

Вариативность спектральных характеристик растительности высотно-поясных комплексов юга Сибири

А. А. Карсаков, Д. И. Назимова, Е. И. Пономарёв

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mails: evg@ksc.krasn.ru, inpol@mail.ru

Выполнен анализ сезонной динамики спектральных признаков NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и LST (*англ.* Land Surface Temperature), характерных для пространственной структуры растительности высотно-поясных комплексов (ВПК) на примере Танзыбейского полигона в горах юга Сибири. Использовались данные Landsat-8 и Landsat-9 за вегетационный сезон 2023 г. Исследованы количественные характеристики LST и NDVI для пяти представленных в регионе ВПК: высокогорье и курумы, субальпийский, горно-таёжный, черневой и подтаёжный. Наиболее значительные различия диапазонов значений NDVI и LST наблюдаются в мае – июне, что связано с асинхронностью начала вегетационного сезона в зависимости от структуры растительности. Показано, что переходы между ВПК сопровождаются скачкообразными изменениями LST и NDVI. Количественные характеристики температурного (LST) и вегетационного (NDVI) признаков, определяющих растительные покровы высотной зональности в течение вегетационного периода, укладываются в два типичных сценария, применимых для описания группы низкогорных ВПК (черневые леса, подтаёжный) и средне-высокогорных ВПК (горно-таёжный, субальпийский и ВПК высокогорий со скальными выходами). Спектральные различия ВПК в течение сезона вегетации наиболее информативны в фазы начального периода (май – июнь) и не различимы с учётом пересечения доверительных интервалов значений в фенофазу полного лета (август) и в осенний период. В условиях окончания сезона вегетации (сентябрь) значимые отличия характерны только для разграничения черневого и подтаёжного ВПК относительно горно-таёжного и субальпийского ВПК.

Ключевые слова: Landsat, спектральные индексы, LST, NDVI, высотно-поясные комплексы, формации

Одобрена к печати: 08.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-133-146

Введение

Экосистемы ранга высотно-поясных комплексов (ВПК) типов биогеоценозов считаются основными единицами классификации горных лесов региональной размерности и соответствуют зональным категориям ландшафтов в границах физико-географических провинций или округов районирования (Исаченко, 1991, 2004; Поликарпов и др., 1986; Смагин и др., 1980). Мониторинг ВПК представляет самостоятельный научный и практический интерес, особенно в условиях многообразия, характерного для юга Сибири, где в горных лесничествах нередко представлено от 3 до 5–7 ВПК (Назимова и др., 2020).

Данный вариант классификации биогеоценозов основывается на комплексном учёте рельефа, растительности и климата и представляет самостоятельную задачу при изучении отдельных регионов и территорий. Высотно-поясные комплексы типов леса (типов биогеоценозов) как единицы классификации лесных экосистем в горах Южной Сибири используются в лесной типологии Сибири с начала 1960-х гг. (Поликарпов и др., 1986; Семечкин и др., 1985; Смагин и др., 1980). Картографирование ВПК района исследований в среднем масштабе впервые сделано в 1971–1973 гг. при совместных работах специалистов Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) с лесоустроителями Красноярского края при наземном опытно-производственном лесоустройстве, а позже повторено в 2006 г. с использованием геоинформационных технологий в Танзыбейском лесничестве (на площади 178 тыс. га). Результат комплексной работы в этом направлении представляет собой повыведельные карты типов леса и формаций с масштабом 1:50 000 с характеристикой каж-

дого выдела (более 6 тыс. выделов) района исследований. Геоинформационные базы данных вошли в комплексную региональную базу данных Ермаковского горного стационара ИЛ СО РАН. Таким образом, на изучаемой территории Танзыбейского полигона, расположенного в горах юга Сибири, совокупность ВПК является основой проведения всего комплекса натурных обследований (Данилина и др., 2018; Назимова и др., 2020).

В анализе состояния растительности ВПК свою эффективность показали данные мультиспектральной спутниковой съёмки (Fu et al., 2024; Qureshi et al., 2020; Vickers et al., 2020). В частности, для ВПК горного юга Сибири представлена возможность и обзорного уровня спутникового мониторинга, и перехода к региональной и локальной детализации характеристик растительного покрова (Назимова и др., 2005; Пономарёв и др., 2011).

Задачи оценки состояния растительности (Doubková et al., 2012), а также мониторинга изменений во времени (Qureshi et al., 2020) эффективно решаются с применением спектрального индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index). Используется также показатель LST (*англ.* Land Surface Temperature), который позволяет косвенно характеризовать степень нарушенности изучаемых ландшафтов по отклонениям температурного поля от характерных значений фона (Карсаков, Пономарев, 2024; Tucker, 1979). Спектр применения LST достаточно широк — от изучения климатических изменений и оценки теплового состояния ландшафтов (Горный и др., 2023) до прогнозирования урожайности (Ciazela, Ciazela, 2021; Halefom et al., 2024) и мониторинга растительности (Baratto et al., 2024).

В настоящей работе не ставилась цель определения или актуализации совокупности ВПК на участке исследования, поскольку эта работа уже выполнена и сведения о границах ВПК доступны (Данилина и др., 2018). Новым аспектом исследования стал анализ отклика спектральных индексов на сезонную динамику растительности в пределах выделенных ВПК горного профиля юга Сибири. Вопрос рассмотрен на примере Танзыбейского полигона Красноярского края на горном юге Сибири. Проверялась гипотеза о наличии закономерностей пространственной и сезонной вариативности спектральных индексов NDVI и LST, отражающих особенности представленных в ВПК вариантов растительного покрова. При этом задача усложняется бидоминантным или полидоминантным составом древесного яруса высотных поясов и, что существенно, различиями в характере сезонных сроков и фаз (Молокова, 1992; Молокова, Назимова, 2023; Назимова и др., 2020).

Цель работы — характеристика отклика спектральных признаков растительных покровов в терминах вариативности NDVI и LST в различные сроки вегетационного периода при переходах между высотными поясами горной территории юга Сибири.

Рассматривались следующие вопросы:

1. Сезонная вариативность температурного (LST) и вегетационного (NDVI) признаков в соответствии с особенностями фенологического цикла растительности выделяемых ВПК;
2. Трансектные измерения амплитуды колебаний значений NDVI и LST и анализ различий спектральных индексов, связанных с асинхронностью фаз растительных покровов в границах ВПК.

Район исследований

Район исследований расположен на юге Красноярского края (53°00' с. ш., 93°00' в. д.) в границах Танзыбейского участкового лесничества Ермаковского лесничества Красноярского края. Исследуемый полигон пересекает хребты Кулумыс, Переломный, Березовский, Ойский Западного Саяна (*рис. 1*, см. с. 135). Как научная база Института леса СО РАН полигон существует с 1960 г. и хорошо изучен с лесоводственно-экологических позиций. Для полигона доступна база данных, включающая материалы лесоустройства, данные по биоразнообразию, типологическому составу лесов, фенологии и климатическим параметрам ВПК (Молокова, 1992; Назимова и др., 2020; Поликарпов и др., 1986).

Район исследований характеризуется преимущественно среднегорным рельефом с перепадом абсолютной высоты от 250–300 м на севере до 1500–1600 м на водоразделах хребтов

южной части полигона. В высокогорьях широко распространены выположенные поверхности, выше верхней границы леса (от 1500 до 2300 м) присутствуют альпийские формы рельефа. В среднегорье рельеф в значительной степени рассечён.

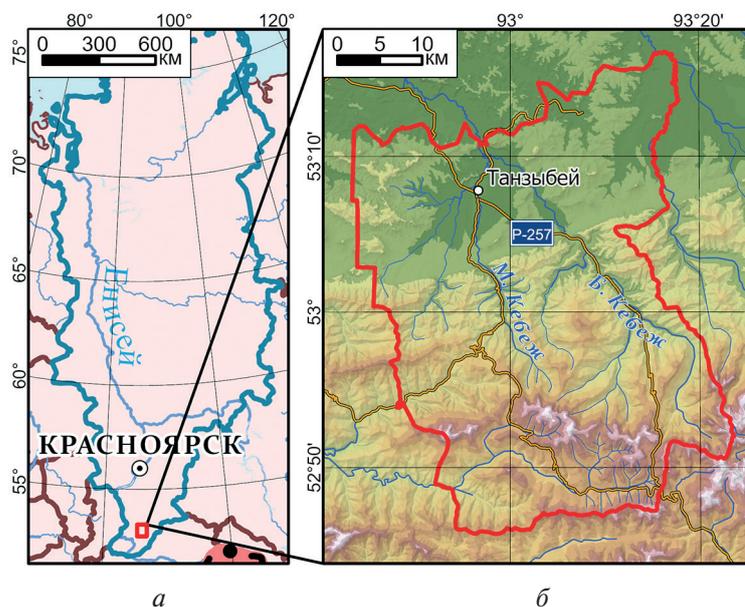


Рис. 1. Танзыбайское участковое лесничество на карте рельефа SRTM (англ. Shuttle Radar Topographic Mission) (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm>)

Климат характеризуется сниженной континентальностью, быстрым нарастанием суммы годовых осадков с высотой (500–700 мм в низкогорье, 1000–1500 мм в среднегорье и 1300–1500 мм в высокогорье), высокими градиентами относительного увлажнения и выраженными температурными градиентами (Поликарпов и др., 1986; Чебакова, Садовнича, 1985). По данным натурных обследований это способствует формированию спектра поясности с доминированием влаголюбивой пихты (*Abies sibirica*) и сосны сибирской (*Pinus sibirica*). В северных предгорьях, на переходе к котловине, сформирована сосново-лиственничная подтайга (*Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Populus tremula*). При однообразии породного состава древостоя в диапазоне высот от 350 до 1500 м (пихта и сосна сибирская (кедр)) нижние ярусы представлены 18 эколого-ценотическими группами трав, кустарниками, мхами и лишайниками (всего более 1200 видов флоры).

По признакам состава и фитоценотической структуры выделяются следующие высотные поясные комплексы (рис. 2, см. с. 136): 1) ВПК высоко-среднегорных комплексов, включающих горные тундры, скальные выходы, курумы и другие участки поверхности (900–1800 м); 2) ВПК субальпийский пихтово-кедровый с сочетанием редколесий, высокотравных субальпийских лугов и изолированных массивов кедровников выше верхней границы леса (1350–1600 м); 3) ВПК горно-таёжный избыточно-влажный пихтовый с участием сосны сибирской (кедра), с фоновым комплексом таёжных трав и мхов на оподзоленных бурозёмах (800–1350 м); 4) ВПК черневых лесов с доминированием пихты, кедра, берёзы и осины, с покровом из крупнотравья и папоротников, мхов (в поясе 350–900 м); 5) ВПК подтаёжный светлохвойно-мелколиственный, расположенный на высотах 250–350 и до 500 м.

Приводимые границы ВПК территории интересов (см. рис. 2) соответствуют данным лесоустройства и типологии, разработанной в ИЛ СО РАН (Смагин и др., 1980). Используемая схема ВПК отражает результаты наземного опытно-производственного лесоустройства, актуализированного в 2006 г. с применением геоинформационных технологий на территорию Танзыбайского лесничества для 6250 выделов на площади 178 тыс. га в масштабе 1:50 000 (Данилина и др., 2018; Назимова и др., 2020).

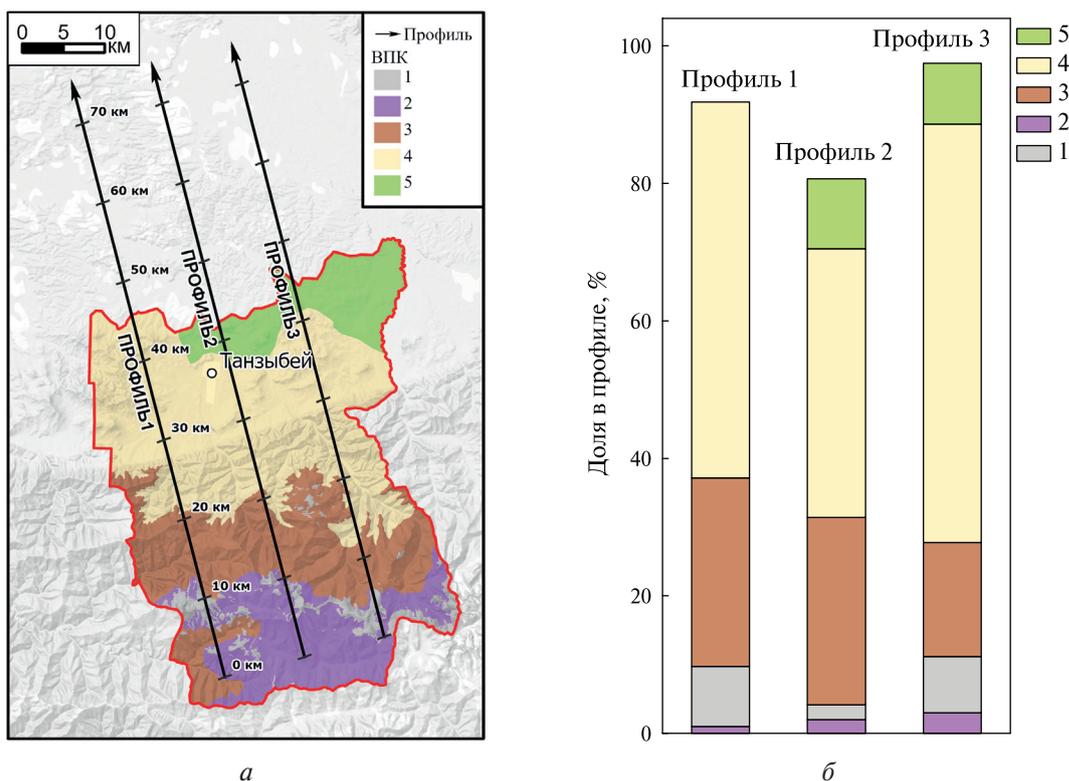


Рис. 2. Положение тестовых профилей на схеме ВПК территории исследований (а) и гистограмма процентного соотношения протяжённости профилей в пределах представленных ВПК (б). Высотно-поясные комплексы: 1 — скалы, курумы, выходы и обнажения горных пород, 2 — субальпийские редколесья и кустарники, 3 — горная темнохвойная травяно-зеленомошная тайга, 4 — черневые темнохвойные и мелколиственные травяные леса, 5 — подтайга светлохвойно-мелколиственная

С целью количественной характеристики температурного (LST) и вегетационного (NDVI) признаков растительного покрова высотной зональности рассмотрены данные вдоль трёх профилей, отложенных в геоинформационной системе картометрическим методом с юго-юго-востока на северо-северо-запад, протяжённостью по 75 км (см. рис. 2).

Профиль 1 не пересекает подтаёжный ВПК, до 55 % протяжённости расположено в черневом ВПК, а также 9 и 6 % — в субальпийском ВПК и поясе курумов соответственно. Профиль 2 на 20 % своей протяжённости располагается в субальпийском ВПК, пересекает селитебные участки (посёлки Танзыбей и Покровка) за пределами Танзыбейского полигона и незначительно пересекает пояс курумов (2 % протяжённости). Профиль 3 имеет наибольшую протяжённость пересечения пояса курумов (8,1 %), также наибольшей протяжённостью (59 %) представлен в ВПК черневых лесов, в котором дважды пересекает р. Большой Кебеж (см. рис. 1, 2).

Вдоль профилей с шагом 100 м выполнялась выборка значений индексов, вычисленных по результатам обработки спутниковых съёмки. Дискретизация шага измерений обусловлена разрешением используемых растровых изображений (30 м для NDVI, 100 м для LST). Для полученных рядов данных применялась процедура сглаживания методом Савицкого — Голея, предназначенного для удаления высокочастотного спорадического шума из ряда данных. Метод использует локальную полиномиальную регрессию вокруг каждой точки и создаёт новое сглаженное значение для каждой точки данных, при этом стремится сохранить форму пиков. Отсечение спорадических экстремумов подчёркивает закономерности пограничных значений спектральных индексов при переходах между ВПК.

В целях количественной оценки сезонных фенологических особенностей спектральных индексов каждого ВПК на основе рядов данных рассчитывали и анализировали средние значения показателей для каждого месяца вегетационного периода.

Материалы и методы

Доминирующие варианты древостоев контролировали по данным информационного ресурса «Вега-Pro» (Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва) (<http://pro-vega.ru/maps/>) (Барталев и др., 2016; Loupian et al., 2022). Материалы портала обновляются по данным обработки спутниковой съёмки инструментов Terra, Aqua/MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением 230 м. В горном рельефе при выраженной экспозиции и крутизне склонов мезорельефа такое разрешение не позволяет классифицировать вариативность растительности на формах рельефа, экспозиции, как и на крутизне склонов или плоских водоразделов. Однако в обзорном плане высотная поясность на материалах такого пространственного разрешения выявляется.

Характеристики ВПК актуализировали по данным съёмки Landsat-8, -9/ETM+/OLI/TIRS (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus/Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) из открытого каталога USGS (*англ.* United States Geological Survey) (<https://earthexplorer.usgs.gov>), выполненной в дневное время суток. Использовались данные съёмки в красном (*англ.* Red) диапазоне ($\lambda = 0,63...0,69$ мкм), ближнем инфракрасном NIR (*англ.* Near-infrared) диапазоне ($\lambda = 0,85...0,89$ мкм) с разрешением 30 м, а также данные в тепловом канале ($\lambda = 10,40...12,50$ мкм) с разрешением 100 м. В работе рассмотрен временной интервал май – сентябрь 2023 г., за исключением июля, по причине отсутствия информативных спутниковых сцен. Периодичность обновления данных составляла 16 сут.

Использованы стандартные продукты Landsat-8, -9 Collection 2 Level-2 (L2SP (*англ.* Level 2 Science Product)) (<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide>), где содержатся сведения о LST, вычисляемой как

$$LST = \frac{T_B}{\left[1 + \left(\frac{\lambda T_B}{\rho}\right) \ln(\varepsilon)\right]},$$

где LST — температура подстилающей поверхности, К; T_B — яркостная температура, К; λ — длина волны излучения, $\lambda = 10,904$ мкм для Landsat/OLI/TIRS; ρ — комбинированная константа, $\rho = (hc)/\sigma = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К; σ — зд. постоянная Больцмана, $\sigma = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; h — постоянная Планка, $h = 6,26 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; c — скорость света, $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с; ε — коэффициент излучения поверхности земли, связанный с индексом растительности NDVI соотношением $\varepsilon = 1,0094 + 0,047 \ln(\text{NDVI})$.

Вегетационный индекс NDVI вычислялся из стандартного отношения:

$$\text{NDVI} = \frac{L_{\text{NIR}} - L_{\text{Red}}}{L_{\text{NIR}} + L_{\text{Red}}},$$

где L_{NIR} — спектральная яркость в ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 0,85...0,89$ мкм), L_{Red} — спектральная яркость в красной части видимого спектра ($\lambda = 0,63...0,69$ мкм).

Яркостные значения L были получены в результате радиометрической коррекции цифровых отсчётов снимков и представлены в физических единицах $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ на основе коэффициентов калибровки.

Анализировались тренды Tr (*англ.* trend) (в %) в сезоне как изменение текущего значения спектрального индекса LST или NDVI по отношению к значению предыдущего месяца:

$$Tr = \frac{x_{t+1} - x_t}{x_t} \times 100 \%,$$

где x_t — значение индекса в предыдущий месяц; x_{t+1} — значение в следующий месяц.

Достоверность различий между ВПК можно оценить с помощью статистического теста t -критерия Стьюдента или коэффициента вариации. В настоящей работе использовали коэффициент вариации CV (*англ.* coefficient of variation), вычисляемый как

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%,$$

где σ — стандартное отклонение; \bar{x} — среднее значение параметра за месяц, рассчитанное для соответствующего ВПК.

Доверительный интервал CI (*англ.* confidence interval) для выборочного среднего (\bar{x}) получен следующим образом:

$$CI = \pm Z \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где n — объём выборки ($n = 30$); Z — стандартная табулированная оценка для принятого уровня значимости, соответствующая двустороннему доверительному интервалу ($Z = 1,96$ для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и достоверности $P = 95\%$).

Для геопространственного анализа и сопряжения векторных информационных слоёв на район исследований использовали стандартные сервисы продукта QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information System, версия 3.32, <https://www.qgis.org/>).

Полученные наборы данных были применены для построения кривых, аппроксимирующих динамику исследуемых параметров (NDVI, LST) в течение летнего сезона 2023 г. в каждом ВПК. Для этого применялась линейная аппроксимация на основе среднемесячных значений индексов в течение вегетационного периода. Пространственная вариативность при переходах между ВПК анализировалась по модулю относительного изменения NDVI, LST в пограничных зонах с усреднением по трём заданным профилям.

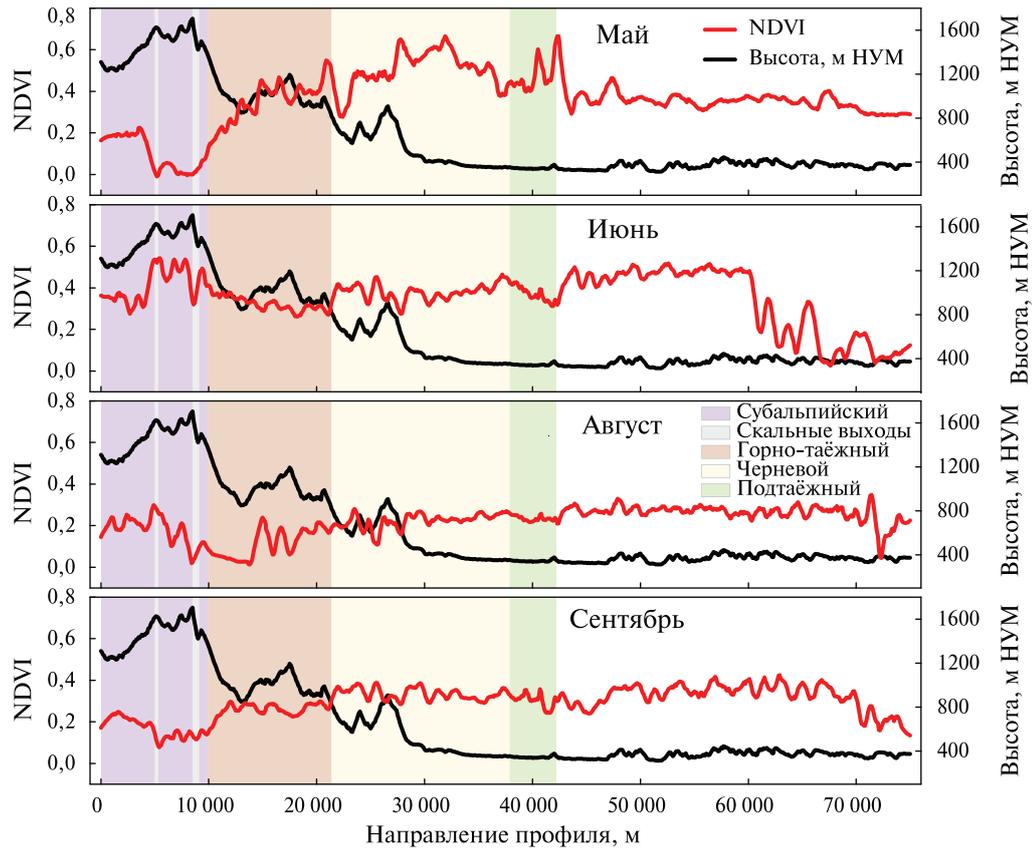
Результаты и обсуждение

Рассматриваемые ВПК характеризуются следующим фенологическим циклом. Начало периода вегетационной активности — май. В нижних поясах подтайги и низкогорьях черневого пояса (черневые леса) — это уже зелёная весна, без снега; в горной тайге — таяние снега, начало вегетации, а выше — начало таяния снежного покрова. Июль — август, как правило, представляет собой фенофазу полного лета на всём горном профиле. Конец августа — начало сентября — это конец полного лета в нижних поясах (черневые леса, подтайга). В субальпийском поясе эта фаза начинается уже с 10 августа, при этом в горной тайге с 20 августа лето заканчивается, далее наступает короткая осень, означающая завершение вегетации уже к началу сентября. По натурным наблюдениям в низкогорье осень заканчивается к 10–20 сентября. Первый снег в высокогорье и среднегорье часто бывает уже в конце августа, но постоянно устанавливается к середине или концу сентября. Однако сентябрь — всё ещё фенофаза золотой осени в подтайге и черневых лесах (Назимова и др., 2023; Nazimova et al., 2014). В пихтовой горной тайге и высокогорье такой фенофазы нет.

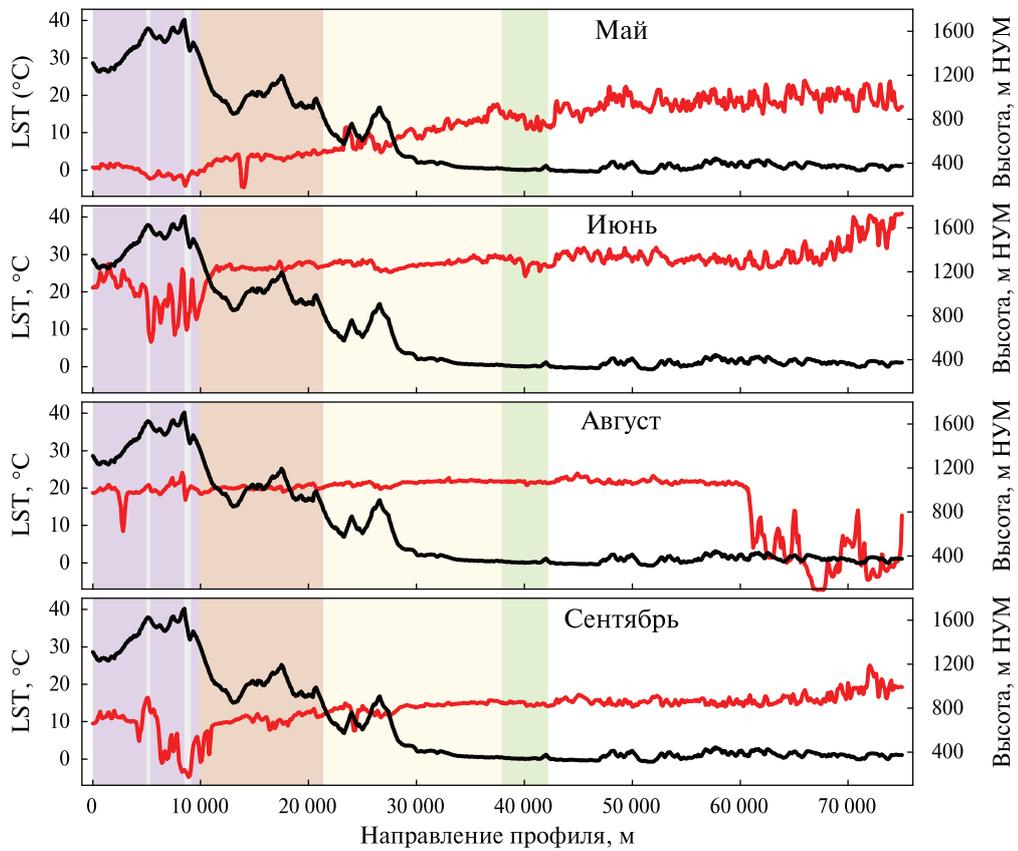
Диапазоны изменения индекса NDVI в течение вегетационного сезона с учётом положения профилей характеризуют сезонную динамику растительности относительно ВПК.

С учётом различий высот и асинхронности фенофаз в разных ВПК зафиксировано закономерное повышение средних значений NDVI и LST в начальный период сезона вегетации (май и июнь) от курумов и горной тундры к субальпийскому, горно-таёжному, черневым лесам и подтайге.

Высотно-поясные комплексы курумов и субальпийский только в июне достигают значений NDVI (0,15–0,19), сравнимых по амплитуде с майскими нормами (0,15–0,20) для горной тайги, подтайги и черневых лесов. При этом максимумы сезонной вариации NDVI (0,34–0,41) зафиксированы для августа во всех рассматриваемых ВПК (*табл. 1*). Аналогичная картина для начала вегетации (май) зарегистрирована и для данных LST. Необходимо отметить, что сезонные максимумы LST были характерны для фенофазы июня (20–27 °C) и только в ВПК курумов и горной тундры максимум средних значений LST пришёлся на август. Переходам между ВПК соответствуют характерные скачкообразные изменения спектрального индекса (*рис. 3* (см. с. 139), *табл. 2*).



а



б

Рис. 3. Пример вариативности значений NDVI (а) и LST (б) вдоль профиля 2 в течение сезона. Цветовая классификация ВПК соответствует рис. 2

Таблица 1. Сезонный срез значений NDVI и LST для Танзыбейского полигона по материалам обработки спутниковых снимков Landsat

ВПК	Месяц	NDVI			LST		
		$\bar{x} \pm \sigma$	max	CV, %	$\bar{x} \pm \sigma$	max	CV, %
Курумы, горная тундра	Май	0,02±0,04	0,33	208	-1,35±1,67	13,29	124
	Июнь	0,15±0,06	0,43	40	18,32±5,57	31,30	30
	Август	0,34±0,12	0,62	35	21,10±1,86	28,01	9
	Сентябрь	0,19±0,07	0,42	37	11,58±2,29	18,67	20
Субальпийский	Май	0,08±0,06	0,32	75	0,47±1,43	7,14	304
	Июнь	0,19±0,05	0,43	28	20,39±4,86	31,52	24
	Август	0,38±0,10	0,63	26	19,84±1,05	25,37	5
	Сентябрь	0,21±0,06	0,42	29	11,13±1,81	19,71	9
Горно-таёжный	Май	0,15±0,05	0,35	34	3,34±1,76	13,62	53
	Июнь	0,25±0,05	0,54	20	26,21±1,91	32,32	7
	Август	0,32±0,06	0,60	19	20,20±0,85	24,36	4
	Сентябрь	0,20±0,06	0,45	30	11,64±1,26	15,89	11
Черневые леса	Май	0,20±0,04	0,36	21	9,91±3,15	24,51	32
	Июнь	0,34±0,05	0,53	15	26,97±0,94	35,06	3
	Август	0,38±0,06	0,60	16	21,23±0,61	27,23	3
	Сентябрь	0,24±0,05	0,50	21	13,77±0,99	20,20	7
Подтайга	Май	0,19±0,04	0,31	20	14,40±2,45	23,52	17
	Июнь	0,34±0,05	0,53	15	27,44±1,40	35,19	5
	Август	0,41±0,05	0,57	13	21,53±0,46	28,66	2
	Сентябрь	0,26±0,04	0,47	15	14,61±0,69	19,57	5

Таблица 2. Модуль относительного изменения NDVI и LST на переходах между ВПК

Переход между ВПК	Май	Июнь	Август	Сентябрь
	<i>Изменение NDVI, %</i>			
Субальпийский/курумы	86	43	9	59
Курумы/горно-таёжный	2253	159	17	45
Горно-таёжный/черневые леса	41	30	17	26
Черневые леса/подтайга	7	11	2	1
	<i>Изменение LST, %</i>			
Субальпийский/курумы	967	30	2	41
Курумы/горно-таёжный	233	90	3	25
Горно-таёжный/черневые леса	201	6	7	17
Черневые леса/подтайга	25	0,3	1	6

Температура LST и вегетативная активность (NDVI) существенно изменяются не только в зависимости от высоты над уровнем моря (НУМ), но и при переходах между ВПК, отражая закономерности сезонной динамики различных вариантов растительного покрова.

Согласно линейной шкале, отмеченной на рассмотренных профилях, пограничная зона между ВПК может составлять от 500 до 2500 м в зависимости от значимости градиента высот для радикальной смены лесорастительных условий.

Наиболее выраженные изменения в начале вегетационного сезона (май) фиксировались для перехода между ВПК горно-таёжным и курумами (2253 %) и субальпийским и курумами (86 %), что указывает на существенные отличия в характере вегетационной активности субальпийского и горно-таёжного ВПК по сравнению с курумами и высокогорьями. Далее в сезоне (июнь) отмечен скачок значений NDVI при переходах между подтайгой и черневыми лесами ~11 % и горно-таёжным ВПК и черневыми лесами — 18 %, соответственно различиям в их фенологическом состоянии. В фазе конца полного лета (август) амплитуда колебаний снижалась, достигая минимальных значений между ВПК подтайги и черневых лесов. В сентябре наиболее значимые различия зафиксированы при переходе между горно-таёжным ВПК и курумами (45 %), что отражает контраст между состоянием скудной растительности на скальных выходах и сомкнутых древостоев в горно-таёжном ВПК.

Для температуры LST (см. рис. 3б) скачки при переходах между ВПК были характерны преимущественно для начала сезона вегетации. Так, на переходе между субальпийским ВПК и курумами в мае снижение LST составило 967 % (табл. 2), в связи с преобладанием в проективном покрытии ВПК курумов открытых скальных участков. В июне наибольшие изменения зафиксированы для перехода между ВПК курумов/горно-таёжным (90 %), что отражает асинхронность начала вегетации в данных ВПК. К августу амплитуда колебаний сократилась, составив на переходах между горно-таёжным/подтайгой и подтайгой/черневыми лесами величину 8 и 1 % соответственно. В сентябре переход между ВПК подтайги/черневых лесов характеризовался скачком LST на уровне 6 %, что указывает на сохранение теплового градиента между подтаёжным и черневым поясами. В целом наблюдалась тенденция роста значений LST от субальпийского ВПК к подтаёжному, в широтном смысле — при движении с юга на север. В мае в субальпийском ВПК среднее значение составляло $LST = -1,35$, а в подтаёжном — $LST = 14,4$, что отличается более чем на 1000 %.

Количественные характеристики температурного (LST) и вегетационного (NDVI) признаков, определяющих растительные покровы высотной зональности в течение вегетационного периода, укладываются в два типичных сценария, применимых для описания низкогорных (черневые леса, подтайга) и средне-высокогорных (горно-таёжный, субальпийский, курумы и горная тундра) ВПК.

Отличия в разные сезоны вегетации по показателю NDVI достигают 90 % от среднемесячной нормы (рис. 4).

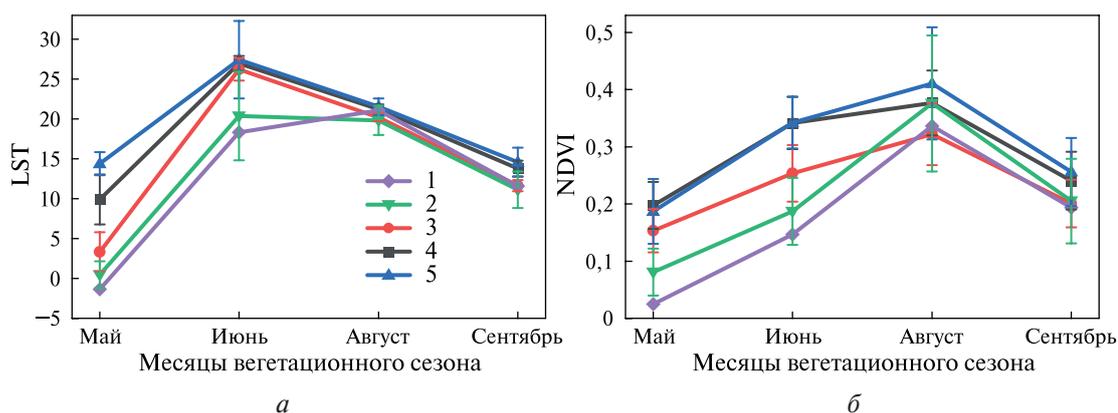


Рис. 4. Сезонная динамика спектральных индексов для ВПК территории Танзыбайевского полигона по данным рядов индекса: а — LST; б — NDVI. По результатам обработки изображений Landsat за вегетационный период 2023 г. ВПК: 1 — скалы, курумы, выходы и обнажения горных пород; 2 — субальпийские редколесья и кустарники; 3 — горная темнохвойная травяно-зеленомошная тайга; 4 — черневые темнохвойные и мелколиственные травяные леса; 5 — подтайга светлохвойно-мелколиственная

В конце сезона вегетации (август–сентябрь) признак LST фактически теряется, так как кривая не имеет значимых отличий при переходе между классами ВПК (см. рис. 4а). В сен-

тябре в терминах LST фиксируется только переход между субальпийским и горно-таёжным ВПК, вероятно, обусловленный наличием частичного или устойчивого снежного покрова в высокогорьях и среднегорьях региона.

Кривые сезонного хода LST и NDVI для рассматриваемых ВПК иллюстрируют два варианта распределения. Ключевое отличие трендов в том, что в период июнь – август рост NDVI для низкогорных ВПК (черневые леса, подтайга), расположенных на высотах 350–800 м, в среднем составил 90 % в месяц, а для высокогорных (субальпийский и курумы) с относительными высотами 1350–1800 м — 72 % в месяц. Высотно-поясной комплекс горно-таёжный (пихтовая тайга) представляется переходным (см. *рис. 4*). При этом тренд роста NDVI в течение сезона соответствует наблюдаемому в низкогорьях. Зафиксированные варианты сезонного хода NDVI определяются тем, что в горно-таёжном ВПК характерно преобладание сомкнутых пихтовых древостоев, тогда как в черневых лесах доминируют пихтово-лиственные (с берёзой, осинкой), а в подтаёжном — хвойно-лиственные формации с участием сосны, берёзы и осины.

Не только структура растительности и доминирующие древостои, но и состав подстилающего покрова лимитируют диапазоны рассмотренных спектральных характеристик. В гумидном климате большой вклад в продуктивность наземной биомассы (т.е. в характеристику, формирующую спектральный признак NDVI) даёт биомасса травяного покрова, сопоставимая с ежегодным приростом наземной массы древесного яруса (Шамрикова и др., 2020). Это справедливо, прежде всего, для выделяемых черневого и подтаёжного ВПК. Травяной и кустарниковый ярусы выступают в роли субэдикторов в коренных и производных лесах в низкогорьях Танзыбейского полигона, формируя сходную динамику рассмотренных показателей в течение вегетационного сезона.

Иначе выглядит структура древесного полога в рассмотренных ВПК, относимых к горной тайге. Здесь густые участки пихтовых древостоев IV класса бонитета с травяно-зеленомошным покровом перемежаются с ложбинами и долинами обильных ручьёв, где развито гигрофильное высокотравье. Вдоль русел рек и в каменистых нижних частях склонов доминирует сосна сибирская (кедр), но выше 800–900 м абсолютных высот его повсюду сменяет пихта, так как кедр не выдерживает избыточного атмосферного увлажнения и не может возобновляться (гибнет в молодом возрасте).

Результаты позволяют констатировать, что наиболее значимые различия показателей LST и NDVI, которые могут быть использованы для контроля высотно-поясных комплексов юга Сибири, проявляются в начале сезона вегетации (май – июнь). Во второй половине лета (август) различия спектральных признаков ВПК становятся наименьшими (см. *рис. 4*).

Сегодня общепотребимым стал подход количественного анализа характеристик растительных сообществ с применением стандартных процедур классификации данных дистанционного зондирования. Это позволяет получить, как минимум, обзорные варианты классификации территорий исследований, основываясь на материалах спутниковых съёмки и цифровых продуктов открытого доступа. При этом немаловажную роль в калибровке и верификации результатов обработки спутниковых съёмки всегда выполняют данные натурных обследований, в том числе — информация наземного лесоустройства, представленная по выделам. Такие материалы для всех регионов страны сегодня доступны ограниченно. Тем более, по нашему мнению, ценен представленный в настоящей работе опыт контроля спектральных характеристик многокомпонентных растительных сообществ ВПК, описанных на основе сведений о пространственном и высотном разнообразии, выявленном предварительно непосредственно в натуральных условиях.

Заключение

В рассмотренном регионе гор Южной Сибири выявленные количественные характеристики температурного (LST) и вегетационного (NDVI) признаков, определяющих растительные покровы высотной зональности в течение вегетационного периода, укладываются в два

типичных сценария, применимых для описания группы низкогорных ВПК (черневые леса, подтаёжный) и средне-высокогорных ВПК (горно-таёжный, субальпийский и часть ВПК горных тундр, курумов и скальных выходов).

Такие значительные изменения определяются не только особенностями расположения высотных поясов, но и существенными различиями в микроклиматических условиях, в структуре растительности, доминирующих древостоях и составе кустарникового, травяного и мохово-лишайникового ярусов растительности.

Показано, что спектральные различия ВПК в течение сезона вегетации наиболее информативны в фазы начального периода (май – июнь) и не различимы с учётом пересечения доверительных интервалов значений в фенофазу полного лета (август) и в осенний период. В условиях окончания сезона вегетации (сентябрь) значимые отличия характерны только для разграничения черневого и подтаёжного ВПК относительно горно-таёжного и субальпийского ВПК.

Актуализация характеристик ВПК с использованием спектральных индексов и данных съёмки Landsat имеет большую значимость для развития программы наземных обследований.

Работа выполнена по госзаданию FWES-2024-0028. Использованы материалы спутникового мониторинга в рамках госзадания № FWES-2024-0023, полученные на оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

1. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Горный В. И., Бровкина О. В., Киселев А. В., Тронин А. А.* Тенденции развития дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 9–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-9-38.
3. *Данилина Д. М., Назимова Д. И., Гостева А. А. и др.* Выявление потенциальных ареалов охраняемых видов растений на эколого-географической основе // *География и природные ресурсы*. 2018. № 1. С. 42–51. DOI: 10.21782/gipr0206-1619-2018-1(42-51).
4. *Исаченко А. Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высш. шк., 1991. 366 с.
5. *Исаченко А. Г.* Теория и методология географической науки. М.: Академия, 2004. 400 с.
6. *Карсаков А. А., Пономарев Е. И.* Дистанционный мониторинг теплового состояния подстилающей поверхности в контексте техногенных трансформаций // *Биосфера*. 2024. Т. 16. № 1. С. 20–29.
7. *Молокова Н. И.* Эколого-ценотический анализ и феноиндикация высотно-поясных комплексов типов леса (на примере гумидных районов Саян): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 1992. 23 с.
8. *Молокова Н. И., Назимова Д. И.* Фенологические критерии как индикаторы функционирования сообществ и экосистем // *Тр. Международ. конф. «Ботаника и ботаники в меняющемся мире»*. Томск: ТГУ, 2023. С. 42–44.
9. *Назимова Д. И., Пономарев Е. И., Степанов Н. В., Федотова Е. В.* Черневые темнохвойные леса на юге Красноярского края и проблемы их обзорного картографирования // *Лесоведение*. 2005. № 1. С. 12–18.
10. *Назимова Д. И., Пономарев Е. И., Коновалова М. Е.* Роль высотно-поясной основы и дистанционных данных в задачах устойчивого управления горными лесами // *Лесоведение*. 2020. № 1. С. 3–16. DOI: 10.31857/S0024114820010106.
11. *Назимова Д. И., Кошкарова 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. DOI: 10.31857/S2587556623080149.
12. *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.
13. *Пономарёв Е. И., Исмаилова Д. М., Назимова Д. И.* Спутниковый мониторинг горных лесных экосистем Саян // *Журн. Сибирского федер. ун-та*. 2011. Т. 4. № 1. С. 75–85.

14. Семечкин И. В., Поликарпов Н. П., Ирошников А. И. и др. Кедровые леса Сибири. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1985. 256 с.
15. Смагин В. Н., Ильинская С. А., Назимова Д. И., Чередникова Ю. С. Типы лесов гор Южной Сибири / под ред. В. Н. Смагина. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1980. 334 с.
16. Чебакова Н. М., Садовнича Е. А. Связь вертикальной зональности с радиационными факторами климата в Западном Саяне // География и природные ресурсы. 1985. Т. 3. № 1. С. 53–58.
17. Шамрикова Е. В., Жангуров Е. В., Кулюгина Е. Е. и др. Почвы и почвенный покров горно-тундровых ландшафтов Полярного Урала на карбонатных породах: разнообразие, классификация, распределение углерода и азота // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1053–1070. DOI: 10.31857/s0032180x20090154.
18. Baratto J., de Bodas Terassi P. M., Galvani E. Changes in vegetation cover and the relationship with surface temperature in the Cananéia–Iguape Coastal System, São Paulo, Brazil // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 18. Article 3460. DOI: 10.3390/rs16183460.
19. Ciazela M., Ciazela J. Topoclimate mapping using Landsat ETM+ thermal data: Wolin island, Poland // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 14. Article 2712. DOI: 10.3390/rs13142712.
20. Doubková M., Van Dijk A. I. J. M., Sabel D. et al. Evaluation of the predicted error of the soil moisture retrieval from C-band SAR by comparison against modelled soil moisture estimates over Australia // Remote Sensing Environment. 2012. V. 120. P. 188–196. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.031.
21. Fu J., Liu J., Qin J. et al. Monitoring long-term vegetation dynamics over the Yangtze River Basin, China, using multi-temporal remote sensing data // Ecosphere. 2024. V. 15. No. 3. Article e4809. DOI: 10.1002/ecs2.4809.
22. Halefom A., He Y., Nemoto T. et al. The impact of urbanization-induced land use change on land surface temperature // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 23. Article 4502. DOI: 10.3390/rs16234502.
23. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A. et al. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
24. Nazimova D. I., Danilina D. M., Stepanov N. V. Rain-barrier forest ecosystems of the Sayan Mountains // Botanica Pacifica. 2014. V. 3. No. 1. P. 39–47.
25. Qureshi S., Alavipanah S. K., Konyushkova M. et al. A remotely sensed assessment of surface ecological change over the Gomishan Wetland, Iran // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 18. Article 2989. DOI: 10.3390/RS12182989.
26. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // J. Remote Sensing Environment. 1979. V. 2. No. 8. P. 127–150.
27. Vickers H., Karlsen S. R., Malnes E. A 20-year MODIS-based snow cover dataset for Svalbard and its link to phenological timing and sea ice variability // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 7. Article 1123. DOI: 10.3390/rs12071123.

Variability of the spectral characteristics of vegetation of altitudinal belts in the south of Siberia

A. A. Karsakov, D. I. Nazimova, E. I. Ponomarev

*Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mails: evg@ksc.krasn.ru, inpoi@mail.ru*

The paper examines the seasonal dynamics of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and LST (Land Surface Temperature) spectral indices, which are characteristic of the spatial structure of vegetation of altitudinal-belt complexes (ABC), using the example of the Tanzybey test site in the mountains of Southern Siberia. We used Landsat-8 and Landsat-9 data for the 2023 growing season. Quantitative characteristics of LST and NDVI were investigated for five ABC represented in the region, such as belts of highlands with rocky outcrops, subalpine, mountain-taiga, dark coniferous forest and subtaiga belt. The most significant differences in the ranges of NDVI and LST values were observed in May–June, which is associated with the asynchrony between the beginning of the growing season depending on the vegetation structure. It is demonstrated that transitions between the ABC are accompanied by abrupt changes in LST and NDVI. The quantitative characteristics of temperature (LST) and vegetation (NDVI) features characterizing vegetation covers of altitudinal zonality during the growing season fit into two typical scenarios applicable to the description of a group of

low-mountain ABC (dark coniferous chern forests, light coniferous subtaiga) and mid-high-mountain ABC (mountain-taiga, subalpine and the belt of highlands with rocky outcrops). Spectral differences in the ABC during the vegetation season are most informative in the initial period phases (May–June) and are not distinguishable taking into account the intersection of confidence intervals between values in the phenophase of full summer (August) and in the autumn period. Under conditions of the end of the vegetation season (September), significant differences are only characteristic of the distinction between the dark coniferous chern and subtaiga ABC relative to the ABC of the mountain-taiga and subalpine zone.

Keywords: Landsat, spectral indices, LST, NDVI, altitudinal belts, formations

Accepted: 08.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-133-146

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Gornyy V. I., Brovkin O. V., Kiselev A. V., Tronin A. A., Trends in remote sensing methods for geological and environmental applications, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 9–38 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-9-38.
3. Danilina D. M., Nazimova D. I., Gosteva A. A. et al., Identification of potential areas of protected plant species using the ecological-geographical basis, *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2018, No. 1, pp. 42–51 (in Russian), DOI: 10.21782/gipr0206-1619-2018-1(42-51).
4. Isachenko A. G., *Landshaftovedeniye i fiziko-geograficheskoye raionirovaniye* (Landscape science and physical-geographical zoning), Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 366 p. (in Russian).
5. Isachenko A. G., *Teoriya i metodologiya geograficheskoy nauki* (Theory and methodology of geographical science), Moscow: Akademiya, 2004, 400 p. (in Russian).
6. Karsakov A. A., Ponomarev E. I., Remote monitoring of the thermal condition of underlying surface under the conditions of anthropogenic transformation, *Biosfera*, 2024, V. 16, No. 1, pp. 20–29 (in Russian).
7. Molokova N. I., *Ehkologo-tsenoticheskii analiz i fenoindikatsiya vysotno-poyasnykh kompleksov tipov lesa (na primere gumidnykh raionov Sayan): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* (Ecological-cenotic analysis and phenoindication of altitudinal-belt complexes of forest types (Based on the example of humid regions of the Sayan Mountains), Cand. biol. sci. thesis abstract), Krasnoyarsk, 1992, 23 p. (in Russian).
8. Molokova N. I., Nazimova D. I., Phenological criteria as indicators of the functioning of communities and ecosystems, *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Botanika i botaniki v menyayushchemsya mire"* (Proc. Intern. Conf. "Botany and Botanists in a Changing World"), Tomsk: Tomsk State University, 2023, pp. 42–44 (in Russian).
9. Nazimova D. I., Ponomarev E. I., Stepanov N. V., Fedotova E. V., Dark-coniferous chern forests in the Krasnoyarsk Region and their mapping issues, *Lesovedeniye*, 2005, No. 1, pp. 12–18 (in Russian).
10. Nazimova D. I., Ponomarev E. I., Konovalova M. E., Role of an altitudinal zonal basis and remote sensing data in the sustainable management of mountain forests, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, V. 13, No. 1, pp. 742–753, DOI: 10.1134/S1995425520070070.
11. Nazimova D. I., Koshkarova V. L., Danilina D. M., Konovalova M. E., The spatio-temporal dynamics of mountain dark-coniferous forests in the south of Priyenisei Siberia in the climate change, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2023, V. 87, No. 8, pp. 1224–1237 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556623080149.
12. Polikarpov N. P., Chebakova N. M., Nazimova D. I., *Klimat i gornyye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and mountain forests of Southern Siberia), V. V. Kuz'michev (ed.), Novosibirsk: Nauka, 1986, 225 p. (in Russian).
13. Ponomarev E. I., Ismailova D. M., Nazimova D. I., Satellite monitoring of Sayan Mountain forest ecosystems, *J. Siberian Federal University*, 2011, V. 4, No. 1, pp. 75–85.
14. Semechkin I. V., Polikarpov N. P., Iroshnikov A. I. et al., *Kedrovyye lesa Sibiri* (Cedar forests of Siberia), Novosibirsk: Nauka. Sibirskoye otdeleniye, 1985, 256 p. (in Russian).
15. Smagin V. N., Il'inskaya S. A., Nazimova D. I., Cherednikova Yu. S., *Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* (Types of forests in the mountains of Southern Siberia), V. N. Smagin (ed.), Novosibirsk: Nauka. Sibirskoye otdeleniye, 1980, 334 p. (in Russian).
16. Chebakova N. M., Sadovnichaya E. A., Link between vertical zonation and climatic radiation factors in the Western Sayan, *Geografiya i prirodnyye resursy*, 1985, V. 3, No. 1, pp. 53–58 (in Russian).

17. Shamrikova E. V., Zhangurov E. V., Kulyugina E. E. et al., Soils and the soil cover of mountainous tundra landscapes on calcareous rocks in the Polar Urals: diversity, taxonomy, and nitrogen and carbon patterns, *Eurasian Soil Science*, 2020, V. 53, No. 9, pp. 1206–1221, DOI: 10.1134/S106422932009015X.
18. Baratto J., de Bodas Terassi P. M., Galvani E., Changes in vegetation cover and the relationship with surface temperature in the Cananéia–Iguape Coastal System, São Paulo, Brazil, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 18, Article 3460, DOI: 10.3390/rs16183460.
19. Ciazela M., Ciazela J., Topoclimate mapping using Landsat ETM+ thermal data: Wolin Island, Poland, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 14, Article 2712, DOI: 10.3390/rs13142712.
20. Doubkova M., Van Dijk A. I. J. M., Sabel D. et al., Evaluation of the predicted error of the soil moisture retrieval from C-band SAR by comparison against modelled soil moisture estimates over Australia, *Remote Sensing Environment*, 2012, V. 120, pp. 188–196, DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.031.
21. Fu J., Liu J., Qin J. et al., Monitoring long-term vegetation dynamics over the Yangtze River Basin, China, using multi-temporal remote sensing data, *Ecosphere*, 2024, V. 15, No. 3, Article e4809, DOI: 10.1002/ecs2.4809.
22. Halefom A., He Y., Nemoto T. et al., The impact of urbanization-induced land use change on land surface temperature, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 23, Article 4502, DOI: 10.3390/rs16234502.
23. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
24. Nazimova D. I., Danilina D. M., Stepanov N. V., Rain-barrier forest ecosystems of the Sayan mountains, *Botanica Pacifica*, 2014, V. 3, No. 1, pp. 37–47.
25. Qureshi S., Alavipanah S. K., Konyushkova M. et al., A remotely sensed assessment of surface ecological changes over the Gomishan Wetland, Iran, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 18, Article 2989, DOI: 10.3390/RS12182989.
26. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *J. Remote Sensing Environment*, 1979, V. 2, No. 8, pp. 127–150.
27. Vickers H., Karlsen S. R., Malnes E., A 20-year MODIS-based snow cover dataset for Svalbard and its link to phenological timing and sea ice variability, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 7, Article 1123, DOI: 10.3390/rs12071123.