

Оценка влияния климатических факторов на динамику растительного покрова Хакасии

С. Т. Им

Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова
Абакан, 655017, Россия
E-mail: stim@ksc.krasn.ru

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

На юге Сибири наблюдается неоднозначная реакция растительного покрова на климатические изменения в XXI в. В данной работе проведён ГИС-анализ зависимости динамики состояния растительного покрова Хакасии от климатических факторов на основе временной серии растров вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) (продукт MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MOD13Q1 за 2000–2021 гг.). Влияние различных климатических факторов оценено на основе попиксельного расчёта множественных линейных регрессий и иерархических регрессий. В результате расчётов получены картосхемы коэффициентов при переменных для наилучших уравнений множественных регрессий и коэффициентов детерминации, а также оценён вклад анализируемых климатических переменных в объяснённую дисперсию вариации индекса NDVI. В целом значимые множественные линейные регрессионные уравнения ($p < 0,05$) зависимости динамики NDVI от климатических переменных наблюдались для 53 % территории Хакасии. Наибольшая доля объяснённой дисперсии соответствовала летним осадкам (медианное значение 23,0 %), влажности (23,7 %) и температуре почвогрунтов (22,0 %), а также летним ветрам (22,8 %) и весенней температуре почвогрунтов (22,7 %). Отклик растительного покрова был неоднородным. Так, в лесостепных и степных зонах положительное влияние на растительный покров оказывали количество осадков и влажность почвогрунтов, а в горно-таёжных — температура воздуха. Отрицательно влияли ветры и сухость воздуха.

Ключевые слова: Южная Сибирь, Хакасия, растительный покров, NDVI, климат, множественные регрессии

Одобрена к печати: 07.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-156-165

Введение

В Сибири с конца XXI в. наблюдаются изменения в динамике растительного покрова в результате климатического воздействия. В южной части Средней Сибири выявлено усыхание темнохвойных древостоев, обусловленное современным климатом и вспышками размножения насекомых-вредителей (Bernier, Goetz, 2022; Kharuk et al., 2021b). Например, в западной части Республики Хакасии наблюдалась деградация темнохвойных деревьев, вызванная возрастанием засушливости климата и распространением полиграфа уссурийского (*Polygraphus proximus* Blandford) (Kharuk et al., 2021b). Отмечается, что к 2015 г. ареал уссурийского полиграфа распространился на территорию 51° 33'–58° 22' с. ш., 83° 04'–92° 44' в. д. (Кривец и др., 2015). В природных условиях Хакасии наблюдается достоверный отклик сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на недостаток увлажнения и высокую температуру (Демина и др., 2022). При дефиците влаги или, напротив, сезонной избыточности увлажнения прослеживается распространение сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) краснопыльничковой формы, являющейся более устойчивой к экстремальным условиям произрастания (Коновалова и др., 2020). В экотонах горной лесотундры Кузнецкого Алатау отмечается рост сомкнутости и радиального прироста деревьев в связи климатическими трендами (Kharuk et al., 2021a, 2022).

В Хакасии залежные земли занимают ~52 % всей площади пашни (520 тыс. га) и в основном расположены на склонах с низкими противоэрозионными свойствами почв. Скорость

восстановления растительного покрова и плодородия зависит от позиции склона и степени эродированности почвы (Кутыкина, 2019). При исследовании сельскохозяйственной (агроценозы) и травянистой (луга, степи) растительности засоленных почв необходимо учитывать смену лимитирующих факторов (температуры и степени почвенного засоления) (Шевырнов и др., 2018). В степной зоне на залежных землях наблюдается увеличение численности вяза приземистого (*Ulmus pumila*) и появление мохового яруса, доминирование сорных и бурьянистых растений. Происходит активная инвазия древесно-кустарниковой растительности на территории, прилегающей к полейзащитной лесной полосе (Мартынова, 2019).

Лесные пожары оказывают комплексное влияние на растительный покров. В 2002–2021 гг. на юге Сибири наблюдалась значимая тенденция к снижению площади горения. В среднем ежегодно огнём повреждается около 257 тыс. га лесов. Сообщается о логарифмической тенденции снижения горимости в зонах между равнинами и высокими горами из-за лимитированного запаса горючих материалов и более высокого количества осадков. Долгосрочная динамика площади горения связана с изменением влажности почвы (Shvetsov et al., 2023). В Алтае-Саянском районе в течение 1996–2014 гг. выявлено логарифмическое увеличение количества гарей и частоты пожаров для лесной, степной, лесостепной зон. В целом многолетняя динамика горения леса в Алтае-Саянском районе и Сибири сильно связана с изменением метеорологических параметров (Ponomarev et al., 2015). Наряду с этим в горнолесном поясе Хакасии отмечается значительное негативное воздействие техногенного фактора на растительный покров (Курбатский, Кузнецов, 2011).

Современные данные дистанционного зондирования позволяют проводить комплексный пространственный анализ связей между состоянием растительного покрова и параметрами окружающей среды на обширные территории. Так, данные дистанционного зондирования применялись для изучения агроценозов (Жукова и др., 2012; Шевырнов и др., 2018; Botvich, Zorkina, 2019) и картирования растительного покрова Хакасии (Полякова, Ермаков, 2019; Шуркина и др., 2007). Вегетационные индексы позволяют оценить состояние и динамику растительного покрова. Известно, что индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) коррелирует с индексом листовой поверхности и биомассой растений (Carlson, Ripley, 1997). Данный показатель часто применяется в исследованиях растительного покрова дистанционными методами. В целом величину NDVI определяют биологические особенности, проективное покрытие и фитомасса; влияют не только абиотические факторы, но и биотические (Botvich, Zorkina, 2019). В конце XX в. в северных широтах наблюдались возрастающие тренды NDVI, преимущественно обусловленные динамикой весенней и осенней температуры. В полусухих регионах NDVI коррелирует с температурой и осадками. Уменьшение NDVI в полусухих регионах связывают с сокращением количества выпадающих осадков (Ichii et al., 2002). Современные длительные ряды данных NDVI с высоким разрешением позволяют исследовать динамику растительного покрова в связи с особенностями параметров окружающей среды (Shi et al., 2021).

Цель данной работы — выявление и оценка климатических факторов, оказавших существенное влияние на пространственно-временную динамику растительного покрова Республики Хакасии в начале XXI в., по данным дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы

Анализировался растительный покров Республики Хакасии (51,5–55° с. ш., 88–92° в. д.; площадь ~61,5 тыс. км²). Территория исследования расположена в Алтае-Саянской горной стране и относится к трём крупным геоморфологическим регионам (Западному Саяну, Кузнецкому нагорью и Минусинской котловине) (Макунина, 1985). Протяжённость с севера на юг составляет ~460 км, а с запада на восток — ~200 км. Преобладающий ландшафт — степи, горы, тайга. Высота колеблется между 203 и 2968 м н. у. м. (над уровнем моря). Саяны занимают две трети территории. Крупнейшие реки — Енисей, Абакан, Чулым, Томь. Разно-

образии климатических и растительных зон представлено высокогорьями с постоянными ледниками и снегом, тундрами, лесами, лесостепями, степями. Климат резко континентальный. В год выпадает $\sim 792 \pm 30$ мм осадков. Средняя годовая температура составляет $-0,2 \pm 0,4$ °С. Распределение растительного покрова соответствует высотной поясности (Semenov, Lysanova, 2016). Растительность Хакасии включает более полутора тысяч видов самых разнообразных растений. Имеется несколько природных высотных поясов: степной (250–400 м н. у. м.), лесостепной (600–800 м н. у. м.), подтаёжный (800–1000 м н. у. м.), горно-таёжный (1000–1600 м н. у. м.), высокогорный (более 1600 м н. у. м.) (Башалханова, 1989).

В настоящей работе анализ проводился на основе пространственных данных, приведённых в *табл. 1*. Динамика растительного покрова оценивалась по временной серии вегетационных индексов NDVI, извлечённых из продукта MOD13Q1 за 2000–2021 гг. на территорию Республики Хакасии (в соответствии с картой Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ)) (см. *табл. 1*). Динамика растительного покрова сопоставлялась с климатическими переменными из базы данных ERA5-Land (реанализ European Reanalysis 5-го поколения) за 2000–2021 гг. (см. *табл. 1*).

Таблица 1. Характеристики использованных в анализе пространственных данных

Название	Описание
MOD13Q1	Продукт представляет собой растровый набор данных о вегетационных индексах NDVI, рассчитанный на основе съёмки Terra/MODIS (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061). Версия продукта 6.1. Данные предоставляются в виде 16-дневных композитов с пространственным разрешением 250 м в формате HDF за период 2000–2021 гг. Данные получены с геопортала NASA (<i>англ.</i> National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) Earth Data (https://www.earthdata.nasa.gov)
ERA5-Land	Ежемесячные климатические данные за 2000–2021 гг. Пространственное разрешение 9 км. Получены с геопортала Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (<i>англ.</i> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF) (https://www.ecmwf.int/en/era5-land)
MCD64A1	Ежемесячные данные о гаях за 2000–2021 гг., полученные на основе анализа временных серий съёмки MODIS. Пространственное разрешение 500 м. Получены с геопортала NASA Earth Data (https://www.earthdata.nasa.gov)
Цифровая географическая основа М 1:2 500 000	Цифровая модель географической основы России масштаба 1:2 500 000, созданная в 2003 г. специалистами Картографической фабрики ВСЕГЕИ с использованием издательских позитивов карты «Россия и сопредельные государства масштаба 1:2 500 000», 1999 г., Федеральной службы геодезии и картографии (Росреестр) (https://vsegei.ru/ru/info/topo)

Влияние климатических факторов на динамику растительного покрова оценивалось на основе анализа карт множественных линейных регрессий NDVI в зависимости от климатических переменных. Расчёты производились в несколько этапов. На первом этапе из данных MOD13Q1 сгенерированы композитные изображения максимальных годовых значений вегетационных индексов NDVI за 2000–2021 гг. По данным ERA5-Land были сформированы временные серии растров климатических данных (температура воздуха, температура и влажность почвы, количество осадков, скорость ветра) за зимний (с декабря предыдущего года по февраль текущего), весенний (март — апрель текущего года), летний (июнь — июль текущего года) и осенний (сентябрь — октябрь предыдущего года) периоды 1999–2021 гг. Был рассчитан индекс сухости климата SPEI (*англ.* Standardized Precipitation Evaporation Index) (Begueria et al., 2014). Всего анализировались 24 климатических переменных. На втором этапе с целью сокращения количества анализируемых климатических переменных к временным рядам растров был применён корреляционный анализ, который позволил отобрать климатические переменные, оказывающие наибольшее влияние на динамику растительного покрова. Наиболее

существенное влияние на динамику растительного покрова Хакасии оказали летние осадки (su_pre), температура воздуха (su_tmp), влажность почвогрунтов (su_soil_m), температура почвогрунтов (su_soil_t), влажность почвогрунтов (su_soil_m), скорость ветра (su_wind), весенняя температура воздуха (sp_tmp) и почвогрунтов (sp_soil_t), осенняя влажность почвогрунтов (au_soil_m), количество осадков (au_pre) и температура воздуха (au_tmp), содержание влаги в почвогрунтах зимой (wi_soil_m) (Im, 2023). Дополнительно анализировался индекс сухости SPEI (su_spei). На третьем этапе с использованием выделенных климатических переменных были рассчитаны карты множественных линейных регрессий с отбором наилучших уравнений по информационному критерию Акаике (Akaike, 1974). Перед расчётами проводилась нормализация данных. Использовались только статистически значимые уравнения регрессий ($p < 0,05$). Все уравнения тестировались на нормальность остатков (тесты Шапиро–Уилка, Колмогорова–Смирнова; $p > 0,05$) и допущения Гаусса–Маркова ($p > 0,05$). Для каждого пикселя уравнение регрессии включало в себя зависимую переменную (NDVI) и не более трёх независимых климатических переменных. К полученным наилучшим уравнениям применялся метод иерархических регрессий для расчёта долей объяснённой дисперсии, соответствующих использованному климатическим переменным. Иерархические линейные регрессии применяются для сравнения регрессионных моделей и оценки изменений объяснённой дисперсии при включении анализируемых переменных (например, (Kharuk et al., 2021a)). Из рассчитанных растров исключались территории гарей на основе данных MCD64A1 за 2000–2021 гг. В период с 2000 по 2021 г. преимущественно горели непокрытые лесом территории (~80 %), в меньшей степени — лиственничные (~17 %) и берёзовые (~2 %) древостои.

Геообработка проводилась средствами ESRI (англ. Environmental Systems Research Institute) ArcGIS Desktop (<https://www.esri.com>). Для автоматизации попиксельного расчёта множественных линейных регрессий создан скрипт на языке R (<https://www.r-project.org>) с параллельными вычислениями в среде R-Studio (<https://www.r-studio.com>). Использованы библиотеки `sp`, `raster`, `gvlma`, `AICcmodavg`, `parallel`, `doSNOW`, `Rmpi`, `progress`, `bigmemory`, `foreach`. Этапы расчётов, реализованные в скрипте: 1) считывание входных данных (растров NDVI и климатических переменных) и параметров расчётов; 2) перебор возможных уравнений множественных регрессий для каждого пикселя (~1,2·10⁶ пикселей); 3) отбор статистически значимых уравнений регрессий с проверкой допущений Гаусса–Маркова; 4) ранжирование и отбор наилучших уравнений регрессий (по наименьшему значению критерия Акаике); 5) расчёт иерархических линейных регрессий для наилучших уравнений и оценка долей объяснённой дисперсии для каждой использованной климатической переменной; 6) запись выходных растров коэффициентов детерминации, количества использованных переменных в уравнениях, долей объяснённых дисперсий для каждой переменной, коэффициентов уравнений регрессии. Таким образом, для каждого пикселя на картах получены оценки коэффициентов наилучших уравнений регрессий, коэффициентов детерминации и оценён вклад каждой переменной в объяснённую дисперсию. Для дальнейших статистических расчётов применялся Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Статистически значимые множественные линейные регрессионные уравнения (МЛРУ) с $p < 0,05$ были выявлены для 53 % анализируемой территории (исключая гари). Всего было обнаружено 538 401 значимое МЛРУ. Коэффициент детерминации варьировался от 0,18 до 0,91, в среднем равен 0,38 (медианное $R^2 = 0,43$) (рис. 1а, см. с. 160). Значимым МЛРУ с одной независимой климатической переменной соответствовали 24 % анализируемой территории, с двумя переменными — 15 %, с тремя переменными — 14 % (рис. 1б). Пространственное распределение таких МЛРУ было неоднородным. Наибольшие значения коэффициентов детерминации наблюдались у МЛРУ, соответствующих степным и лесостепным восточным и северо-восточным территориям (см. рис. 1а). По количеству включённых в МЛРУ переменных пиксели группировались в кластеры (см. рис. 1б), что объясняется однородностью реакции растительного покрова на динамику климата внутри таких кластеров.

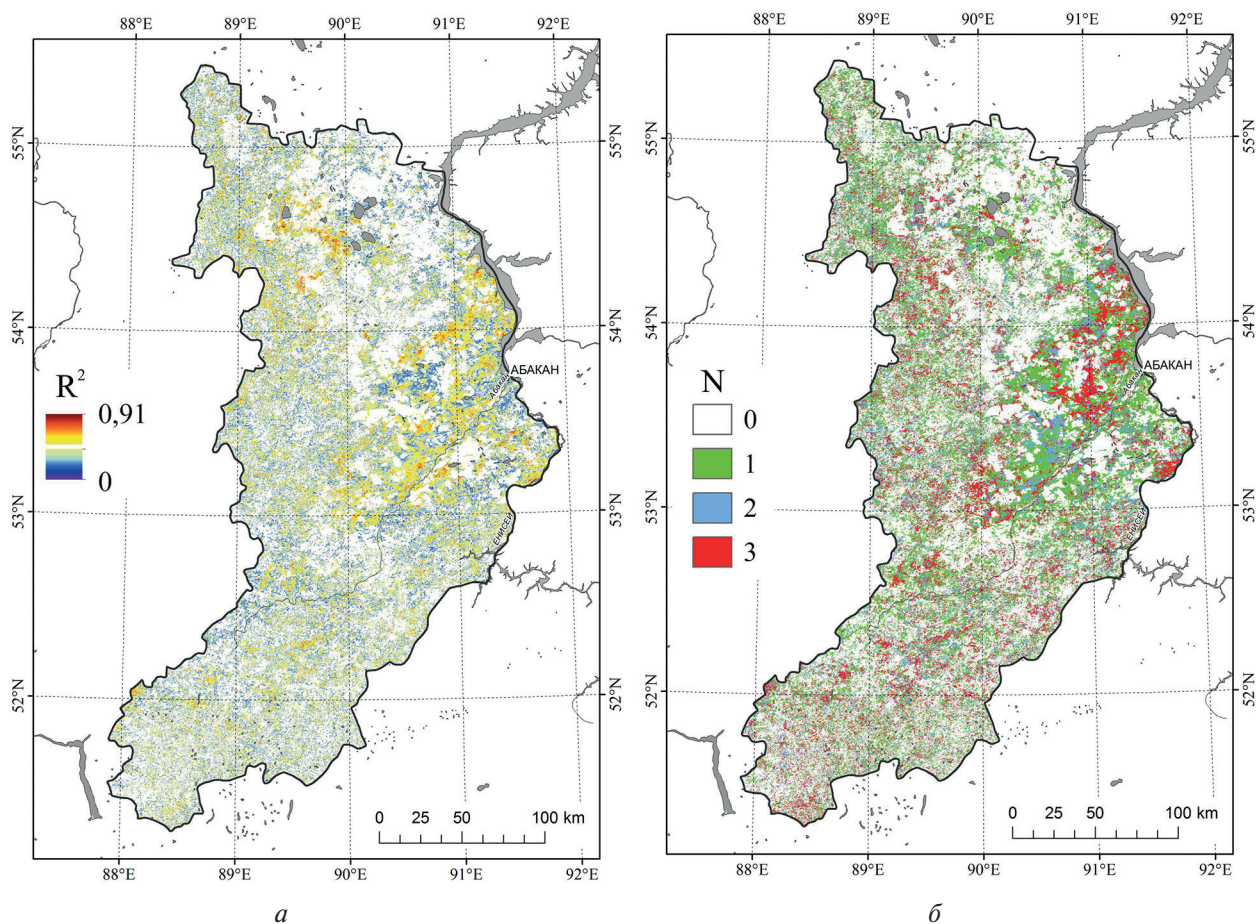


Рис. 1. Картограммы коэффициентов детерминации R^2 (а) и количества независимых переменных (N) (б), соответствующих наилучшим уравнениям множественных линейных регрессий ($p < 0,05$) вариации индекса NDVI за 2000–2021 гг. в зависимости от климатических переменных

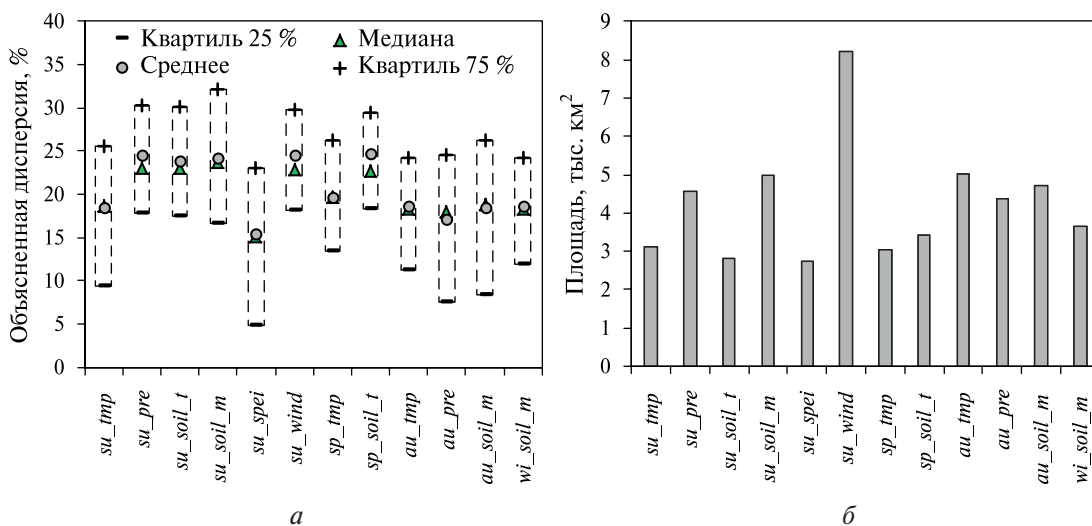


Рис. 2. Доли объяснённой дисперсии вариации NDVI (2000–2021) (а) и площади территорий Хакасии (б), соответствующие климатическим переменным (летние: осадки (su_{pre}), температура воздуха (su_{tmp}), индекс сухости (su_{spei} , включён дополнительно), влажность почвогрунтов (su_{soil_m}), температура почвогрунтов (su_{soil_t}), влажность почвогрунтов (su_{soil_m}), скорость ветра (su_{wind}); весенние: температура воздуха (sp_{tmp}) и почвогрунтов (sp_{soil_t}); осенние: влажность почвогрунтов (au_{soil_m}), количество осадков (au_{pre}) и температура воздуха (au_{tmp}); содержание влаги в почвогрунтах зимой (wi_{soil_m})), оказавшим значимое влияние на динамику растительного покрова

Наибольшие доли объяснённой дисперсии динамики NDVI соответствовали летним осадкам (медианное значение 23,0 % объяснённой дисперсии), влажности (23,7 %) и температуре (22,0 %) почвогрунтов, а также летним ветрам (22,8 %) и весенней температуре почвогрунтов (22,7 %) (рис. 2а, см. с. 160). По территориальному влиянию выделяются летние ветры (8,2 тыс. км²), влажность почвогрунтов (5 тыс. км²) и количество осадков (4,6 тыс. км²), а также осенняя температура (5 тыс. км²) и влажность почвогрунтов (4,7 тыс. км²) предыдущего года (рис. 2б).

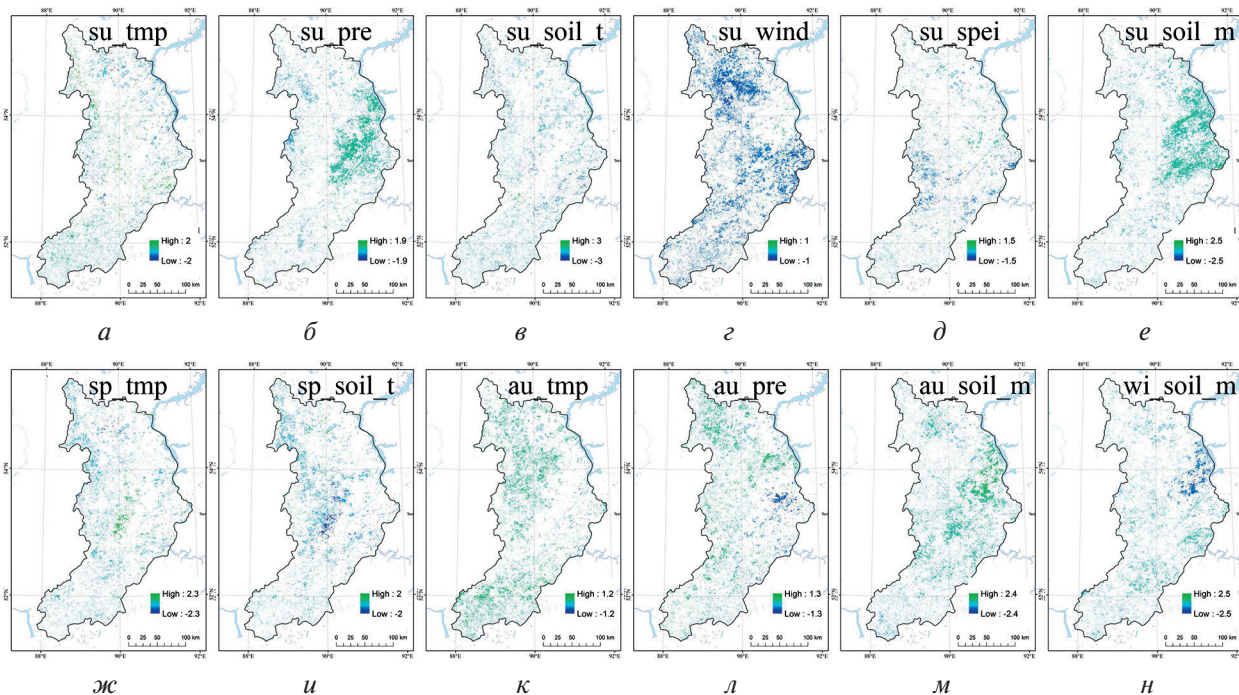


Рис. 3. Пространственная локализация положительных (зелёный цвет) и отрицательных (синий) коэффициентов при переменных значимых МЛРУ вариации NDVI в зависимости от климатических факторов: а — летней температуры воздуха (*su tmp*), б — количества осадков (*su pre*), в — температуры почвогрунтов (*su soil t*), г — скорости ветра (*su wind*), д — индекса сухости SPEI (*su spei*), е — влажности почвогрунтов (*su soil m*); ж — весенней температуры воздуха (*sp tmp*), и — почвогрунтов (*sp soil t*); к — осенней температуры воздуха (*au tmp*), л — количества осадков (*au pre*), м — влажности почвогрунтов (*au soil m*); н — содержания влаги в почвогрунтах зимой (*wi soil m*)

Влияние климатических факторов было неоднородным по территории (рис. 3). Наблюдаемое пространственное распределение связано с преобладающим типом наземного покрова и его откликом на динамику климата. Например, в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау наблюдалось возрастание сомкнутости и радиального прироста деревьев на фоне увеличения летней и годовой температуры воздуха (Kharuk et al., 2021a, 2022), а на высотах до 1000 м н. у. м. отмечалось усыхание кедровых и пихтовых древостоев (Kharuk et al., 2021b). Реакция травяных сообществ на рост летней температуры в степных зонах была преимущественно отрицательной, а на количество осадков — положительной (Babushkina et al., 2018; Im, 2023). В лесостепных и степных зонах Хакасии наблюдался положительный отклик растительного покрова на количество осадков (см. рис. 3б) и влажность почвогрунтов (см. рис. 3е, м); отрицательная реакция — на ветры (см. рис. 3г, н) и менее выраженная — на температуру (см. рис. 3а, в, ж, и, к) и сухость воздуха (см. рис. 3д). На динамику растительного покрова горно-таёжных территорий положительное влияние оказывала температура воздуха (см. рис. 3а, ж, и), а отрицательное — летние ветры (см. рис. 3г) и сухость воздуха (см. рис. 3д).

Необходимо учесть, что в настоящем исследовании рассматривались только множественные линейные уравнения и не учитывались нелинейные комплексные связи, так как их

анализ требует значительно больших вычислительных ресурсов. Кроме того, не выделялись локальные подпериоды значимого воздействия анализируемых факторов, когда, например, возникает смена лимитирующего фактора в динамике растительного покрова. Однако применённая методика позволила выявить и оценить пространственное неоднородное влияние климатических факторов на динамику растительного покрова. В лесостепных и степных зонах положительное влияние на растительный покров оказывали количество осадков и влажность почвогрунтов, а отрицательный — ветры, температура и сухость воздуха. В горно-таёжных территориях положительный отклик наблюдался на динамику температуры воздуха, а отрицательный — на летние ветры и сухость воздуха.

Заключение

Анализ временных данных о динамике вегетационного индекса и климатических переменных с помощью множественных линейных регрессионных уравнений позволил оценить пространственную реакцию растительного покрова Хакасии на климатические изменения, наблюдаемые в XXI в. В целом анализ данных за 2000–2021 гг. показал, что для 53 % территории Хакасии динамика растительного покрова объясняется климатическими факторами с помощью МЛРУ. Наибольшая доля объяснённой дисперсии соответствовала летним осадкам (медианное значение 23,0 %), влажности (23,7 %) и температуре (22,0 %) почвогрунтов, а также летним ветрам (22,8 %) и весенней температуре почвогрунтов (22,7 %). Отклик растительного покрова был неоднородным. Так, в лесостепных и степных зонах на растительный покров оказали положительное влияние количество осадков и влажность почвогрунтов. В горно-таёжных зонах влияла температура воздуха. Отрицательное воздействие оказывали ветры и сухость воздуха. В дальнейшем исследовании необходимо учесть ландшафтные и орографические особенности территории, а также преобладающие типы растительного покрова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012>) при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасии.

Литература

1. Башалханова Л. Б., Буфал В. В., Русанов В. И. Климатические условия освоения котловин Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1989. 160 с.
2. Демина А. В., Жирнова Д. Ф., Белокопытова Л. В. и др. Детализация климатического отклика анатомических параметров древесины и фенологии ксилогенеза сосны обыкновенной в лесостепях юга Сибири // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер.: Биология. 2022. Т. 15. № 2. С. 183–201. DOI: 10.17516/1997-1389-0382.
3. Жукова Е. Ю., Белоусова Е. А., Мусихина М. О., Сысоева Ю. В. Характеристика агроценозов Койбальской степи республики Хакасия // Вестн. Хакасского гос. ун-та им. Н. Ф. Катанова. 2012. № 2. С. 9–11.
4. Коновалова А. Е., Коновалова М. Е., Пименов А. В. Особенности роста по диаметру красно- и желтопыльничковой форм сосны обыкновенной // Сибирский лесной журн. 2020. № 3. С. 63–72. DOI: 10.15372/SJFS20200306.
5. Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М., Демидко Д. А., Петько В. М., Баранчиков Ю. Н. Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus Proximus blandf.* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Сибири // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. акад. 2015. № 211. С. 33–45.
6. Курбатский В. И., Кузнецов А. А. Влияние техногенного фактора на растительный покров горно-лесного пояса республики Хакасии // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. 2011. № 2(14). С. 132–140.
7. Кутькина Н. В. Восстановление залежных земель в условиях степной катены Хакасии // Науч. жизнь. 2019. Т. 14. № 10(98). С. 1584–1596. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1584-1596.
8. Макушина А. А. Физическая география СССР. М.: Изд-во Московского ун-та, 1985. 296 с.
9. Мартынова М. А. Прогрессивные, нормальные и дигрессионные вторичные сукцессии залежных земель в границах систем полевых защитных лесных полос республики Хакасия // Вестн. Казанского гос. аграр. ун-та. 2019. Т. 14. № 4-2(56). С. 31–36. DOI: 10.12737/2073-0462-2020-31-36.

10. Полякова М. А., Ермаков Н. Б. Изучение пространственной структуры степных растительных сообществ Хакасии с использованием космических снимков различного разрешения // Экосистемы. 2019. № 18(48). С. 3–13.
11. Шевырногов А. П., Ботвич И. Ю., Кононова Н. А. и др. Наземный дистанционный и спутниковый мониторинг растительности // Вестн. Российской акад. наук. 2018. Т. 88. № 11. С. 1011–1017. DOI: 10.31857/S086958730002334-5.
12. Шуркина А. И., Зоркина Т. М., Шевырногов А. П. Исследование современного растительного покрова республики Хакасия на основе интеграции спутниковых и наземных данных // Вестн. КрасГАУ. 2007. № 5. С. 65–70.
13. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Trans. Automatic Control. 1974. V. 19. No. 6. P. 716–723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
14. Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Zhirnova D. F. et al. Climatically driven yield variability of major crops in Khakassia (South Siberia) // Intern. J. Biometeorology. 2018. V. 62. Article 201862. P. 939–948. DOI: 10.1007/s00484-017-1496-9.
15. Beguería S., Vicente-Serrano S. M., Reig F. et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Intern. J. Climate. 2014. V. 34. Iss. 10. P. 3001–3023. DOI: 10.1002/joc.3887.
16. Berner L. T., Goetz S. J. Satellite observations document trends consistent with a boreal forest biome shift // Global Change Biology. 2022. V. 28(10). P. 3275–3292. DOI: 10.1111/gcb.16121.
17. Botvich I. Yu., Zorkina T. M. The Restoration Dynamics of Fallow Vegetation in the Steppe Zone of the Khakassia Republic Based on Terrain and Satellite Data // Complex Systems Biophysics. 2019. V. 64. P. 309–315. DOI: 10.1134/S0006350919020039.
18. Carlson T. N., Ripley D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // Remote Sensing of Environment. 1997. V. 62(3). P. 241–252. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
19. Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23(18). P. 3873–3878. DOI: 10.1080/01431160110119416.
20. Im S. Spatial analysis of vegetation cover response to climate trends in Khakassia (South Siberia) // J. Mountain Science. 2023. V. 20. P. 2869–2884. DOI: 10.1007/s11629-023-8096-4.
21. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. (2021a) Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming // J. Mountain Sciences. 2021. V. 18. P. 3099–3108. DOI: 10.1007/s11629-021-6876-2.
22. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. et al. (2021b) Climate-driven conifer mortality in Siberia // Global Ecology and Biogeography. 2021. V. 30. Iss. 2. P. 543–556. DOI: 10.1111/geb.13243.
23. Kharuk V. I., Petrov I. A., Im S. T. et al. Tree clusters migration into alpine tundra, Siberia // J. Mountain Science. 2022. V. 19(12). P. 3426–3440. DOI: 10.1007/s11629-022-7555-7.
24. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Kharuk V. I. Fires in the Altai-Sayan region: Landscape and ecological confinement // Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 52(7). P. 725–736. DOI: 10.1134/S0001433816070069.
25. Semenov Y. M., Lysanova G. I. The Landscape Map of Khakassia // Bull. Irkutsk State University. 2016. V. 18. P. 128–139. <https://izvestiageo.isu.ru/en/journal?id=23>.
26. Shi S., Wang P., Zhang Y. et al. Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia // Ecological Indicators. 2021. V. 133. Article 108446. DOI: 10.1038/s41558-019-0688-1.
27. Shvetsov E. G., Golyukov A. S., Kharuk V. I. Long-term dynamics of forest fires in Southern Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2023. V. 16. P. 205–216. DOI: 10.1134/S1995425523020154.

Evaluation of the effect of climatic variables on the dynamics of vegetation cover in Khakassia

S. T. Im

*N. F. Katanov Khakassian State University, Abakan 655017, Russia
E-mail: stim@ksc.krasn.ru*

*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia*

In Southern Siberia, there is a mixed response of vegetation cover to climate change in the 21st century. In this work, a GIS analysis of the dependence of the dynamics of vegetation cover of Khakassia on climatic factors was carried out based on time series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI; MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MOD13Q1). The influence of various climatic factors was assessed based on pixel-by-pixel estimations of multiple linear and hierarchical regressions. As a result of the calculations, maps of the coefficients of the variables for the best multiple regression equations and coefficients of determination were created, and the contribution of the analyzed climatic variables to the explained variance of the NDVI variation was assessed. In general, significant multiple linear regression equations ($p < 0.05$) of the NDVI dynamics (2000–2021) dependence on climate variables were observed for 53 % of the territory of Khakassia. The highest fraction of explained variance corresponded to summer precipitation (median value is 23.0 %), moisture (23.7 %), and soil temperature (22.0 %), as well as summer winds (22.8 %) and spring soil temperatures (22.7 %). The response of the vegetation cover was heterogeneous; in the forest-steppe and steppe zones, the amount of precipitation and soil moisture positively influenced the vegetation cover, and in the mountain-taiga zones, the air temperature had a positive effect. Winds and dry air had a negative impact.

Keywords: southern Siberia, Khakassia, vegetation cover, NDVI, climate, multiple regressions

Accepted: 07.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-156-165

References

1. Bashalkhanova L. B., Bufal V. V., Rusanov V. I., Klimaticheskie usloviya osvoeniya kotlovin Yuzhnoi Sibiri (*Climatic Conditions for the Development of the Basins of Southern Siberia*), Novosibirsk: Nauka, 1989, 160 p. (in Russian).
2. Demina A. V., Zhirnova D. F., Belokopytova L. V. et al., Detailing the climatic response of wood anatomical traits and xylogenesis phenology of Scots pine in the forest-steppes of southern Siberia, *J. Siberian Federal University. Biology*, 2022, Vol. 15(2), pp. 183–201 (in Russian), DOI: 10.17516/1997-1389-0382.
3. Zhukova E. Yu., Belousova E. A., Musihina M. O., Sysoeva Yu. V., Characteristics of agrocenoses of Koybalskaya steppe of the Republic of Khakassia, *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N. F. Katanova*, 2012, No. 2, pp. 9–11.
4. Konovalova A. E., Konovalova M. E., Pimenov A. V., Specifics of growth by diameter of red male cones and yellow male cones forms of Scots pine, *Siberian J. Forest Science*, 2020, No. 3, pp. 63–72 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20200306.
5. Krivets S. A., Kerchev I. A., Bisirova E. M., Demidko D. A., Pet'ko V. M., Baranchikov Yu. N., Distribution of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2015, No. 211, pp. 33–45 (in Russian).
6. Kurbatsky V. I., Kuznetsov A. A., Influence of the technogenic factor on the vegetation covering of a mountain-wood zone of Republic Khakassia, *Bull. Tomsk State University, Biology*, 2011, Vol. 2(14), pp. 132–140 (in Russian).
7. Kut'kina N. V., Restoration of long-fallow in the steppe catena of Khakassia, *Nauchnaya zhizn'*, 2019, Vol. 14, No. 10(98), pp. 1584–1596 (in Russian), DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1584-1596.
8. Makunina A. A., *Fizicheskaya geografiya SSSR* (Physical geography of the USSR), Moscow: Moscow Publ. House, 1985, 296 p. (in Russian).
9. Martynova M. A., Progressive, normal and digressional secondary successions of foreign lands in the borders of systems of useful protective forest stripes of the Republic of Khakassia, *Vestnik*

- Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, No. 14, pp. 31–36 (in Russian), DOI: 10.12737/2073-0462-2020-31-36.
10. Polyakova M. A., Ermakov N. B., The study of steppe vegetation spatial structure in Khakassia using satellite images of different resolution, *Ekosistemy*, 2019, No. 18(48), pp. 3–13 (in Russian).
 11. Shevyrnogov A. P., Botvich I. Yu., Kononova N. A. et al., Remote ground-based and satellite monitoring of vegetation, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2018, Vol. 88, No. 11, pp. 1011–1017 (in Russian), DOI: 10.31857/S086958730002334-5.
 12. Shurkina A. I., Zorkina T. M., Shevyrnogov A. P., Study of the modern vegetation cover of the Republic of Khakassia based on the integration of satellite and ground data, *Bull. KrasGAU*, 2007, No. 5, pp. 65–70 (in Russian).
 13. Akaike H., A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans. Automatic Control*, 1974, Vol. 19, No. 6, pp. 716–723, DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
 14. Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Zhirnova D. F. et al., Climatically driven yield variability of major crops in Khakassia (South Siberia), *Intern. J. Biometeorology*, 2018, Vol. 62, Article 201862, pp. 939–948, DOI: 10.1007/s00484-017-1496-9.
 15. Beguería S., Vicente-Serrano S. M., Reig F. et al., Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring, *Intern. J. Climate*, 2014, Vol. 34, Issue 10, pp. 3001–3023, DOI: 10.1002/joc.3887.
 16. Berner L. T., Goetz S. J., Satellite observations document trends consistent with a boreal forest biome shift, *Global Change Biology*, 2022, Vol. 28(10), pp. 3275–3292, DOI: 10.1111/gcb.16121.
 17. Botvich I. Yu., Zorkina T. M., The Restoration Dynamics of Fallow Vegetation in the Steppe Zone of the Khakassia Republic Based on Terrain and Satellite Data, *Complex Systems Biophysics*, 2019, Vol. 64, pp. 309–315, DOI: 10.1134/S0006350919020039.
 18. Carlson T. N., Ripley D. A., On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 1997, Vol. 62(3), pp. 241–252, DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
 19. Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y., Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23(18), pp. 3873–3878, DOI: 10.1080/01431160110119416.
 20. Im S., Spatial analysis of vegetation cover response to climate trends in Khakassia (South Siberia), *J. Mountain Science*, 2023, Vol. 20, pp. 2869–2884, DOI: 10.1007/s11629-023-8096-4.
 21. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. (2021a), Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming, *J. Mountain Sciences*, 2021, Vol. 18, pp. 3099–3108, DOI: 10.1007/s11629-021-6876-2.
 22. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. et al. (2021b), Climate-driven conifer mortality in Siberia, *Global Ecology and Biogeography*, 2021, Vol. 30, Issue 2, pp. 543–556, DOI: 10.1111/geb.13243.
 23. Kharuk V. I., Petrov I. A., Im S. T. et al., Tree clusters migration into alpine tundra, Siberia, *J. Mountain Science*, 2022, Vol. 19(12), pp. 3426–3440, DOI: 10.1007/s11629-022-7555-7.
 24. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Kharuk V. I., Fires in the Altai-Sayan region: Landscape and ecological confinement, *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, No. 52(7), pp. 725–736, DOI: 10.1134/S0001433816070069.
 25. Semenov Y. M., Lysanova G. I., The Landscape Map of Khakassia, *Bull. Irkutsk State University*, 2016, Vol. 18, pp. 128–139, <https://izvestiageo.isu.ru/en/journal?id=23>.
 26. Shi S., Wang P., Zhang Y. et al., Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia, *Ecological Indicators*, 2021, Vol. 133, Article 108446, DOI: 10.1038/s41558-019-0688-1.
 27. Shvetsov E. G., Golyukov A. S., Kharuk V. I., Long-term dynamics of forest fires in Southern Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2023, Vol. 16, pp. 205–216, DOI: 10.1134/S1995425523020154.