

Пространственно-временная динамика спектральных индексов и продуктивность в горном рельефе Республики Тыва (2000–2024)

Х. Б. Куулар

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН
Кызыл, 667007, Россия
E-mail: k-k-188@list.ru

Представлен комплексный анализ динамики вегетационных индексов NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) и чистой первичной продуктивности NPP (*англ.* Net Primary Production) на территории Республики Тыва за 2000–2024 гг. с учётом современных климатических изменений. Использованы спутниковые коллекции LANDSAT/COMPOSITES/C02/T1_L2_ANNUAL_NDVI и LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDWI, а также данные по NPP из продукта MOD17A3HGF (500 м). Для выделения высотных поясов (500–1000, 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200 и 2201 м над ур. м. (над уровнем моря) и более) применена цифровая модель рельефа Copernicus GLO-30 (30 м). Анализ климатических данных (ERA5-Land) выявил устойчивое потепление (+0,46–0,62 °C) по всей территории, сопровождающееся снижением относительной влажности (до –2,53 % в поясе 1001–1300 м), ростом осадков (от +18 мм (500–1000 м над ур. м.) до +44 мм (2200 м и более)) и стабильностью испарения. На фоне этих изменений во всех высотных уровнях зафиксирован статистически значимый ($p < 0,05$) тренд «озеленения»: NDVI и NPP демонстрируют устойчивый рост. Максимальный прирост NPP зафиксирован на высотах 1700–2200 м над ур. м. и составил $+540 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ при росте NDVI на 0,198, что указывает на активное смещение верхней границы леса. На высотах 1300–1700 м над ур. м. — $+268 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ($\Delta\text{NDVI} = +0,191$), на высотах 500–1000 м над ур. м. — $+281 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ($\Delta\text{NDVI} = +0,142$). Вероятно, обусловлено улучшением условий увлажнения в результате деградации многолетней мерзлоты. Однако реакция экосистем неоднородна в пространстве: по данным NDWI в Северо- и Южно-Таннуольских лесорастительных округах наблюдается рост увлажнения, тогда как в Западно-Саянском, Каа-Хемском и Хемчикско-Куртушибинском округах — достоверное ($p < 0,05$) снижение влагообеспеченности. Полученные результаты подтверждают гипотезу о климатически обусловленной трансформации высотной структуры растительности: потепление и рост осадков способствуют экспансии леса в высокогорные зоны, в то время как снижение влажности усиливает водный стресс на нижних высотных уровнях.

Ключевые слова: NDVI, NDWI, NPP, высотные уровни, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 26.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-205-218

Введение

Вегетационные индексы NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) доказали свою эффективность на всех масштабах: от глобального до локального (Карсаков и др., 2025; Liu et al., 2022; Zhao et al., 2024). Индекс NDVI широко применяется для оценки фитомассы, фенологических сдвигов и трендов озеленения (*англ.* greening) или пожелтения (*англ.* browning) ландшафтов (Tucker, 1979). Индекс NDWI позволяет оценивать влажность растительного покрова и почвы (Gao, 1996), а чистая первичная продуктивность NPP (*англ.* Net Primary Production) — интегральный показатель функционирования экосистемы (Running et al., 2004). Совместный анализ этих параметров характеризует реакцию высотной структуры растительного покрова на климатические изменения, определяя степень устойчивости положения границ между поясами.

Применение вегетационных индексов в России началось в 1990-х гг. с появлением доступа к данным NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) AVHRR

(англ. Advanced Very-High-Resolution Radiometer), а затем — Landsat и MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Они стали основой для мониторинга лесов, оценки климатических рисков и управления природными ресурсами. Ранние работы (Барталев, Лупян, 2013; Барталев и др., 2012) были направлены на создание российских систем **мониторинга растительности**, включая карты NDVI с разрешением до 250 м. Современные исследования динамики растительного покрова в условиях ускоряющегося климатического изменения всё чаще опираются на данные дистанционного зондирования, в частности на вегетационные индексы NDVI и NDWI, а также на оценки NPP. Эти показатели позволяют не только выявлять долгосрочные тренды озеленения или пожелтения, но и дифференцировать их по пространственным и экологическим градиентам. Особенно выраженное пространственное разнообразие наблюдается в горных и бореальных регионах, где рельеф, экспозиция склонов и режим увлажнения модулируют общие климатические сигналы.

В бореальной зоне Сибири за последние десятилетия зафиксировано значительное смещение границы леса вверх по склону. Так, в горах Путорана (Северная Сибирь) за XX в. верхняя граница леса поднялась на 40–60 м, что напрямую коррелирует с ростом среднегодовой температуры и удлинением вегетационного периода (Kirilyanov et al., 2012). Аналогичные процессы наблюдаются и в других горных системах: в Алтае лесные экосистемы демонстрируют двойственную реакцию — расширение древостоя в высокогорных зонах и деградация в низкогорье из-за усиления засушливости и антропогенного давления (Zhang et al., 2025).

Глобальные метаанализы подтверждают, что динамика NDVI всё реже объясняется только климатическими факторами. Важную роль играют топография, тип почв, гидрологический режим и антропогенное воздействие (Liu et al., 2022; Zhao et al., 2024). В Южной Сибири выявлены пространственно-временная изменчивость спектральных индексов растительности (NDVI) в высотных поясах юга Сибири и их связи с климатическими факторами и структурой растительного покрова. В этом контексте индекс NDWI приобретает особое значение как индикатор доступности влаги для растений. В аридных и семиаридных регионах (включая часть Алтая и Армению) снижение NDWI коррелирует с ростом аридности, частотой засух и снижением продуктивности (Мурадян и др., 2016; Mu et al., 2021). В то же время в других регионах, например в бассейне Байкала или в отдельных районах Юго-Восточной Азии, положительные тренды NDWI указывают на улучшение гидрологического режима, возможно, за счёт изменения циркуляции атмосферы (Ghalehtemouri et al., 2024; Permata et al., 2023).

В Сибири и на сопредельных территориях анализ временных рядов NDVI выявляет сложную картину. С одной стороны, в большинстве районов Западной и Восточной Сибири доминируют положительные тренды, связанные с потеплением (Елсаков, Телятников, 2013; Ботвич и др., 2023; Тигеев и др., 2021). С другой — многолетняя мерзлота, после пожаров или в условиях повторяющихся засух фиксируются участки пожелтения, что свидетельствует о пределе адаптационных возможностей экосистем (Швецов, Пономарев, 2020). Влияние температуры на NDVI подтверждается как в европейской части России (Богдан и др., 2024), так и в горных районах Байкальского региона, где рост температуры сопровождается как активизацией роста, так и усилением испарения (Богданов и др., 2024).

Особое внимание в последних работах уделяется пространственной неоднородности вегетационных трендов. Динамика растительности становится всё более фрагментированной, что требует перехода от крупномасштабных усреднённых оценок к локальным, учитывающим микроклимат и рельеф (Wang et al., 2024). Эта тенденция подтверждается и в исследованиях по Среднему Поволжью, где засухи вызывают локальные снижения NDVI даже на фоне общего озеленения (Воробьёв и др., 2022).

Таким образом, совокупность современных исследований свидетельствует: горные и бореальные экосистемы реагируют на изменение климата не одинаково, а через сложную систему локальных откликов, обусловленных взаимодействием глобальных климатических трендов и микросредовых условий — рельефа, экспозиции склонов, гидрологии и антропогенного воздействия. Это подчёркивает необходимость интеграции спутниковых данных высокого разрешения (включая NDWI и NPP) с цифровыми моделями рельефа и наземными

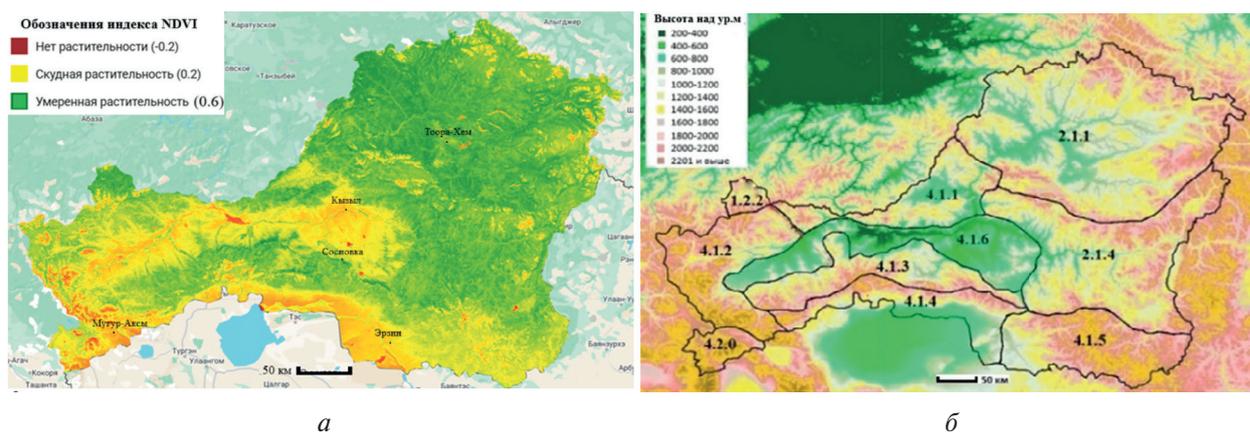
наблюдениями для адекватной оценки устойчивости лесных экосистем в условиях глобального потепления.

Горы Южной Сибири представляют собой устойчивые природные системы, формирующиеся под влиянием вертикальной градиентности климата, рельефа и почвенно-растительного покрова (Исаченко, 2004; Поликарпов и др., 1986). На территории Танзыйбейского полигона (Красноярский край) ранее были детально описаны пять типов высотно-поясных комплексов (Назимова и др., 2023), а в работе (Карсаков и др., 2025) показана сезонная динамика NDVI и LST (*англ.* Land Surface Temperature) в 2023 г.

Однако остаётся открытым вопрос о многолетних трендах и пространственном разнообразии этих процессов. Республика Тыва, расположенная в южной части гор Южной Сибири с вечной мерзлотой, представляет собой уникальный регион для изучения таких двойственных процессов. В последние десятилетия здесь наблюдаются устойчивые климатические сдвиги: рост среднегодовой температуры, изменение режима осадков, ускоренное таяние мерзлоты (Назимова и др., 2023; Парфенова, Чебакова, 2023; Поздняков, 1986; Сергеев и др., 2007).

В условиях глобального потепления особую актуальность приобретает мониторинг многолетних изменений растительного покрова и продуктивности, что стало возможно благодаря развитию методов дистанционного зондирования Земли.

Цель данной работы — количественная оценка многолетней динамики вегетационных индексов (NDVI, NDWI) и продуктивности (NPP) в разрезе высотной поясности и по лесорастительным округам на территории Республики Тыва за 2000–2024 гг. и выявление пространственно-временных закономерностей, связанных с климатическим изменением.



Карта NDVI (а) и картосхема лесорастительного районирования Республики Тыва с высотными уровнями (б) (по работе (Смагин и др., 1980) с изменениями). 1. **Алтае-Саянская горная лесорастительная область**: 1.2. *Северная Алтае-Саянская горная лесорастительная провинция кедровых и пихтовых лесов*: 1.2.2. *Осевоий Западно-Саянский округ горно-таёжных и подгольцово-таёжных кедровых лесов*. 2. **Восточнотувинско-Южнозабайкальская горная лесорастительная область**: 2.1. *Восточно-Тувинская котловинно-горная лесорастительная провинция лиственничных и кедровых лесов*: 2.1.1. *Тоджинский округ подтаёжных сосново-лиственничных и горно-таёжных лиственничных, сосновых и кедровых лесов*, 2.1.4. *Каа-Хемский округ подтаёжных лиственничных и горно-таёжных кедрово-лиственничных лесов*. 4. **Центрально-Азиатская котловинно-горная лесорастительная область**: 4.1. *Алтае-Тувинско-Хангайская котловинно-горная лесорастительная провинция горных степей и лиственничных лесов*: 4.1.1. *Хемчикско-Куртушибинский округ горных степей, горно-таёжных травяных лиственничных лесов*, 4.1.2. *Верхне-Хемчикский округ горных степей, перистепных и горно-таёжных лиственничных лесов*, 4.1.3. *Северо-Таннуольский округ перистепных лиственничных и горно-таёжных лиственничных и кедровых лесов*, 4.1.4. *Южно-Таннуольский округ горных степей и перистепных лиственничных лесов*, 4.1.5. *Сангиленский округ горных степей, перистепных и горно-таёжных лиственничных лесов*, 4.1.6. *Улуг-Хемский котловинно-степной округ островных сосновых боров*; 4.2.0. *Чуйско-Монгольско-Алтайская котловинно-горная лесорастительная провинция горных степей и высокогорных комплексов растительности*. Примечание: округа 2.1.2, 2.1.3 находятся за пределами Республики Тывы

Район исследований

Район исследований расположен в центре Азиатского континента (49° 00' с. ш., 99° 00' в. д.). Рельеф — преимущественно среднегорный, с абсолютными высотами от 508 до 3966 м. Для региона характерен резко континентальный климат с дефицитом осадков, количество которых повышается с высотой (от 190 до 350 мм/год). Наблюдения пяти метеостанций (2000–2024) показывают аномалию летней температуры $1,6 \pm 0,8$ °С и среднегодовое количество осадков $149,9 \pm 20,7$ мм. В анализе использованы данные пяти метеостанций с международным статусом (рисунок, см. с. 207), поскольку остальные станции регионального статуса не предоставляют открытых данных на официальном сайте meteo.ru за рассматриваемый период.

Леса занимают около половины территории республики и представлены как светлохвойными (лиственничники (*Larix sibirica* Ledeb.)), так и темнохвойными (кедровыми (*Pinus sibirica* Du Tour) и еловыми (*Picea obovate* Ledeb.)) сообществами, формирующими сложную структуру высотно-поясной растительности. Их распространение строго приурочено к местобитанию с устойчивым увлажнением почвы и приземного слоя атмосферы. Горные леса республики представляют особый научный интерес благодаря выраженному градиенту эколого-ценотических условий и чёткой высотной поясности: нижняя полоса, граничащая со степью, занята лиственничными лесами с примесью берёзы; средняя полоса характеризуется сочетанием лиственничных и кедровых лесов; верхняя полоса также сложена лиственнично-кедровыми сообществами, но с более разреженным древостоем и растительностью тундры.

Исходные данные и методы

В работе использован комплекс спутниковых и архивных данных за период 2000–2024 гг., обеспечивающий пространственно-временной анализ вегетационной активности и продуктивности высотных уровней на территории Республики Тыва. Основу составили:

- LANDSAT/COMPOSITES/C02/T1_L2_ANNUAL_NDVI и LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDWI — это коллекции ежегодных композитных изображений, рассчитанных на основе данных спутников Landsat-5...-9 (пространственное разрешение 30 м). Композиты формируются путём объединения всех доступных сцен;
- цифровая модель поверхности, использованная для выделения высотных уровней (500–1000, 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200, 2201 м над ур. м. (над уровнем моря) и более) для интерпретации пространственной структуры растительного покрова. Картографирование выполнено с помощью коллекции DEM GLO-30 (англ. Copernicus Global 30 m Digital Elevation Model) — цифровая модель поверхности с пространственным разрешением 30 м;
- данные климата, полученные с помощью коллекции ERA5-Land Daily — ECMWF Climate Reanalysis (англ. European ReAnalysis 5-Land Daily — ECMWF Climate Reanalysis; ECMWF — European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) — коллекция климата, которая представляет собой глобальный ежедневный набор данных с пространственным разрешением ~30 км, содержащий характеристики погоды (Williams et al., 2024).

Для количественной оценки состояния и динамики растительности применялись следующие спектральные индексы, рассчитываемые на основе отражательной способности в характерных спектральных каналах:

1. Нормализованный разностной вегетационный индекс NDVI — наиболее распространённый вегетационный индекс (Rouse et al., 1973). Он вычисляется по формуле:

$$NDVI = (NIR + Red) / (NIR - Red),$$

где Red — отражение в красном диапазоне (~0,63–0,69 мкм), чувствительном к хлорофилльному поглощению, а NIR — в ближнем инфракрасном диапазоне (~0,85–0,89 мкм), где здо-

ровая растительность сильно отражает излучение. Индекс NDVI коррелирует с биомассой, листовым индексом LAI (*англ.* Leaf Area Index) и фотосинтетической активностью и широко применяется для оценки первичной продуктивности (Running et al., 2004). Для анализа использовались показатели $NDVI_{max}$, $NDVI_{cp}$, представляющие собой максимальное и среднее значение индекса за вегетационный сезон.

2. Индекс NDWI, предложенный Б.-Ц. Гао (Gao, 1996), оценивает влагосодержание растительной ткани:

$$NDWI = (NIR + SWIR) / (NIR - SWIR),$$

где SWIR — отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне (~1,57–1,65 мкм), чувствительном к содержанию воды в листьях. Индекс NDWI применяется для выявления водного стресса и мониторинга засух в лесах и сельском хозяйстве (Gao, 1996). Для анализа использовался показатель $NDWI_{max}$, представляющий собой максимальное значение индекса за вегетационный сезон.

3. Значения NPP получены из продукта MOD17A3HGF (NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration), Collection 6.1), рассчитанного на основе модели CASA (*англ.* Carnegie–Ames–Stanford Approach) (Running et al., 2004):

$$NPP = PAR \cdot fAPAR \cdot \varepsilon T_1 T_2 W,$$

где PAR (*англ.* Photosynthetically Active Radiation) — фотосинтетически активная радиация (в МДж/м²); fAPAR (*англ.* Fraction of Absorbed PAR) — доля поглощённой PAR (измеряется через NDVI); ε — эффективность использования фотосинтетически активной радиации (в гС·МДж⁻¹); T_1 , T_2 — поправки на температуру; T_2 — дополнительный температурный стрессовый фактор, который может учитывать (экстремально высокие или низкие температуры, снижающие продуктивность); W — индекс увлажнения;

$$T_1 = (T - T_{min}) \frac{T - T_{max}}{(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2},$$

где T_{min} , T_{max} , T_{opt} — критические температуры для фотосинтеза;

$$W = P/PET,$$

где P — осадки, PET — потенциальная эвапотранспирация.

Для растительного покрова испарение (эвапотранспирация) рассчитывается как средневзвешенное между потенциальным испарением, радиацией, управляемым дефицитом влажности испарением (модифицированная формула Пенмана – Монтейта) (Mu et al., 2011):

$$ET = \rho_a \frac{1}{r_a} \left[s \frac{A - G}{\rho_a c_p} + \frac{e_s - e_a}{s + \gamma (1 + r_s / r_a)} \right],$$

где ρ_a — плотность воздуха; r_a — аэродинамическое сопротивление (сопротивление переносу пара и тепла от поверхности в атмосферу); s — наклон кривой давления насыщенного пара; A — доступная энергия (разность между чистой радиацией и потоком тепла в грунт); G — поток тепла в грунт; c_p — удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении; e_s — давление насыщенного пара у поверхности; e_a — фактическое давление пара в воздухе; γ — психрометрическая постоянная; r_s — поверхностное сопротивление.

Рассчитаны годовые оценки NPP (в гС·м⁻²·год⁻¹) с пространственным разрешением 500 м. Несмотря на ограничения разрешения в условиях горного рельефа, данные MOD17A3HGF широко применяются для региональных оценок продуктивности и были использованы в настоящей работе как базовый источник.

Анализ проводился по следующим пространственным единицам: по пяти высотным уровням (500–1000, 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200, 2201 м над ур. м. и более); по десяти лесорастительным округам, расположенным в различных высотно-ландшафтных условиях на территории республики. Обработки включали: расчёт среднегодовых значений NDVI, NDWI

и NPP; корреляционный анализ динамики индексов с климатическими аномалиями; оценку пространственного различия через сравнение статистики лесорастительных округов. Анализ трендов выполнен методом линейной регрессии с вычислением коэффициента детерминации (R^2) и стандартного отклонения (Ст. откл.). Статистическая значимость трендов оценивалась по критерию Манна – Кендалла при $p < 0,05$. Все расчёты выполнены в облачной платформе GEE (англ. Google Earth Engine).

Результаты и обсуждение

Анализ основных климатических показателей за 25-летний период (с 2000 по 2024 г.) выявляет сложную картину изменений, по-разному проявляющуюся на различных высотных уровнях (табл. 1).

Таблица 1. Динамика основных показателей климата по высотным уровням

Показатели	Высотные уровни, м над ур. м.				
	500–1000	1001–1300	1301–1700	1701–2200	2201 и более
ΔT , °C	0,46	0,56	0,62	0,57	0,55
Тренд T , °C	–0,09	–0,09	–0,10	–0,11	–0,11
Δ отн. вл., %	–2,50	–2,53	–2,29	–1,32	–0,01
Тренд, отн. вл.	–0,13	–0,13	–0,12	–0,07	0,00
Δ осадки, мм	18,00	32,00	32,00	37,00	44,00
Тренд осадков, мм	0,90	1,60	1,60	1,90	2,20
Δ исп., мм/ч	–20	–30	–60	–80	–50
Тренд исп., мм/ч	–1	–2	–3	–4	–3

Примечание: отн. вл. — относительная влажность, T — температура, исп. — испарение, Δ — разница между 2024 и 2000 гг.

Среди климатических переменных наиболее выраженную положительную динамику демонстрирует температура воздуха: её прирост за период 2000–2024 гг. составляет от +0,23 до +0,31 °C/10 лет во всех высотных поясах. Такая равномерность изменений указывает на масштабный климатический процесс, охватывающий всю горную систему независимо от абсолютной высоты. В отличие от температуры, относительная влажность воздуха характеризуется устойчивым снижением, причём с чётко выраженной высотной зависимостью. Наибольшее сокращение зафиксировано в нижних и средних высотных уровнях — до –2,53 % в поясе 1000–1300 м над ур. м., тогда как на верхнем высотном уровне (2200 м над ур. м. и более) изменения практически отсутствуют (Δ всего –0,01 %). Это свидетельствует о том, что факторы, обуславливающие снижение влажности (в первую очередь рост температуры и усиление испарения), наиболее интенсивно проявляются в более тёплых и засушливых условиях на нижних высотных уровнях. Сумма осадков, напротив, демонстрирует стабильный рост, причём интенсивность этого тренда прямо зависит от высоты: прирост составляет 18 мм в нижнем поясе (500–1000 м над ур. м.) и возрастает до 44 мм на верхнем высотном уровне (2201 м над ур. м. и более). Такое «высотное усиление» положительного тренда типично для осадков в горных регионах и отражает повышенную чувствительность высокогорных зон к изменениям циркуляции и влагопереноса. Испарение демонстрирует выраженную высотную зависимость, возрастая от –20 мм/ч в нижних поясах до –80 мм/ч в интервале 1701–2200 м над ур. м., где зафиксирован максимум.

Сопоставление пространственного распределения вегетационной активности (NDVI) со схемой лесорастительного районирования позволяет выявить чёткую закономерность:

лесные массивы республики приурочены к территориям с абсолютными отметками от 900–1000 м над ур. м. (см. *рисунок*). Анализ многолетней динамики чистой первичной продуктивности на территории участка за период 2000–2024 гг. выявил устойчивые положительные тренды во всех высотных поясах, причём наблюдаемый рост NPP находился в прямой связи с увеличением индекса NDVI, отражающего густоту растительного покрова. Средние значения NDVI демонстрируют последовательный рост, особенно выраженный после 2015 г., что согласуется с общеизвестным глобальным феноменом озеленения в условиях потепления климата. В *табл. 2* представлены линейные тренды NDVI по высотным уровням (2000–2024).

Таблица 2. Динамика NDVI по высотным уровням на территории республики

Высотные уровни, м над ур. м.	NDVI (2000)	NDVI (2024)	Δ NDVI	Тренд, ед/год	R^2
500–1000	0,326	0,468	+0,142	+0,0059	0,61
1001–1300	0,459	0,629	+0,170	+0,0071	0,69
1301–1700	0,489	0,680	+0,191	+0,0081	0,72
1701–2200	0,396	0,594	+0,198	+0,0083	0,70
2201 и более	0,282	0,408	+0,126	+0,0053	0,58

Таблица отражает количественные характеристики многолетней динамики показателя для пяти высотных уровней на территории республики. Наибольшая вегетационная активность в 2024 г. зафиксирована на высотном уровне 1300–1700 м над ур. м., где значение достигло 0,680. Максимальный абсолютный прирост за период с 2000 по 2024 г. также отмечен в этом интервале ($\Delta = +0,191$). Высокая продуктивность в данном поясе может быть связана с благоприятными условиями, такими как высокая сомкнутость древостоя. Трендовый анализ за весь период наблюдений выявил статистически значимый положительный тренд ($p < 0,05$) величиной +0,0081 ед/год ($R^2 = 0,72$) для высотного уровня 1300–1700 м, что свидетельствует об устойчивом росте показателя в данном диапазоне. Особое внимание заслуживает динамика высотных уровней больше 1700 м над ур. м. Индекс NDVI на высотном уровне 1701–2200 м над ур. м. увеличился на 0,198 за 25 лет, а на высотном уровне 2200 м над ур. м. и выше — с 0,282 (2000) до 0,408 (2024). Эти изменения свидетельствуют о расширении растительного покрова в верхние высотные уровни и подтверждают гипотезу о сдвиге верхней границы леса под влиянием роста температуры и удлинения вегетационного периода (на 11–17 дней). Такая тенденция согласуется с данными натурных наблюдений и ранее опубликованной работой автора (Куулар, 2023), где отмечается экспансия древесной и кустарниковой растительности в верхние высотные уровни.

Пространственное распределение вегетационной активности (NDVI) и схема лесорастительного районирования республики чётко показывают соответствие участков экспансии большим значениям NDVI (нижняя и верхняя граница леса) (см. *рисунок*). Сравнение карт (см. *рисунок а и б*) выявляет выраженные различия между этими районами в характере растительного покрова.

Наиболее продуктивными оказались Тоджинский ($NDVI_{max} = 0,826$) и Северо-Таннуольский (0,802) лесорастительные округа, расположенные с благоприятными условиями в кедрово-лиственничных, лиственничных лесах. Особенно выделился Северо-Таннуольский лесорастительный округ, где в 2021 г. зафиксирован рекордный $NDVI_{max} = 0,942$, что может быть связано с сочетанием достаточной влажности, устойчивого снежного покрова и минимального антропогенного воздействия. В то же время Южно-Таннуольский округ и Чуйско-Монгольско-Алтайская провинция, расположенные в высокогорных и переходных зонах, характеризуются низкой средней продуктивностью ($NDVI_{cp} = 0,32...0,36$), но показывают резкий рост индекса увлажнённости (NDWI): на Южно-Таннуольском округе NDWI_{max} достиг 0,894 в 2023 г. и 0,949 в 2018 г. Такое несоответствие между низким NDVI и высоким NDWI может указывать на трансформацию гидротермического режима — таяние вечной

мерзлоты, увеличение поверхностной влажности или смену растительного покрова в сторону гигрофильных видов (мхов, осок, влаголюбивых кустарничков, подроста кедра и ели), которые слабо отражаются в NDVI, но сильно влияют на NDWI (Куулар, 2023; Назимова и др., 2023).

В табл. 3 представлены результаты анализа чистой первичной продуктивности NPP (в $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$) и линейные тренды по высотным уровням (2001–2024).

Таблица 3. Средние значения NPP и их тренды по высотным уровням

Высотные уровни, м над ур. м.	NPP (2001), $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$	NPP (2024), $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$	ΔNPP	Тренд, $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-2}$	R^2
500–1000	2742,5	3023,6	281	+11,7	0,59
1001–1300	4083,0	4259,1	176	+7,3	0,48
1301–1700	4363,4	4631,5	268	+11,2	0,68
1701–2200	3265,0	3805,4	540	+22,5	0,65
2201 и более	1834,7	2373,1	538	+22,4	0,63

Наблюдается выраженный рост NPP во всех высотных уровнях, особенно выше 1700 м над ур. м., где прирост составил более $540 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ за период исследования. Это связано как с увеличением продолжительности вегетационного сезона, так и с экспансией ранее малопродуктивных территорий древесной и кустарниковой растительностью. На высотном уровне 1301–1700 м над ур. м., несмотря на меньший абсолютный прирост ($268 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$), сохраняется самая высокая средняя продуктивность ($4206 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$). Высокие значения R^2 ($>0,63$) на высотном уровне 2201 м над ур. м. и более подтверждают устойчивость тренда и его связь с долгосрочными климатическими изменениями. В табл. 4 приведены средние значения спектральных индексов (NDVI_{max} , NDWI_{max}) десяти лесорастительных округов, находящихся в разных условиях увлажнения.

Таблица 4. Средние значения и стандартные отклонения спектральных индексов

Лесорастительные округа	NDVI_{max}	Ст. откл. NDVI	NDWI_{max}	Ст. откл. NDWI
Западно-Саянский	0,753	0,042	-0,159	0,172
Тоджинский	0,826	0,028	0,190	0,221
Каа-Хемский	0,800	0,035	-0,083	0,185
Хемчикско-Куртушибинский	0,776	0,031	-0,067	0,190
Верхне-Хемчикский	0,702	0,062	0,083	0,087
Северо-Таннуольский	0,802	0,051	-0,067	0,220
Южно-Таннуольский	0,720	0,089	0,552	0,312
Улуг-Хемский	0,727	0,065	0,435	0,195
Сангиленский	0,772	0,048	0,394	0,188
Чуйско-Монгольско-Алтайская провинция	0,553	0,085	0,049	0,152

Тоджинский и Северо-Таннуольский округа характеризуются наибольшими средними значениями NDVI_{max} (0,826 и 0,802 соответственно), что указывает на высокую биомассу и сомкнутость древостоя. В то же время Южно-Таннуольский округ, несмотря на относительно низкий NDVI_{max} (0,720), демонстрирует самое высокое среднее значение NDWI_{max} (0,552) и наибольшую межгодовую изменчивость этого индекса ($\sigma = 0,312$), что может быть связано с трансформацией гидрологического режима в высокогорьях, например, изменением снеготаяния или перераспределением поверхностного стока. Западно-Саянский, Каа-

Хемский, Хемчикско-Куртушибинский округа и Чуйско-Монгольско-Алтайская провинция характеризуются низкими значениями $NDWI_{max}$ (от $-0,159$ до $-0,067$), что указывает на усиление водного стресса в низкогорных и антропогенно нарушенных зонах. Таким образом, таблица иллюстрирует пространственное различие отклика экосистем на климатические изменения. На основе выявленных тенденций удалось выделить два устойчивых типа многолетней динамики:

- тип I — в Западно-Саянском, Тоджинском, Каа-Хемском, Хемчикско-Куртушибинском, Верхне-Хемчикском, Северо-Таннуольском лесорастительных округах: высокая и стабильная продуктивность, умеренный рост $NDVI_{max}$, низкая изменчивость $NDWI_{max}$;
- тип II — Южно-Таннуольский лесорастительный округ и Чуйско-Монгольско-Алтайская провинция: низкая NPP, но резкий рост NDVI и ускоренный прирост NDVI в последние годы.

Выявленное двойственное поведение экосистем подтверждает выводы предыдущих работ (например, (Куулар, 2023)) о неоднородной реакции экосистем на климатические изменения в зависимости от высотного уровня и ландшафтной структуры.

Динамика NPP повторяет тренды индекса NDVI: максимальные значения приходятся на высотный уровень 1300–1700 м над ур. м. (среднее — $4206 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), минимальные — на высотный уровень 2201 м над ур. м. и более ($1840 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). В 2024 г. в высокогорье зафиксирован максимальный рост NPP до $2373 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, что дополнительно подтверждает гипотезу об озеленении верхних высотных уровней. Однако в Южно-Таннуольском лесорастительном округе, несмотря на рост NDVI, NPP остаётся низкой (среднее — $2103 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), что указывает на лимитирующее влияние влажности, короткого вегетационного сезона или бедности почв, ограничивающих перевод доступной влаги в биомассу. Это подчёркивает важность комплексного анализа не только вегетационной активности, но и гидрологических и почвенных факторов.

На нижнем высотном уровне (500–1300 м над ур. м.) зафиксирован наиболее выраженный рост NDVI и NPP, что согласуется с данными реанализа ERA5. Средняя годовая температура повысилась на $0,46 \text{ }^\circ\text{C}$ (500–1000 м над ур. м.) и $0,56 \text{ }^\circ\text{C}$ (1001–1300 м над ур. м.), а относительная влажность возросла на $\sim 2,6 \%$. Одновременно наблюдается умеренное снижение стандартного отклонения температуры ($-0,059$ и $-0,055$ соответственно), что указывает на стабилизацию термического режима. Эти изменения способствуют более раннему началу и удлинению вегетационного периода, что подтверждается резким ростом NDVI и увеличением максимальных значений NPP до $4599,3 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ в 2020 г. для пояса 1001–1300 м над ур. м.

На среднем высотном уровне (1301–1700 м над ур. м.) наблюдается положительная динамика NDVI и NPP, хотя и менее интенсивная, чем в низкогорье. Согласно ERA5, температура повысилась на $0,62 \text{ }^\circ\text{C}$, влажность возросла на $2,29 \%$. Такие условия благоприятны для развития темнохвойных лесов, доминирующих в этом поясе. Вместе с тем небольшое, но устойчивое увеличение испарения (60 мм/ч) может ограничивать продуктивность в годы с недостаточным количеством осадков, создавая потенциальный риск водного стресса.

На высотном уровне (1701–2200 м над ур. м. и выше) наблюдается наиболее сложная и неоднозначная картина. Положительная аномалия температуры и снижение влажности ($-0,05$ Ст. откл.), что свидетельствует о сочетании потепления и засухливости. Несмотря на небольшое увеличение осадков ($+37 \text{ мм}$), NDVI уменьшается, а средняя NPP остаётся низкой — $3164,2 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Вероятно, это связано с ростом испарения и дефицитом доступной влаги в почве.

На высотном уровне (2201 м над ур. м. и выше) наблюдается умеренное потепление ($+0,95 \text{ }^\circ\text{C}$) и высокая влажность ($+2,41 \%$), что способствует сохранению относительно высоких значений NDVI ($0,437$ в 2024 г.) и NPP до $2373,1 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, несмотря на суровые условия.

В результате анализа выявили следующие ключевые закономерности:

- 1) потепление климата и рост доступной влаги способствуют увеличению NDVI и NPP;
- 2) на верхнем высотном уровне потепление сопровождается снижением влажности и ростом испарения, что ограничивает развитие растительности;
- 3) наблюдаемые тренды в NDVI и NPP обусловлены сложным взаимодействием температуры, влажности, испарения, что подтверждает необходимость комплексного подхода к оценке климатических изменений в горных экосистемах.

Таким образом, результаты показывают, что климатическое потепление на территории Республики Тыва вызывает не только общий средний рост продуктивности растительности, но и пространственно дифференцированные экосистемные отклики. Наиболее динамичные изменения происходят на границах высотных поясов — особенно в нижнем и верхнем уровне, где формируются новые экотоны, трансформируются гидрологические режимы.

Заключение

За последние 25 лет в горных ландшафтах региона наблюдается устойчивый тренд озеленения, проявляющийся в достоверном росте индексов NDVI и NPP во всех высотных уровнях. Наиболее интенсивные изменения зафиксированы в средней части высотных уровней (1300–1700 м над ур. м.), что остаётся самым продуктивным высотным уровнем, где в основном произрастает наибольшая часть лесов на территории республики. Одновременно на верхних высотных уровнях отмечается расширение площади покрытия растительного покрова и зафиксирован местами подъём верхней границы леса — процесс, напрямую связанный с потеплением климата и увеличением продолжительности вегетационного периода.

Выявленная двойственность в реакции экосистем — высокая стабильность и продуктивность в средних высотных поясах на фоне выраженной гидрологической трансформации на верхних и нижних уровнях — подчёркивает необходимость дифференцированного подхода к мониторингу и управлению горными лесами. Особое внимание следует уделять несоответствию между влажностью и продуктивностью в горных экосистемах: повышенная влажность не всегда сопровождается ростом биомассы из-за термических и эдафических ограничений.

Полученные результаты демонстрируют высокую информативность вегетационных индексов NDVI и NDWI для выявления многолетних изменений по высотным уровням на территории республики. Эти данные могут быть использованы как для верификации климатоэкологических моделей, так и для разработки адаптивных стратегий сохранения горных ландшафтов в условиях ускоряющихся климатических изменений.

Литература

1. *Барталев С. А., Луян Е. А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
2. *Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Луян Е. А., Стыценко Ф. В., Флитман Е. В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
3. *Богдан Е. А., Белан Л. Н., Витценко А. Ю. и др.* Дистанционная оценка влияния температурного режима на NDVI растительности Башкирского государственного природного заповедника // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М. К. Аммосова. Сер.: Науки о Земле. 2024. № 3(35). С. 38–50. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-3-38-50.
4. *Богданов Е. А., Хадбаатар С., Бажа С. Н.* Пространственно-временной анализ температуры воздуха, осадков и индекса аридности на территории бассейна озера Байкал // Аридные экосистемы. 2024. Т. 31. № 4(101). С. 4–20. DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-4-20.
5. *Ботвич И. Ю., Высоцкая Г. С., Иванов С. А., Письман Т. И., Шевырногов А. П.* Динамика трендов NDVI растительности Западной Сибири в условиях климатических изменений (по спутнико-

- вым данным) // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2023. Т. 16. № 2. С. 244–251.
6. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Ша Дж. и др. Анализ трендов временных рядов вегетационных индексов по данным MODIS для оценки влияния засух на лесные насаждения Среднего Поволжья с 2000 по 2020 год // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 181–194. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194.
 7. Елсаков В. В., Телятников М. Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории Европейского Северо-Востока России и Западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
 8. Исаченко А. Г. Теория и методология географической науки. М.: Академия, 2004. 400 с.
 9. Карсаков А. А., Назимова Д. И., Пономарев Е. И. Вариативность спектральных характеристик растительности высотно-поясных комплексов юга Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 133–146. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-133-146.
 10. Куулар Х. Б. Состояние и динамика границ темнохвойных лесов хребта Западный Танну-Ола в Республике Тыва // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2023. Т. 78. № 4. С. 40–50. DOI: 10.55959/10.55959/msu0579-9414.5.78.4.4.
 11. Мурадян В. С., Асмарян Ш. Г., Сагателян А. К. Оценка пространственно-временных изменений NDVI (биомассы) в горных экосистемах Армении с использованием дистанционных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 49–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-49-60.
 12. Назимова Д. И., Кошкарлова В. Л., Данилина Д. М., Коновалова М. Е. Пространственно-временная динамика горных темнохвойных лесов на юге Приенисейской Сибири в условиях современных изменений климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 8. С. 1224–1237. <https://doi.org/10.31857/S2587556623080149>.
 13. Парфенова Е. И., Чебакова Н. М. Потенциальное распределение лесов в горах Южной Сибири и Северной Монголии в связи с прогнозируемыми изменениями климата к середине века // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 7. С. 1019–1031. <https://doi.org/10.31857/S2587556623070129>.
 14. Поздняков Л. К. Мерзлотное лесоведение. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1986. 190 с.
 15. Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири / под ред. В. В. Кузьмичева. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.
 16. Сергеев Д. О., Ухова Ю. А., Станиловская Ю. В., Романовский В. Е. Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 2. С. 19–26.
 17. Смагин В. Н., Ильинская С. А., Назимова Д. И., Чередникова Ю. С. Типы лесов гор Южной Сибири / под ред. В. Н. Смагина. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980. 334 с.
 18. Тигеев А. А., Московченко Д. В., Фахретдинов А. В. Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 166–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177.
 19. Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на много-спектральных спутниковых данных // Сибирский эколог. журн. 2020. Т. 27. № 1. С. 129–140. DOI: 10.15372/SEJ20200110.
 20. Gao B.-C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
 21. Ghalehtemouri K. J., Ros F. C., Rambat S., Nasr T. Spatial and temporal water pattern change detection through the Normalized Difference Water Index (NDWI) for initial flood assessment: A case study of Kuala Lumpur 1990 and 2021 // J. Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2024. V. 114. No. 1. P. 178–187. DOI: 10.37934/arfm.114.1.178187.
 22. Kirdyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A. et al. 20th century tree-line advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia // Boreas. 2012. V. 41. No. 1. P. 56–67. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x.
 23. Liu C., Liu J., Zhang Q. et al. Attribution of NDVI dynamics over the globe from 1982 to 2015 // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 11. Article 2706. DOI: 10.3390/rs14112706.
 24. Mu Q., Zhao M., Running S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 8. P. 1781–1800. DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019.
 25. Mu B., Zhao X., Wu D. et al. Vegetation cover change and its attribution in China from 2001 to 2018 // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 3. Article 496. DOI: 10.3390/rs13030496.

26. *Permata F. D., Putra Y. S., Adriat R.* Distribusi spasial tingkat kebasahan lahan di Kota Pontianak menggunakan Normalized Difference Water Index (NDWI) // *Prisma Fisika: Publikasi Riset Mahasiswa*. 2023. V. 10. No. 3. Article 425. DOI: 10.26418/pf.v10i3.60549.
27. *Rouse J. W., Haas R. H., Shell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp. V. 1. Washington, DC, 1973. P. 309–317.
28. *Running S. W., Nemani R. R., Heinsch F. A. et al.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production // *BioScience*. 2004. V. 54. No. 6. P. 547–560. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2.
29. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
30. *Wang Zh., Han F., Li Ch. et al.* Analysis of spatial differentiation of NDVI and climate factors on the upper limit of montane deciduous broad-leaved forests in the east monsoon region of China // *Forests*. 2024. V. 15. No. 5. Article 863. DOI: 10.3390/f15050863.
31. *Williams E., Funk C., Peterson P., Tuholske C.* High resolution climate change observations and projections for the evaluation of heat-related extremes // *Scientific Data*. 2024. V. 11. No. 1. Article 261. DOI: 10.1038/s41597-024-03074-w.
32. *Zhang L., Jiapaer G., Yu T. et al.* Forest dynamics and responses to climate change and human activities in the arid and semiarid regions of the Altai Mountains, China // *J. Plant Ecology*. 2025. V. 18. No. 2. Article rtaf001. 17 p. DOI: 10.1093/jpe/rtaf001.
33. *Zhao D., Hu W., Wang J., Liu J.* Driving factors for vegetation NDVI changes in a cold temperate zone: Climate, topography, and land use // *Forests*. 2024. V. 15. No. 12. Article 2098. DOI: 10.3390/f15122098.

Spatio-temporal dynamics of spectral indices and production in mountainous landscapes of the Republic of Tyva (2000–2024)

Kh. B. Kuular

*Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl 667007, Russia
E-mail: k-k-188@list.ru*

The study presents a comprehensive analysis of the dynamics of vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) and net primary production (NPP) in the Republic of Tyva from 2000 to 2024, explicitly accounting for recent climate changes. We used the LANDSAT/COMPOSITES/C02/T1_L2_ANNUAL_NDVI and LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDWI satellite collections, along with NPP data from the MOD17A3HGF product (500 m resolution). The digital relief model Copernicus GLO-30 (30 m) was used to identify the altitude zones (500–1000, 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200 and 2201 m above sea level and more). Analysis of climate data (ERA5-Land) revealed a steady warming (+0.46–0.62 °C) throughout the territory, accompanied by a decrease in relative humidity (up to –2.53 % in the 1001–1300 m belt), an increase in precipitation (from +18 mm (500–1000 m above sea level) to +44 mm (2200 m and more)), and a stable evaporation rate. Against this climatic backdrop, a statistically significant ($p < 0.05$) “greening” trend is observed across all altitudinal zones, with consistent increases in both NDVI and NPP. The maximum increase in NPP was recorded at elevations of 1700–2200 m. a. s. l., amounting to +540 gC·m⁻²·yr⁻² with an NDVI increase of 0.198, indicating an active upward shift of the upper forest boundary. At elevations of 1300–1700 m. a. s. l., the increase was +268 gC·m⁻²·yr⁻¹ (Δ NDVI = +0.191), and at 500–1000 m. a. s. l., it was +281 gC·m⁻²·yr⁻¹ (Δ NDVI = +0.142). This growth is likely attributed to improved moisture conditions resulting from permafrost degradation. However, ecosystem responses are spatially heterogeneous: NDWI trends show increasing moisture in the North-Tannuolsky and South-Tannuolsky forest districts, but significant ($p < 0.05$) declines in water availability in the West-Sayan, Kaa-Khem, and Khemchik-Kurtushibinsky districts. These findings support the hypothesis of climate-driven transformation of altitudinal vegetation structure: warming and increased precipitation promote forest expansion into high-elevation zones, while declining humidity intensifies water stress in specific low- and mid-elevation areas.

Keywords: NDVI, NDWI, NPP, elevation zones, remote sensing

Accepted: 26.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-205-218

References

1. Bartalev S. A., Loupian E. A., R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 1, pp. 197–214 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 9–26 (in Russian).
3. Bogdan E. A., Belan L. N., Vitsenko A. Y. et al., Remote assessment of the temperature regime impact on the vegetation NDVI at the Bashkir State Nature Reserve, *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*, 2024, No. 3(35), pp. 38–50 (in Russian), DOI: 10.25587/2587-8751-2024-3-38-50.
4. Bogdanov E. A., Khadbaatar S., Bazha S. N., Spatio-temporal analysis of air temperature, precipitation and aridity index in the Lake Baikal basin, *Arid Ecosystems*, 2024, V. 31, No. 4(101), pp. 4–20 (in Russian), DOI: 10.24412/1993-3916-2024-4-4-20.
5. Botvich I. Yu., Vysotskaya G. S., Ivanov S. A., Pisman T. I., Shevyrnogov A. P., Dynamics of NDVI trends of Western Siberia under the condition of climate change (according to satellite data), *J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2023, V. 16, No. 2, pp. 244–251 (in Russian).
6. Vorobyov O. N., Kurbanov E. A., Sha J. et al., Trends analysis of MODIS time series vegetation indices to assess the impact of droughts on forest stands in the Middle Volga from 2000 to 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 181–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194.
7. Elsakov V. V., Teljatnikov M. Yu., Effects of interannual climate fluctuations of the last decade on NDVI in North-East European Russia and Western Siberia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 3, pp. 260–271 (in Russian).
8. Isachenko A. G., *Teoriya i metodologiya geograficheskoi nauki* (Theory and methodology of geographical science), Moscow: Akademiya, 2004, 400 p. (in Russian).
9. Karsakov A. A., Nazimova D. I., Ponomarev E. I., Variability of spectral characteristics of vegetation of altitudinal belts in the south of Siberia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 133–146 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-133-146.
10. Kuular Kh. B., State and dynamics of dark coniferous forest boundaries of the Western Tannu-Ola Ridge in the Republic of Tuva, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2023, V. 78, No. 4, pp. 40–50 (in Russian), DOI: 10.55959/10.55959/msu0579-9414.5.78.4.4.
11. Muradyan V. S., Asmaryan Sh. G., Saghatelyan A. K., Assessment of space and time changes of NDVI (biomass) in Armenia's mountain ecosystems using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 1, pp. 49–60 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-49-60.
12. Nazimova D. I., Koshkarova V. L., Danilina D. M., Konovalova M. E., Spatio-temporal dynamics of mountain dark coniferous forests in the south of the Priyenisei Siberia under modern climate change, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2023, V. 87, No. 8, pp. 1224–1237 (in Russian), <https://doi.org/10.31857/S2587556623080149>.
13. Parfenova E. I., Tchebakova N. M., Potential forest distribution over the South Siberian and North Mongolian Mountains related to predicted climate change by the midcentury, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2023, V. 87, No. 7, pp. 1019–1031 (in Russian), <https://doi.org/10.31857/S2587556623070129>.
14. Pozdnyakov L. K., *Merzlotnoe lesovedenie* (Permafrost forestry), Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1986, 190 p. (in Russian).
15. Polikarpov N. P., Tchebakova N. M., Nazimova D. I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and mountain forests of Southern Siberia), V. V. Kuzmichev (ed.), Novosibirsk: Nauka, 1986, 225 p. (in Russian).
16. Sergueev D. O., Ukhova J. A., Stanilovskaya J. V., Romanovsky V. E., Temperature regime of the permafrost and the active layer in Northern Transbaykalia mountains (recommencement of fixed-site observations), *Earth's Cryosphere*, 2007, V. 11, No. 2, pp. 19–26 (in Russian).

17. Smagin V. N., Il'inskaya S. A., Nazimova D. I., Cherednikova Yu. S., *Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* (Forest types of the mountains of Southern Siberia), V. N. Smagin (ed.), Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение, 1980, 334 p. (in Russian).
18. Tigeev A. A., Moskovchenko D. V., Fahretdinov A. V., Current trends in natural and anthropogenic vegetation in Western Siberia's sub-tundra forests based on vegetation indices data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 166–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177.
19. Shvetsov E. G., Ponomarev E. I., Post-fire effects in Siberian larch stands on multispectral satellite data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, V. 27, No. 1, pp. 129–140 (in Russian), DOI: 10.15372/SEJ20200110.
20. Gao B.-C., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
21. Ghalehtemouri K. J., Ros F. C., Rambat S., Nasr T., Spatial and temporal water pattern change detection through the Normalized Difference Water Index (NDWI) for initial flood assessment: a case study of Kuala Lumpur 1990 and 2021, *J. Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2024, V. 114, No. 1, pp. 178–187, DOI: 10.37934/arfmts.114.1.178187.
22. Kirdeyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A. et al., 20th century tree-line advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia, *Boreas*, 2012, V. 41, No. 1, pp. 56–67, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x.
23. Liu C., Liu J., Zhang Q. et al., Attribution of NDVI dynamics over the globe from 1982 to 2015, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 11, Article 2706, DOI: 10.3390/rs14112706.
24. Mu Q., Zhao M., Running S. W., Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 2011, V. 115, No. 8, pp. 1781–1800, DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019.
25. Mu B., Zhao X., Wu D. et al., Vegetation cover change and its attribution in China from 2001 to 2018, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 3, Article 496, DOI: 10.3390/rs13030496.
26. Permata F. D., Putra Y. S., Adriat R., Distribusi spasial tingkat kebasahan lahan di Kota Pontianak menggunakan Normalized Difference Water Index (NDWI), *Prisma Fisika: Publikasi Riset Mahasiswa*, 2023, V. 10, No. 3, Article 425, DOI: 10.26418/pf.v10i3.60549.
27. Rouse J. W., Haas R. H., Shell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, 3rd *Earth Resources Technology Satellite-1 Symp.*, V. 1, Washington, DC, 1973, pp. 309–317.
28. Running S. W., Nemani R. R., Heinsch F. A. et al., A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production, *BioScience*, 2004, V. 54, No. 6, pp. 547–560, DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2.
29. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, V. 8, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
30. Wang Zh., Han F., Li Ch. et al., Analysis of spatial differentiation of NDVI and climate factors on the upper limit of montane deciduous broad-leaved forests in the east monsoon region of China, *Forests*, 2024, V. 15, No. 5, Article 863, DOI: 10.3390/f15050863.
31. Williams E., Funk C., Peterson P., Tuholske C., High resolution climate change observations and projections for the evaluation of heat-related extremes, *Scientific Data*, 2024, V. 11, No. 1, Article 261, DOI: 10.1038/s41597-024-03074-w.
32. Zhang L., Jiapaer G., Yu T. et al., Forest dynamics and responses to climate change and human activities in the arid and semiarid regions of the Altai Mountains, China, *J. Plant Ecology*, 2025, V. 18, No. 2, Article rtaf001, 17 p., DOI: 10.1093/jpe/rtaf001.
33. Zhao D., Hu W., Wang J. et al., Driving factors for vegetation NDVI changes in a cold temperate zone: climate, topography, and land use, *Forests*, 2024, V. 15, No. 12, Article 2098, DOI: 10.3390/f15122098.