционное зондирование является ценным инструментом для изучения состава и продуктивности лесного массива (Shogelova et al 2023) и труднодоступного регионов, и во многих исследованиях для определения продуктивности в масштабах ландшафта использовались спутниковые измерения нормализованного разностного индекса растительности (NDVI). Временные ряды используются для расчета тенденций изменения NDVI во времени, при этом снижение NDVI интерпретируется как «ухудшение», а повышение NDVI – как «озеленение» (Shogelova et al 2021). В некоторых исследованиях сообщалось о различных региональных тенденциях, при этом наблюдались значительные пространственные и интенсивные различия между наборами данных (например, GIMMS и Landsat) и методиками (Alcaraz-Segura et al 2010, Zhumadina et al 2022, Sagynbayeva et al 2023).

Предыдущие исследования, сравнивающие тенденции изменения NDVI в разных наборах данных, показали противоречивые результаты (Alcaraz-Segura et al 2010). Одним из источников расхождений в анализе NDVI является разрешение набора данных, которое варьируется от разрешения 8 км для Глобального мониторинга и моделирования запасов исследований (GIMMS)

усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (AVHRR) до 30 м для данных Landsat. В последних работах особое внимание уделяется более тонкому разрешению таких наборов данных, как Landsat, для более точной диагностики факторов, вызывающих изменение NDVI (Ju and Masek 2016, Sulla-Menashe et al 2018).

Второй вопрос связан с интерпретацией NDVI как таковой. Многие исследования связывают NDVI с полевыми измерениями биофизических свойств растительности и обнаруживают положительные корреляции с растительным покровом, индексом площади листьев (LAI), биомассой, состоянием растительности и концентрацией хлорофилла (Carlson and Ripley 1997, Yang et al 2017). Биофизические свойства не являются полностью независимыми, что затрудняет попытки интерпретации последних тенденций NDVI с точки зрения изменений фактических экологических или биофизических свойств. Кроме того, взаимосвязь между биофизическими свойствами и NDVI может не сохраняться на протяжении всей истории жизни леса. Например, NDVI линейно увеличивается с ростом LAI для древостоев с низким LAI, а затем насыщается при высоком LAI (Carlson 1990, Turner 1999). Эти неоднозначности подчеркивают необходимость проведения систематических полевых наблюдений для более точной интерпретации наблюдаемых изменений в индексах растительности, полученных с помощью дистанционного зондирования. вегетационных индексов.

Лесничество «Дальнее» входит в состав Государственного лесного природного резервата «Семей орманы», учреждённого в 2003 году для сохранения и восстановления уникальных ландшафтных боров Прииртышья. С 2023 года территория резервата административно относится к Абайской области. Резерват выполняет важные функции по охране природы и обладает высокой экологической, научной, культурной и рекреационной ценностью. Основу лесного комплекса составляют такие породы, как сосна, пихта, ель, кедр и лиственница. Площадь лесничества «Дальнее» составляет около 22 604 га, оно расположено в Бородулихинском районе, к северу от города Семей.

Для исследования динамики индекса вегетационного покрова (NDVI) были отобраны кварталы на основе информации о пожароопасных участках, полученной по данным спутникового

мониторинга. В качестве источников использовались изображения Landsat, снятые в период максимальной активности растительности – в июне и июле. В исследование вошли снимки следующих лет: 1991 год – Landsat 5 (датчик TM), 2010 год – Landsat 7 (датчик ETM+), 2018 и 2022 годы – Landsat 8 (датчик OLI).

Такой набор снимков позволил рассмотреть следующие аспекты:

- Оценить динамику роста растительности на выбранных кварталах;
- Сравнить изменения площади лесных участков;
- Изучить воздействие пожаров на состояние растительности;
- Выявить потенциальные проблемные зоны, требующие внимания в рамках лесоустройства.

Методы

Изображения, использованные в этом исследовании, были получены из архива Геологической службы США (USGS). Доступ к нему возможен как для простого просмотра каталога, так и для непосредственного получения архивных снимков. На рисунке 1 наглядно демонстрируется изменение лесного покрова с 1991 по 2022 год.

После скрининга выбрано только четыре наиболее подходящих изображения, основанных на отсутствии облаков и относительно одного сезона и соответствующего временного интервала, полученных в 1991, 2010, 2018, 2022 годах.

Сбор спутниковых данных Landsat для изучаемой территории был преобразован в стопку слоев временных рядов изображений NDVI. Впервые, NDVI был рассчитан для каждой отдельной сцены Landsat на основе хорошо известного соотношения высокого поглощения в красном диапазоне и высокого коэффициента отражения входящей солнечной радиации в ближней ИК части электромагнитного спектра в качестве индикатора «зеленой» растительности и продуктивности растительности.

В этом исследовании использовался NDVI, поскольку он является надежным экологическим индикатором. Благодаря своим спектральным характеристикам, а также довольно долгой истории, NDVI стал наиболее часто используемым инструментом для оценки лесной и нелесной растительности во всем мире (Adole 2016).

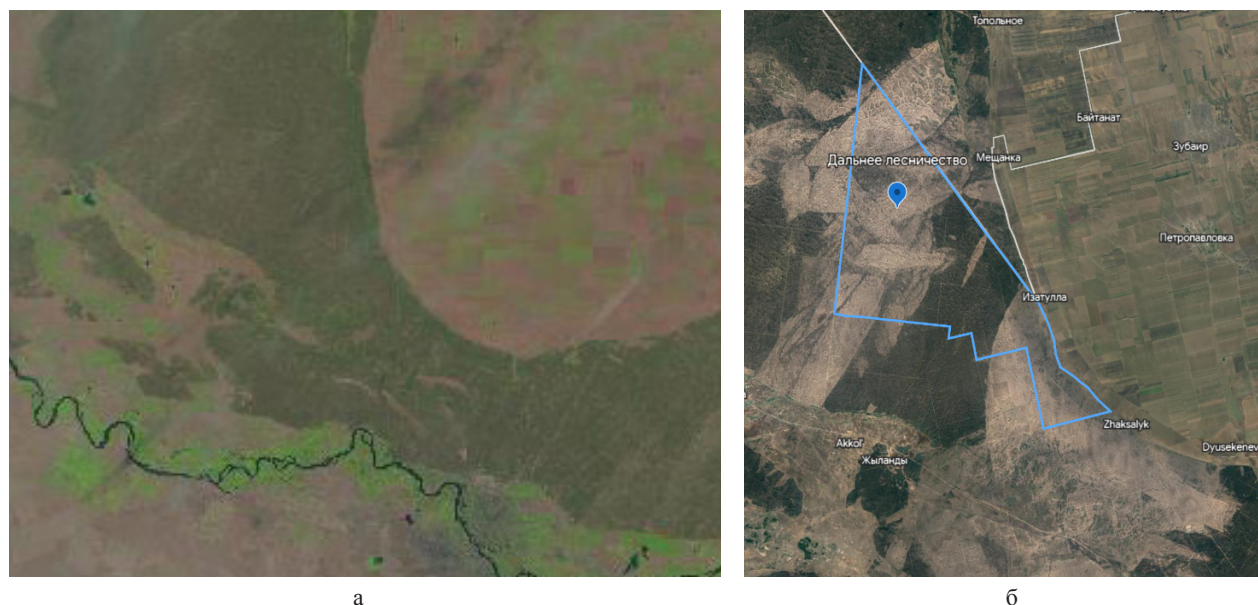


Рисунок 1 – Снимки полученные из базы USGS
а – снимок 1991 года, б – снимок 2022 года

Обработка спутниковых изображений проводилась с использованием специализированной программы ArcGis. Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, обычно от $0,01$ до 1 . Для интерпретации полученных значений разработана дискретная шкала (табл.1). Предложенная шкала была разработана авторами на основе анализа данных NDVI для сосновых лесов исследуемого региона. Её диапазоны соотносятся с общепринятой интерпретацией NDVI: значения около нуля или немного выше (до $\sim 0,1$) соответствуют от-

крытому грунту или сильно разреженной растительности, показатели порядка $0,2-0,4$ характерны для растительного покрова низкой и средней плотности, а высокие значения (более $0,5$) наблюдаются у наиболее густых насаждений. В нашем случае верхние границы шкалы достигают $\sim 0,6$, что согласуется с тем, что хвойные леса обычно демонстрируют несколько более низкий максимальный NDVI по сравнению с широколиственными (для сравнения, NDVI чистых широколиственных лесов может достигать $\sim 0,84$, тогда как у смешанных хвойно-широколиственных – около $0,79$).

Таблица 1 – Дискретная шкала NDVI

№	Цвет на снимке	Тип объекта	Значение NDVI
		$0 - 0,075270057$	Открытая почва с редкой растительностью
		$0,075270057 - 0,1$	Насаждения, поврежденные пожаром
		$0,1 - 0,15$	Разряженная растительность
		$0,15 - 0,2$	Средневозрастной лес (возраст от 70 до 90 лет)
		$0,2 - 0,3$	Спелый лес (возраст от 100 до 110 лет)
		$0,3 - 0,4$	Спелый лес (возраст от 110 до 120 лет)
		$0,4 - 0,5$	Спелый лес (возраст от 120 до 130 лет)
		$0,5 - 0,6$	Спелый лес (возраст от 130 до 180 лет)

Градация NDVI в интервале 0 – 0,075270057 (Открытая почва с редкой растительностью) часть территории леса, на которой деревья повреждены или уничтожены пожаром. Данный участок отмечен на рисунках красным цветом.

Градация NDVI в интервале 0,075270057 – 0,1 (Насаждения, поврежденные пожаром) характерна для участков наиболее пострадавших от пожара, так как почвенно-растительный покров практически отсутствует. Данный участок отмечен на рисунках фиолетовым цветом.

Градация NDVI в интервале 0,1 – 0,15 (Разряженная растительность) на рисунках присвоен кирпичный цвет и соответствует участкам с растительностью поврежденных пожаром.

Градация NDVI в интервале 0,15 – 0,2 (Средневозрастной лес) на рисунках присвоен голубой цвет и соответствует участкам с лесными насаждениями возрастом от 70 до 90 лет.

Градация NDVI в интервале 0,2 – 0,3 (Спелый лес) на рисунках присвоен желтый цвет и соответствует участкам с лесными насаждениями возрастом от 100 до 110 лет.

Градация NDVI в интервале 0,3 – 0,4 (Спелый лес) на рисунках присвоен салатовый цвет и соответствует участкам с лесными насаждениями возрастом от 110 до 120 лет.

Градация NDVI в интервале 0,4 – 0,5 (Спелый лес) на рисунках присвоен светло зеленый цвет и соответствует участкам с лесными насаждениями возрастом от 120 до 130 лет.

Градация NDVI в интервале 0,5 – 0,6 (Спелый лес) на рисунках присвоен светло зеленый цвет и соответствует участкам с лесными насаждениями возрастом от 130 до 180 лет.

Значения NDVI в период с 1991 по 2022 года на рассматриваемой территории остаются ниже типичных значений для лесной растительности. Следует учитывать, что преобладающие в лесничестве хвойные породы характеризуются умеренно более низкими максимальными значениями NDVI в сравнении с широколиственными лесами (из-за меньшей отражательной способности хвои в ближнем ИК-диапазоне), что частично объясняет относительно невысокие показатели NDVI по сравнению с другими лесными экосистемами. Это может указывать на наличие факторов, которые ограничивают рост и развитие растительности на этой конкретной территории. Возможные причины низких значений NDVI могут включать изменения в климатических условиях, недостаток воды, почвенную деградацию, воздействие паразитов или болезней растений, а также антропогенные факторы, такие как лесоп-

заготовка или незаконные вырубки. Низкие значения NDVI могут указывать на ухудшение состояния растительности и экосистемы в целом. Это может иметь негативные последствия для биоразнообразия, баланса экосистемы, удержания почвы и прочих экологических функций, связанных с лесной растительностью.

До образования ГЛПР «Семей орманы», территория лесничества «Дальнее» Жанасемейского филиала находилась в лесорастительном регионе ленточного бора Прииртышья. Сосновый бор на этой территории представлял собой печальный пример сильно пострадавшего лесного фонда. Лес покрывал 41% общей площади, включая сосну, которая занимала 22%. Некоторые лесные участки имели недостаток в эксплуатационных деревьях, тогда как в других было недостаточно молодых деревьев.

На представленном рисунке 2 показаны результаты обработки индекса NDVI для 1991 года. Анализ спутниковых изображений этого года позволил определить, что на территории Дальнего лесничества преобладал средневозрастной лес. Однако было также обнаружено наличие лесных гарей на кварталах с номерами 23, 30, 65, 160, 184, 185, 187, 188 и 189. Особый интерес вызывает градация значений индекса NDVI в кварталах 184, 185, 187, 188 и 189, которая свидетельствует о наличии крупного пожара, площадь которого распространилась на 5 кварталов. Это обстоятельство является важным для дальнейшего анализа и оценки состояния лесного покрова в данном районе. Такие наблюдения представляют ценность для научных исследований, поскольку позволяют изучать и анализировать влияние пожаров на экосистемы и развивать стратегии управления лесными ресурсами, направленные на предотвращение и снижение пожароопасности в будущем.

По результатам анализа спутниковых изображений 2010 года выявлена значительная площадь, покрытая гарью, которая визуально составляет примерно 1/3 от общей площади лесничества. Это является последствием пожара, произошедшего в 1997 году, в результате которого было уничтожено около 18 тысяч гектаров лесной территории. Согласно предоставленной информации, в 2003 году на участках, где ранее наблюдалась гарь, произошел пожар. Площадь этого пожара составила 500 гектаров. Несмотря на прошедшее время с момента пожара, процесс восстановления леса протекает медленно, что можно увидеть по обработке спутникового снимка.

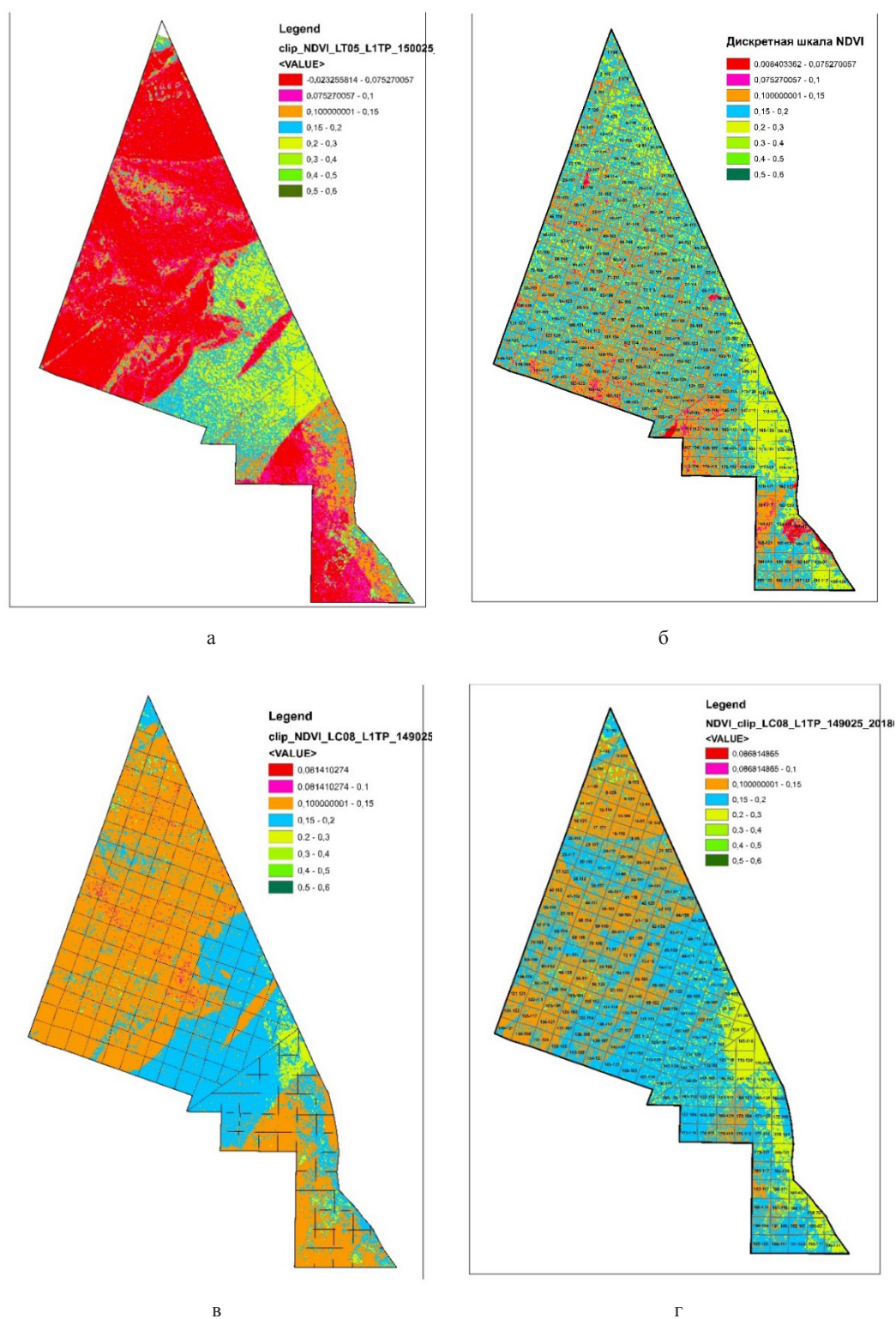


Рисунок 2 – Временные изменения пространственного значения NDVI на территории лесничества «Дальнее»
а – 1991 год, б – 2010 год, в – 2018 год, г – 2022 год

Из анализа снимка 2018 года видно, что участки, покрытые гарью, начали наблюдать некоторое восстановление. На снимке отчетливо видно, что эти участки перешли в следующую градацию по индексу NDVI, что указывает на начало процесса восстановления растительности. В целом, на всей территории снимка преобладает средневозрастной лес, возрастом до 90 лет. Это свидетельствует о том, что восстановительные процессы после пожара 1997 года протекают, хотя и медленно, и позволяют восстановить лесной покров.

Анализ снимков за 2020 и 2022 годы позволяет сделать вывод о положительной динамике в зоне, не затронутой пожарами. На этих участках

наблюдается увеличение плотности леса с возрастом более 90 лет. Однако, незаконная рубка деревьев оказывает негативное влияние. На снимке 2022 года заметно, что участки в лесной полосе показывают отрицательную динамику с индексом NDVI от 0,15 до 0,2. Это свидетельствует о снижении плотности растительности и возможных повреждениях в результате незаконной рубки.

Подобные наблюдения подчеркивают важность введения контрольных мер и профилактики незаконной вырубki, с целью сохранения и восстановления здорового лесного покрова, а также поддержания положительной динамики в зоне, которая не подверглась воздействию пожаров.

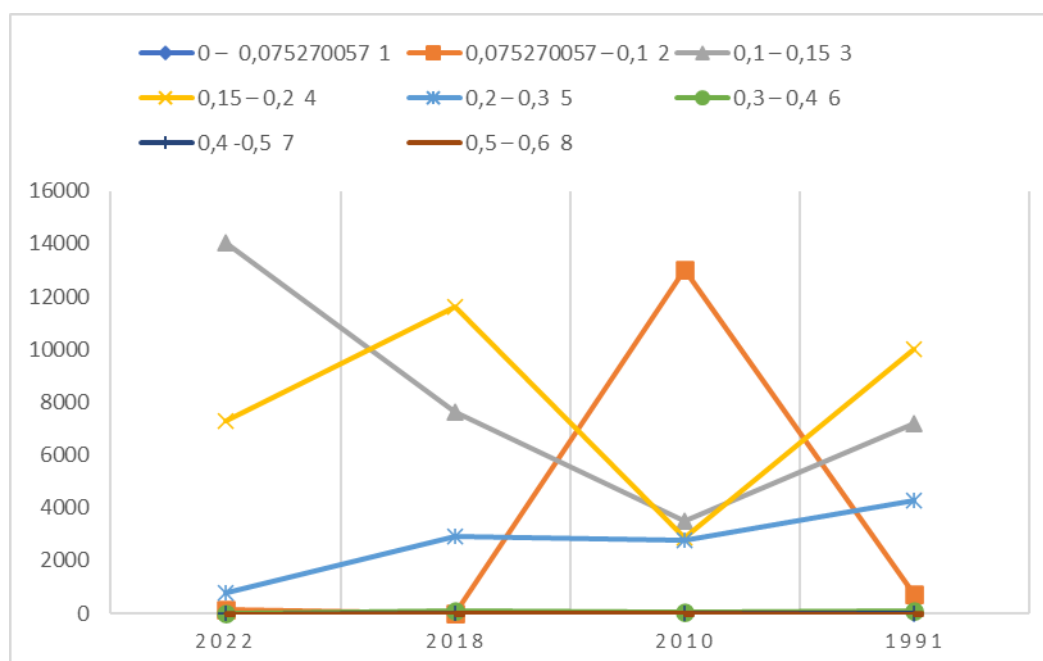


Рисунок 3 – Изменения площади значений NDVI по годам в га, нумерация соответствует таб. 1

График, основанный на данных о нижних, верхних и средних значениях изменения индексов NDVI с 1991 по 2022 год (рис. 3, 4), иллюстрирует динамику вегетационных показателей на территории лесничества «Дальнее». Верхняя кривая на этом графике отражает изменение NDVI на наиболее плотных и не повреждённых участках леса, средняя – среднее значение NDVI по территории, а нижняя – динамику NDVI на наиболее деградированных участках (гарях, вырубках).

В результате анализа наиболее высоких и низких значений линейных трендов NDVI выявлены области с наиболее интенсивными изменениями ландшафтов. В результате визуальной верификации трансформации ландшафтов с помощью спутниковых изображений сверхвысокого пространственного разрешения выявила, что изменения, в основном, обусловлены антропогенным влиянием.

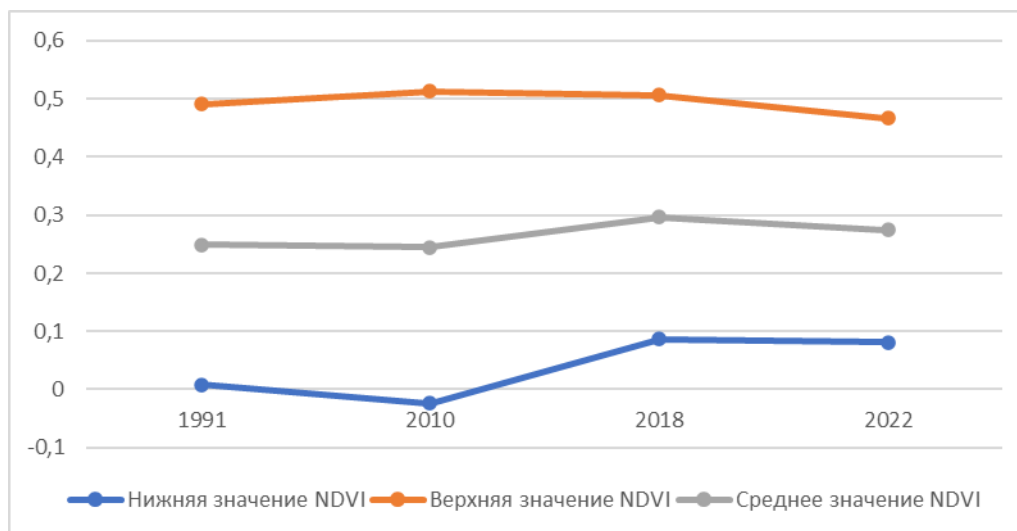


Рисунок 4 – Изменения нижних, верхних и средних значений индексов NDVI с 1991 по 2022 год

На основе анализа снимков и вегетационного индекса (NDVI) можно сделать следующие выводы:

1. Анализ снимков и NDVI позволяет наблюдать изменения в состоянии растительности на рассматриваемой территории. Анализ среднего значения индекса NDVI показывает, что в период с 2010 по 2018 годы началось повышение этого значения. Это указывает на увеличение плотности и здоровья растительности на рассматриваемой территории в течение этого временного периода. Вероятно, этому способствовало постепенное естественное восстановление леса на ранее выгоревших территориях, а также проведение лесовосстановительных мероприятий.

2. Анализ показывает, что в период с 1991 по 2010 годы участки гари на рассматриваемой территории увеличились. Это указывает на увеличение площади, где растительность была повреждена или уничтожена в результате пожаров. В частности, крупный пожар 1997 года охватил около пяти лесных кварталов (порядка 500–600 га), значительно увеличив общую площадь гарей. По оценкам, суммарная выгоревшая площадь к 2010 году достигла примерно 1000 га.

3. В период с 2010 по 2018 года наблюдается хорошая динамика восстановления растительности и уменьшения участков с индексом NDVI равным нулю. Это указывает на положительное изменение состояния растительности на рассматриваемой территории в течение этого временного периода. Восстановление растительности может быть результатом естественных процессов

восстановления после пожаров или других повреждающих событий, а также воздействия мер по регенерации и охране растительности. Уменьшение участков с индексом NDVI равным нулю свидетельствует о возрастании плотности растительности на этих участках, где ранее отсутствовала или была повреждена растительность. Эти положительные изменения могут иметь благоприятное влияние на экосистему и биоразнообразие, обеспечивая более здоровую и устойчивую среду обитания для растений и животных.

4. В период с 2020 по 2022 года произошло снижение верхнего значения индекса NDVI. Это снижение может указывать на влияние незаконных вырубок на рассматриваемой территории. Незаконные рубки представляют собой незаконную практику вырубки леса без соответствующих разрешений или контроля. Такие действия могут привести к существенному сокращению площади лесного покрова и разрушению экосистемы. Это может иметь негативное влияние на биоразнообразие, удержание почвы, водоразделы и другие экологические функции леса. Снижение верхнего значения NDVI свидетельствует о снижении плотности и здоровья растительности на территории, что может быть связано с незаконными рубками. Для противодействия незаконным рубкам и сохранения лесных ресурсов необходимо принимать соответствующие меры, включая усиление контроля и наказания за незаконные действия, проведение образовательных программ и поощрение устойчивого использования лесных ресурсов.

Результаты и выводы

Проведён анализ вегетационных данных на территории лесничества «Дальнее» ГЛПР «Семей орманы» с использованием индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) на основе спутниковых снимков. Полученные результаты позволяют проследить изменения в состоянии растительности за период с 1991 по 2022 год. Анализ среднего значения NDVI показывает, что в 2010–2018 годах наблюдалось его устойчивое повышение, что свидетельствует об увеличении плотности и улучшении состояния растительного покрова. Это, вероятно, связано как с естественным восстановлением после пожаров, так и с мероприятиями по лесовосстановлению.

В то же время в период с 1991 по 2010 годы площадь участков с признаками гарей увеличи-

валась, что указывает на разрушительное воздействие пожаров. Особенно значительным был ущерб после пожара 1997 года. В 2020–2022 годах отмечено снижение верхнего значения NDVI, что может быть связано с незаконной вырубкой леса. К 2022 году на отдельных участках индекс NDVI снизился до $\sim 0,15-0,2$, что свидетельствует о потере древостоя. По ориентировочным оценкам, в 1991–2022 годах площадь незаконных рубок составила несколько десятков гектаров.

Результаты подтверждают значимость спутникового мониторинга для своевременного выявления деградации лесных участков и принятия мер по их восстановлению. Долгосрочное использование индекса NDVI представляет собой эффективный инструмент для устойчивого управления и охраны лесных экосистем.

Литература

- FAO. 2024. The State of the World's Forests 2024 – Forest-sector innovations towards a more sustainable future. Rome, FAO.; p. 214. <https://doi.org/10.4060/cd1211en>
- Kasischke E. S. et al 2010 Alaska's changing fire regime–implications for the vulnerability of its boreal forests *Can. J. For. Res.* 40 1313–24
- Bradshaw C. J. and Warkentin I. G. 2015 Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux *Glob. Planet. Change* 128 24–30
- Shogelova, N., & Sartin, S. . (2023). Earth remote sensing application for forest fire size, burn state and fire recovery. *Engineering Journal of Satbayev University*, 145(3), 31–39. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.05>
- Shogelova N., Sartin S. (2021). Remote sensing in urban forestry: recent applications and future directions on the example of world experience. *Journal of Geography and Environmental Management*, 63(4), 4–14. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2021.v63.i4.01>
- Alcaraz-Segura D., Chuvieco E., Epstein H.E., Kasischke E.S. and Trishchenko A. 2010 Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets *Glob. Change Biol.* 16 760–70
- Zhumadina, S., Chlachula, J., Zhaglovskaya-Faurat, A., Czerniawska, J., Satybaldieva, G., Nurbayeva, N., ... Boribay, E. (2022). Environmental dynamics of the ribbon-like pine forests in the parklands of North Kazakhstan. *Forests*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/f13010002>
- Sagynbayeva, A., Mambetov, B., Kalachev, A., Boranbay, Z., Borissenko, Y., Baigazakova, Z., & Turlybekov, K. (2023). Assessing Pine Forest Restoration Post-Fire Using NDVI and GIS Technologies. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 18(6), 1459–1467. <https://doi.org/10.18280/ij dne.180620>
- Ju J. and Masek J G 2016 The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data *Remote Sens. Environ.* 176 1–16
- Sulla-Menashe D, Woodcock C E and Friedl M A 2018 Canadian boreal forest greening and browning trends: an analysis of biogeographic patterns and the relative roles of disturbance versus climate drivers *Environ. Res. Lett.* 13 014007
- Carlson T.N. and Ripley D.A. 1997 On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index *Remote Sens. Environ.* 62 241–52
- Yang H, Yang X, Heskell M, Sun S and Tang J 2017 Seasonal variations of leaf and canopy properties tracked by ground-based NDVI imagery in a temperate forest *Sci. Rep.* 7 1267
- Carlson T.N., Perry E.M. and Schmugge T.J. 1990 Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields *Agric. For. Meteorol.* 52 45–69
- Turner D.P., Cohen W.B., Kennedy R.E., Fassnacht K.S. and Briggs J.M. 1999 Relationships between leaf area index and landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites *Remote Sens. Environ.* 70 52–68
- Adole, T., Dash, J. & Atkinson, P.M. (2016) A systematic review of vegetation phenology in Africa. *Ecological Informatics*, 34, 117–128. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.05.004>

Reference

- FAO. 2024. The State of the World's Forests 2024 – Forest-sector innovations towards a more sustainable future. Rome, FAO.; p. 214. <https://doi.org/10.4060/cd1211en>

- Kasischke E. S. et al 2010 Alaska's changing fire regime—implications for the vulnerability of its boreal forests Can. J. For. Res. 40 1313–24
- Bradshaw C. J. and Warkentin I. G. 2015 Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux Glob. Planet. Change 128 24–30
- Shogelova, N., & Sartin, S. (2023). Earth remote sensing application for forest fire size, burn state and fire recovery. Engineering Journal of Satbayev University, 145(3), 31–39. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.05>
- Shogelova N., Sartin S. (2021). Remote sensing in urban forestry: recent applications and future directions on the example of world experience. Journal of Geography and Environmental Management, 63(4), 4–14. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2021.v63.i4.01>
- Alcaraz-Segura D., Chuvieco E., Epstein H.E., Kasischke E.S. and Trishchenko A. 2010 Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets Glob. Change Biol. 16 760–70
- Zhumadina, S., Chlachula, J., Zhaglovskaya-Faurat, A., Czerniawska, J., Satybaldieva, G., Nurbayeva, N., ... Boribay, E. (2022). Environmental dynamics of the ribbon-like pine forests in the parklands of North Kazakhstan. Forests, 13(1). <https://doi.org/10.3390/f13010002>
- Sagynbayeva, A., Mambetov, B., Kalachev, A., Boranbay, Z., Borissenko, Y., Baigazakova, Z., & Turlybekov, K. (2023). Assessing Pine Forest Restoration Post-Fire Using NDVI and GIS Technologies. International Journal of Design and Nature and Ecodynamics, 18(6), 1459–1467. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180620>
- Ju J. and Masek J G 2016 The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data Remote Sens. Environ. 176 1–16
- Sulla-Menashe D, Woodcock C E and Friedl M A 2018 Canadian boreal forest greening and browning trends: an analysis of biogeographic patterns and the relative roles of disturbance versus climate drivers Environ. Res. Lett. 13 014007
- Carlson T.N. and Ripley D.A. 1997 On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index Remote Sens. Environ. 62 241–52
- Yang H, Yang X, Heskell M, Sun S and Tang J 2017 Seasonal variations of leaf and canopy properties tracked by ground-based NDVI imagery in a temperate forest Sci. Rep. 7 1267
- Carlson T.N., Perry E.M. and Schmugge T.J. 1990 Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields Agric. For. Meteorol. 52 45–69
- Turner D.P., Cohen W.B., Kennedy R.E., Fassnacht K.S. and Briggs J.M. 1999 Relationships between leaf area index and landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites Remote Sens. Environ. 70 52–68
- Adole, T., Dash, J. & Atkinson, P.M. (2016) A systematic review of vegetation phenology in Africa. Ecological Informatics, 34, 117– 128. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.05.004>

Сведения об авторах:

Шогелова Назым Тулегеновна (корреспондентный автор) – магистр технических наук, докторант ФСТИМ, Международная образовательная корпорация (Алматы Казахстан, эл. почта: nazym-shogelova@mail.ru).

Сартин Сергей Александрович – доктор или кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева (Петропавловск, Казахстан, эл. почта: sartin78@mail.ru).

Толубекова Жанат Зекеновна – кандидат технических наук, доцент кафедры землеустройства и геодезии, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина (Астана, Казахстан, эл. почта: zh.toleubekova@kazatu.edu.kz).

Information about authors:

Shogelova Nazym (Corresponding author) – Master of Technical Sciences, doctoral student of FSTIM, International Educational Corporation (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nazym-shogelova@mail.ru).

Sartin Sergey – physico-mathematical sciences, associate professor of the department of «Physics», North-Kazakhstan University named after M. Kozymbayev (Petropavlovsk, Kazakhstan, e-mail: sartin78@mail.ru)

Toleubekova Zhanat – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Management and Geodesy, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seyfullin (Astana, Kazakhstan, e-mail: zh.toleubekova@kazatu.edu.kz)

Авторлар туралы мәліметтер:

Шогелова Назым Төлегенқызы – магистр, Халықаралық білім беру корпорациясының Құрылыс, технология және инновациялық менеджмент факультетінің (КТЖИМ) докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: nazym-shogelova@mail.ru)

Сартин Сергей Александрович – физика-математика ғылымдарының кандидаты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университетінің «Физика» кафедрасының доценті (Петропавл, Қазақстан, e-mail: sartin78@mail.ru)

Толубекова Жанат Зекенқызы – техника ғылымдарының кандидаты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Жерге орналастыру және геодезия кафедрасының доценті (Астана, Қазақстан, e-mail: zh.toleubekova@kazatu.edu.kz)

Поступила впервые: 09 декабря, 2023 года

Повторна загружена: 24 марта, 2025 года

Принята: 14 июля, 2025 года