

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОРНЫХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОТВЕТ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

УДК 551.521+581.524.44:634.0

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕСОВ В ГОРАХ ЮЖНОЙ СИБИРИ И СЕРВЕРНОЙ МОНГОЛИИ В СВЯЗИ С ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА К СЕРЕДИНЕ ВЕКА¹

© 2023 г. Е. И. Парфенова^а, *, Н. М. Чебакова^а

^аИнститут леса им. В.Н.Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

*e-mail: lyeti@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 04.03.2023 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г.

Горы Южной Сибири обладают огромным лесоресурсным потенциалом. За последние 20 лет появляется все больше территорий нарушенных лесов, пострадавших от пожаров, рубок и, как считают многие исследователи, текущей аридизации климата. В статье дается оценка влияния изменений климата на потенциальное перераспределение лесных высотно-поясных комплексов растительности (ВПК) в горах Южной Сибири и прилегающей Северной Монголии (в окне 48°–58° с.ш. и 80°–120° в.д.). Наши расчеты климатических показателей для середины XXI в. были основаны на результатах модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) Института вычислительной математики РАН (INM-CM5-0) и сценариев Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2022): умеренного сценария ssp126 и жесткого ssp585. Прогнозные оценки изменения климатических показателей к 2050 г. составили: июльской температуры от 2 до 5°C, январской температуры от 1 до 4°C и годовых осадков от 50 до 125 мм в зависимости от сценария и региона в горах Южной Сибири и Северной Монголии. В соответствии с такими изменениями климата потенциальные ареалы основных ВПК могут претерпеть следующую трансформацию. Существенно уменьшатся площади тундр, субальпийского и подгольцового редколесья. Распространение горно-таежных светлохвойных и темнохвойных лесов уменьшится в 1.7 раза по умеренному сценарию и 2.3 раза по жесткому сценарию. Однако темнохвойные ВПК сохраняют общую площадь, поднимаясь в субальпийский ВПК. Потенциальное лесное пространство (включая экотоны лесотундры и лесостепи) изменится в незначительной степени: не изменится при мягком сценарии и сократится на 10% при жестком сценарии. Вдвое возрастет потенциальное пространство лесостепи, в которую трансформируются горно-таежные светлохвойные леса на своей нижней границе. Больше трети лесостепи будет соответствовать условиям распространения широколиственной лесостепи; также произойдет расширение степного и полупустынного поясов.

Ключевые слова: изменение климата, климатическая модель INM-CM5-0, умеренный сценарий ssp126, жесткий сценарий ssp585, биоклиматические модели, высотно-поясные комплексы растительности, темно- и светлохвойная тайга

DOI: 10.31857/S2587556623070129, **EDN:** ACDUUB

ВВЕДЕНИЕ

Проблема глобального изменения климата и его последствий для различных регионов Земли сохраняет актуальность уже полвека. Международная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) регулярно каждые пять лет выпускает аналитические доклады, начиная с 1990 г.:

First Assessment Report (AR1) of the IPCC (1990); SAR (1995): IS92 scenarios; TAR (2001): SRES scenarios; AR4 (2007): SRES scenarios; AR5 (2013); последний из которых AR6 вышел в августе 2021 г. (www.ipcc-data.org). В мире наблюдается появление новых климатических центров, новых моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) и новых сценариев социально-экономического развития общества. При этом для одних регионов Земли прогнозируется увеличение катастрофических природных явлений, повыше-

¹ Дополнительные материалы для этой статьи доступны по doi 10.31857/S2587556623070129 для авторизованных пользователей.

ние уровня мирового океана, опустынивание с последующими климатическими миграциями населения, хотя другие регионы могут получить климатические бонусы (МГЭИК, 2021).

Горы являются хорошим полигоном для исследования влияния текущих и прогнозируемых климатических изменений на структуру растительного покрова, поскольку изменения происходят на коротких расстояниях в сотни метров в сравнении с сотнями километров на равнинах. В азиатской части России, в Сибири, таким идеальным полигоном являются горы Южной Сибири (Гвоздецкий, Михайлов, 1987; Михайлов, 1961). Их базовый энергетический уровень находится в субаридной зоне степей, а западный атлантический перенос и достаточно высокие абсолютные высоты дают возможность реализации самого широкого спектра высотных поясов растительности — от полупустынь и степей межгорных котловин до тундрово-альпийского и нивального через большое разнообразие возможных типов лесной растительности (Типы ..., 1980). В Сибири влияние Атлантики снижается по мере продвижения с запада на восток, что способствует аридизации и обеднению набора высотно-поясных спектров растительности.

Именно на юге Сибири находятся два крупных, находящихся под охраной мирового сообщества, трансграничных региона — “Алтай–Золотые горы” и Байкальский регион, включающий объект Всемирного наследия — “Озеро Байкал”.

Горы Южной Сибири обладают огромным лесоресурсным потенциалом. Но на интерактивной карте (<https://www.globalforestwatch.org/map/country/RUS/>) за последние 20 лет появляется все больше “красных” территорий нарушенных лесов, подверженных пожарам и рубкам (Антанович и др., 2016). В последние десятилетия в уникальных темнохвойных лесах гор Южной Сибири проявился еще один негативный феномен — массовое усыхание (Бажина и др., 2013; Сайгин и др., 2019; Чебакова и др., 2022; Tchepakova et al., 2022). Он породил лавину публикаций, в большинстве своем объясняющих причину усыхания лесов актуальными изменениями климата и аридизацией условий произрастания горных лесов (Воронин и др., 2019; Kharuk et al., 2017). Обзор литературы (Чебакова и др., 2022) показывает, что в усыхании темнохвойных лесов, возможно, реализуется синэнергетический эффект нескольких одновременно действующих абиотических и биотических факторов.

По мере появления моделей и сценариев изменения климата в научном сообществе появилось множество публикаций, прогнозирующих изменения ареалов отдельных видов растений и животных (Власенко и др., 2021; Исаев и др., 2019; Санданов и др., 2020; Huang et al., 2022; Petrenko et al.,

2022; и т.д.). Следует отметить, что этому способствовало как развитие инструментов моделирования (BIOCLIM, MaxEnt, Random Forest и т.п.), так и появление легкодоступных глобальных баз климатических данных для настоящего, прошлого и будущего (WorldClim). Однако в российской лесотиполого-географической традиции принято оценивать местообитания не только для отдельных видов, но и для сложных комплексных растительных сообществ (Поликарпов и др., 1986; Типы ..., 1980) — зонально-провинциальных (ЗПК) и высотно-поясных комплексов (ВПК). Поэтому центральными объектами нашей работы для гор Южной Сибири и Северной Монголии являются ВПК растительности.

В статье представлены прогнозные расчеты изменений растительного покрова гор Южной Сибири и Северной Монголии к середине XXI в. по модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) Института вычислительной математики РАН (INM-CM5-0) и двум сценариям Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC): умеренного сценария *ssp126* и жесткого *ssp585* с целью:

- определить диапазон прогнозируемых изменений климата для нашей территории в соответствии с МОЦАО отечественного климатического центра и крайними сценариями социально-экономического развития общества;

- спрогнозировать потенциальные изменения ареалов высотно-поясных комплексов растительности, используя наши биоклиматические модели.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Географическое положение. Наши расчеты и визуализации были проведены для окна с координатами 48°–58° с.ш. и 80°–120° в.д. (рис. 1). Северную часть окна занимает физико-географическая страна горы Южной Сибири (Гвоздецкий, Михайлов, 1987; Михайлов, 1961). Естественным продолжением гор Южной Сибири является физико-географическая страна Северная Монголия, включающая Монгольский Алтай, Хангай и Хэнтэй, которая имеет много общего с горами Южной Сибири (Власова и др., 2007). Северные и западные макросклоны ее горных систем покрыты лесом, хорошо выражена высотная поясность, лесные ландшафты представлены теми же самыми хвойными лесообразующими породами и соответствуют высотно-поясным спектрам умеренно и недостаточно влажных фаций гор Южной Сибири (Леса ..., 1978).

Обе горные страны расположены на мировом водоразделе между реками бассейнов Северно-ледовитого и Тихого океанов и бессточными котловинами Центральной Азии. Их субширотная протяженность более 3 тыс. км, характеризуется

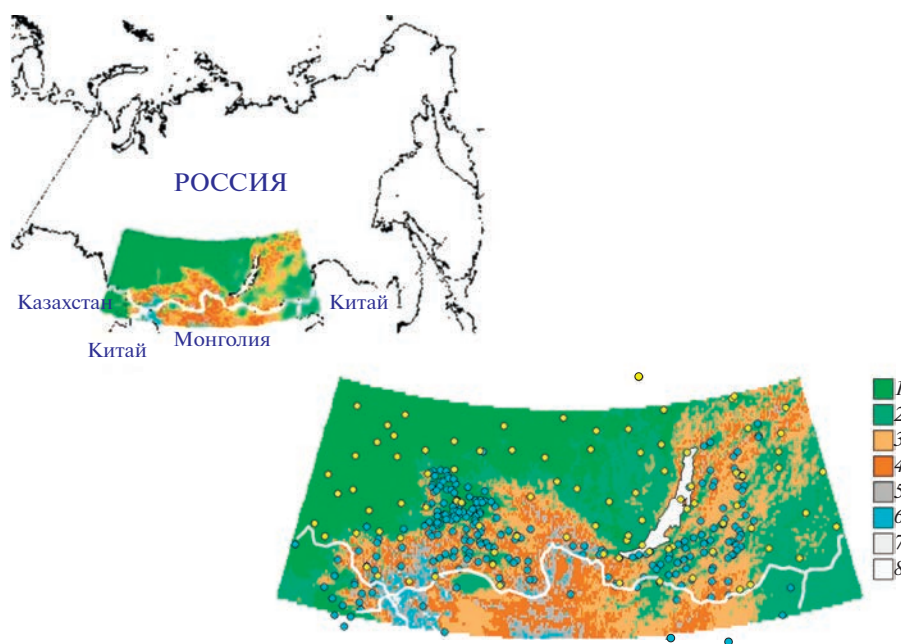


Рис. 1. Расположение гор Южной Сибири и Северной Монголии (окно 48°–58° с.ш. и 80°–120° в.д.) на картосхеме азиатской части России (слева) и их топография (справа). Кружками обозначены 280 метеостанций и постов, данные которых использованы в расчетах. Градация высот (м): 1 – <500; 2 – 500–1000; 3 – 1000–1500; 4 – 1500–2000; 5 – 2000–2500; 6 – 2500–3000; 7 – 3000–3500; 8 – >3500.

сложной орографией – абсолютные высоты достигают более 4 км (Табын-Богдо-Ула – 4653 м над ур. м.; Белуха – 4506 м над ур. м.).

Климат. Сложная орография создает большое разнообразие климатических условий. Климат гор Южной Сибири и Северной Монголии определяется как континентальный умеренно-холодный и обусловлен положением гор в широтной полосе 48°–58° с.ш. юга Средней Сибири в центре материка. В горных котловинах и с продвижением на восток степень континентальности растёт и климат оценивается как резко континентальный: годовая амплитуда температур воздуха достигает в котловинах Тувы и Забайкалья 60°C, а коэффициент континентальности по Конраду более 100 и 90 соответственно. В горах он уменьшается с высотой: наименьший, равный 60, наблюдается на западе региона в Кузнецком Алатау, 70 – в Восточном и Западном Саянах, до 80 на востоке региона – в Забайкалье (Леса ..., 1978; Поликарпов и др., 1986). Самые низкие январские температуры также отмечаются в котловинах до –38°C в Тувинской и Убсунурской котловинах, в котловине Больших Озер; самые высокие – до –10°C в районе Телецкого озера (ст. Яйлю). Самые высокие июльские температуры до 25°C регистрируются в степях Монголии и Тувы, самые низкие – в высокогорной тундре от 3°C. В летнее время происходит усиление циклонической деятельности. Наибольшее количество осадков выпадает на наветренных северо-западных склонах:

до 1500 мм/год в субальпийских высокогорьях Алтая, Кузнецкого Алатау, Западного Саяна и Хамар-Дабана. В связи с этим геоботаники Института леса СО РАН для экосистем таких местообитаний приняли термин “барьерно-дождевые леса” (Nazimova et al., 2014). На подветренных южных склонах и в замкнутых котловинах выпадает наименьшее количество осадков: от 80 до 200 мм/год, что при недостатке влаги для существования лесов обуславливает экспозиционную асимметрию ландшафтов. На подветренных склонах южных, юго-западных и юго-восточных экспозиций нижняя граница леса поднимается до отметок 1200 м, а иногда 1600 м, верхняя граница достигает 2200 м (Поликарпов и др., 1986). Аналогично распределяется количество зимних осадков в виде снежного покрова: от 5 см в котловинах подветренных южных склонов до 200 см в наветренных высокогорьях.

Особые условия складываются в Прибайкалье, которые формируются под влиянием массы вод оз. Байкал, оказывающей тепляющее влияние зимой и охлаждающее летом, что способствует удлинению безморозного периода. В Забайкалье влияние озера ослабевает, отмечается наибольшая повторяемость антициклонов, климат становится более континентальным, уменьшается количество осадков (Мячкова, 1983).

Климатические слои базового климата были созданы с помощью модулей *splina* и *lapgrd* программы ANUSPLIN путем сплайновой интерполяции (Hutchinson, 1995, 2011) данных метеостан-

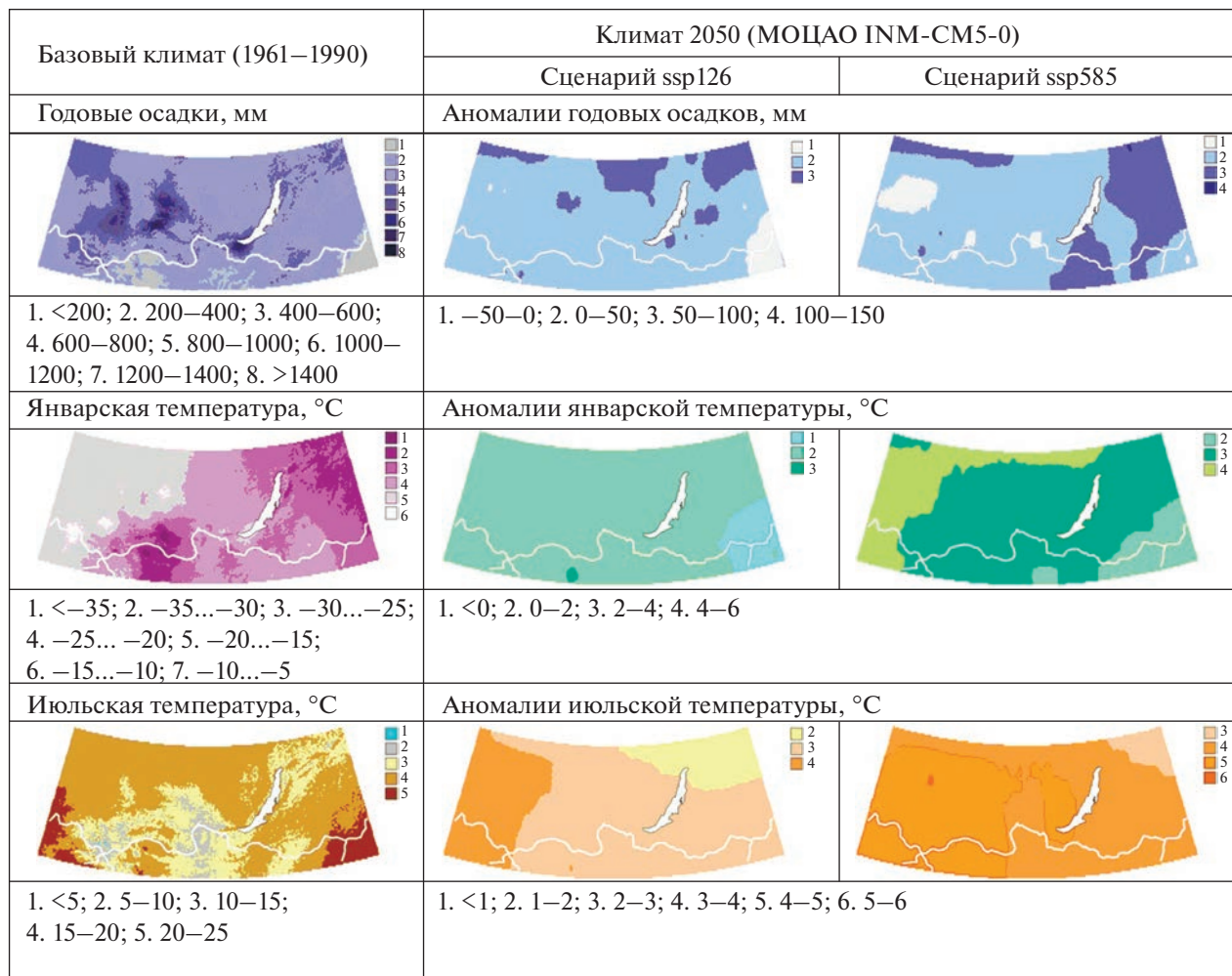


Рис. 2. Температуры января, июля, годовое количество осадков и их аномалии к 2050-м годам, рассчитанные по МОЦАО INM-CM5-0 (<http://www.ipcc-data.org>).

ций. В первых Обобщенных докладах МГЭИК (IPCC, 2007; www.ipcc-data.org), за базовый был принят период 1961–1990 гг. Следует отметить, что на сайте ВНИИМТИ-МЦД (www.meteo.ru), содержащем данные по станциям, входящим в систему ВМО (Всемирная метеорологическая организация), для нашего окна насчитывается только 89 станций, в то время как в Справочниках по климату СССР (1964–1974 гг.) можно найти: 180 для январской и июльской температуры и 280 для годовых осадков. Количество станций для получения качественной сплайновой интерполяции климатических показателей в сложном горном рельефе имеет решающее значение. Для всех станций ВМО, входящих в наше окно, сравнение для средних многолетних данных из Справочников и за базовый период с помощью t -критерия Стьюдента показало, что их показания различаются незначимо (см. Доп. материал 1). В связи с этим, сплайны для условно базового климата были получены, используя данные Справочников (рис. 2).

Как известно, метеостанции располагаются преимущественно в низкогорьях; в нашем наборе данных 46 станций расположено в среднегорьях (1000 м и более) и только 3 станций — в высокогорьях (на высоте более 2000 м). Заметим, что из 89 станций ВМО, попадающих в наше окно, только 40 станций расположены на высоте выше 500 м над ур. м. и только 9 выше 1000 м над ур. м.

По данным Справочников находили регрессионные зависимости для расчета климатических индексов, значимых для биоклиматического моделирования растительности: суммы градусо-дней за период с температурами выше 5°C (GDD_5) $\text{growing degree-days} > 5^{\circ}\text{C}$), который отличается от $\sum T_5$, сумм температур, накопленных за период с температурами выше 5°C , приведенных в Справочниках, на произведение: $(5^{\circ}\text{C} \times L)$, где L продолжительность периода с $t > 5^{\circ}\text{C}$; и DD_0 ($\text{degree-days} < 0^{\circ}\text{C}$). Показатели $\sum T_5$, L и DD_0 из Справочников, рассчитанные по единой методике, использовались

для нахождения регрессионных зависимостей между GDD_5 и средними температурами января и июля ($R^2 = 0.92$) и DD_0 и средней температурой января ($R^2 = 0.87$). По этим регрессиям затем рассчитывались прогнозные GDD_5 и DD_0 для различных сценариев для 2050-х годов, для которых средние месячные температуры являются аргументами (см. Доп. материал 1).

Слои будущего климата к 2050-м годам были построены по данным МОЦАО INM-CM5-0 Института вычислительной математики РАН (Володин, 2022), единственной российской МОЦАО, вошедшей в базу данных IPCC (CMIP6, 2021). Нами были взяты два крайних сценария: ssp126 (мягкий, предполагающий переход на зеленую энергетику) и ssp585 (жесткий, предполагающий использование ископаемого топлива). Аномалии климатических показателей были рассчитаны как разница между средними за период 2040–2060 гг. (2050-е годы) и средними базового климата (1961–1990 гг.) по данным — INM-CM5-0 и интерполированы в программе TerrSet для пикселя с размером 0.1° (около 10 км) (см. рис. 2). Температуры июля и января и годового количества осадков к 2050-м годам были рассчитаны путем сложения аномалий показателей с базовыми показателями за 1961–1990 гг. Подробнее расчет аномалий будущего климата описан в Доп. материале 2.

Затем карты трех метеоэлементов для базового климата и климата 2050-х годов пересчитывались в карты климатических индексов, которые мы используем в нашей биоклиматической модели: GDD_5 и DD_0 . Карта AMI (Annual Moisture Index), характеризующего режим увлажнения, рассчитывалась путем деления карты суммы градусо-дней за вегетационный период на карту годового количества осадков.

Растительность гор Южной Сибири и Северной Монголии. Взаимодействие западного переноса с орографией региона создает систему четырех групп лесорастительных районов, отличающихся режимом увлажнения и континентальности климата, который обуславливает различную структуру высотной поясности растительности. Группам районов соответствуют климатические фации горных лесов — единицы классификации лесных экосистем (Назимова и др., 1987; Поликарпов и др., 1986).

В первой избыточно-влажной фации доминируют темнохвойные пихтовые и кедрово-пихтовые леса. Во второй влажной — преобладают кедровые леса и светлохвойные лиственничные и сосново-лиственничные леса в низкогорьях. А в третьей умеренно влажной — преобладают лиственничные леса в среднегорьях, кедровые в высокогорьях; и в четвертой недостаточно влажной — преобладают степи, а леса вытеснены в высокогорья

(1200–1600 м) из-за сухости климата (Поликарпов и др., 1986).

В биоклиматической модели горной растительности использованы единицы высокого (зонального) ранга — высотно-поясные комплексы растительности — классы ВПК (далее ВПК), диагностические фитоценотические признаки и детальная классификация ВПК гор Южной Сибири дана в работах (Назимова и др., 1987; Поликарпов и др., 1986; Типы ..., 1980). В нашей биоклиматической модели выделяются десять классов ВПК, восемь из которых — в текущем климате: 1) горная тундра, 2) субальпийское темнохвойное редколесье (*Abies sibirica*, *Pinus sibirica* с *Picea obovata*), и подгольцовое светлохвойное редколесье (*Larix sibirica*), 3) темнохвойная (*A. sibirica*, *P. sibirica* с *P. obovata*), и 4) светлохвойная тайга (*L. sibirica*), 5) подтайга (*L. sibirica*, *Pinus sylvestris* и *Betula pendula*) и лесостепь, 6) темнохвойная черневая тайга (*A. sibirica*, *P. sibirica* и *Populus tremula*), 7) степь, сухая степь, 8) полупустыня/пустыня. Дополнительно к этим ВПК добавлены два класса умеренного климата, которые прогнозируются при потеплении: 9) широколиственный лес, 10) умеренная лесостепь.

Для моделирования распределений ВПК в текущем и будущем климате была использована модификация биоклиматической модели MontBioClim (Tchebakova et al., 2009), построенной ранее для Алтае-Саянского экорегиона (Парфенова, Чебакова, 1998; Monserud and Tchebakova, 1996) и Байкальского бассейна (Чебакова, Парфенова, 2000).

Модель MontBioClim является моделью конвертного типа, в которой границы между ВПК детерминируются тремя ортогональными климатическими индексами: 1) GDD_5 , характеризующей потребности растений в тепле; 2) DD_0 , характеризующей холодостойкость растений; и 3) годовым индексом увлажнения (Annual Moisture Index, AMI), представляющим отношение градусо-дней выше 5°C к годовому количеству осадков и характеризующим потребность растений во влаге или устойчивость к водному стрессу.

Климатические границы между ВПК были определены методом ординаций. Для 160 метеостанций, регистрирующих температуры, была составлена база данных, содержащая их климатические показатели и расчетные индексы. Этим же метеостанциям экспертным путем приписывалась принадлежность к определенному ВПК (Типы ..., 1980; Назимова и др., 1981). Затем для каждого ВПК определялись его граничные (минимальные и максимальные) значения в климатическом пространстве указанных климатических индексов GDD_5 , DD_0 и AMI и их 5 и 95 процентиля, как рекомендуется для конвертных моделей типа BIOCLIM (Олонова, Гудкова, 2017; Booth et al.,

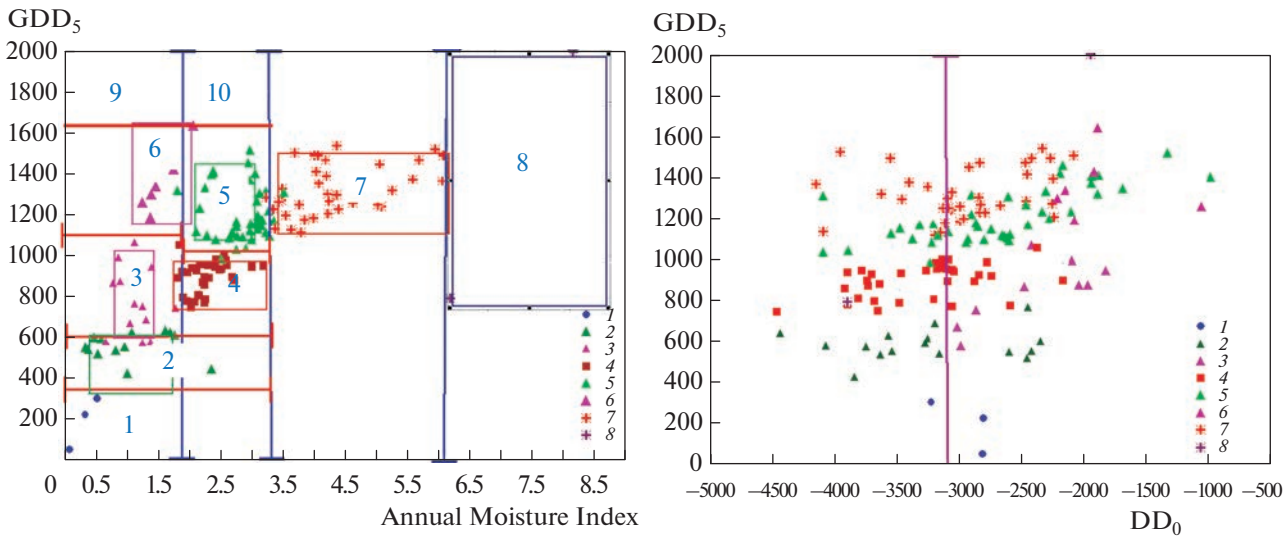


Рис. 3. Ординация высотных поясов растительности в пространстве климатических факторов: (слева) сумм градусо-дней выше 5°C, GDD₅, и годового индекса увлажнения, AMI; и (справа) сумм градусо-дней выше 5°C, GDD₅, и сумм отрицательных температур GDD₀, детерминирующих их границы в горах Южной Сибири. 1 – горная тундра, 2 – субальпийское и подгольцовое редколесье, 3 – темнохвойная тайга, 4 – светлехвойная горная тайга, 5 – подтайга и лесостепь, 6 – темнохвойная черневая тайга, 7 – степь, 8 – сухая степь, полупустыня/пустыня, 9 – широколиственный лес, 10 – умеренная лесостепь.



Рис. 4. Распределение высотно-поясных комплексов растительности в горах Южной Сибири: 1 – горная тундра, 2 – субальпийское и подгольцовое редколесье, 3 – темнохвойная горная тайга, 4 – светлехвойная горная тайга, 5 – подтайга и лесостепь, 6 – темнохвойная черневая тайга, 7 – степь, 8 – сухая степь, полупустыня/пустыня, 9 – широколиственный лес, 10 – умеренная лесостепь.

2014) во избежание случайных выбросов. Затем в осях факторов по граничным значениям строились прямоугольные “конверты” климатических ниш ВПК (рис. 3).

Далее по построенным слоям основных метео-элементов (см. рис. 2, левый столбец) рассчитывались слои климатических индексов в современном климате. Сопряжением слоев климатических индексов с границами ВПК (см. рис. 3), было получено современное распределение ВПК в горах Южной Сибири (рис. 4). Для отдельных регионов такие модельные карты были сравнены нами с актуальными картами ВПК горной растительности (см. Доп. материал 3).

Аналогичным методом сопряжения MontBioCliM со слоями климатических индексов

в 2050-х годах было смоделировано возможное распределение ВПК в будущем (см. рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты наших вычислений можно подразделить на два блока.

1. *Изменение климата на территории гор Южной Сибири к 2050 г.* По сценариям ssp126 и ssp585 МОЦАО INM-CM5-0 к середине текущего века прогнозируется летнее потепление на 3–4°C по умеренному и на 4–5°C по жесткому сценарию; соответственно зимнее потепление составит от 0–2°C и до 2–4°C. Аномалии годовых осадков по всей территории гор Южной Сибири также будут

Таблица 1. Площадь высотно-поясных комплексов растительности гор Южной Сибири в современном климате и при изменении климата к 2050-м годам (в соответствии со сценариями ssp126 и ssp585), %

Высотно-поясный комплекс растительности	Современный климат	Сценарий ssp126	Сценарий ssp585
Горная тундра	6.9	0.9	0.2
Субальпийское и подгольцовое редколесье	9.0	3.6	1.4
Темнохвойная тайга	11.7	9.7	8.7
Светлохвойная тайга	26.9	9.9	4.7
Черневая тайга	3.0	4.5	4.9
Лесостепь бореальная	25.8	32.2	26.5
Степь	11.0	15.5	24.2
Полупустыня	5.5	9.0	9.3
Широколиственный лес	0.0	0.2	0.6
Лесостепь умеренная	0.0	14.3	18.8
ВСЕГО	100.0	100.0	100.0

положительными и составят: от 50 до 125 мм (см. рис. 2).

2. *Возможные изменения распределения ВПК в горах Южной Сибири при модельных прогнозах изменения климата.*

При сопряжении нашей биоклиматической модели горной растительности MontBioClim с слоями трех климатических индексов были получены распределения высотных поясов в базовом (см. рис. 4а) и модельном климате 2050-х годов, который был спрогнозирован по климатической модели INM-CM5-0 (<http://www.ipcc-data.org>) в соответствии со сценариями ssp126 (см. рис. 4б) и ssp585 (см. рис. 4в). Изменение площадей высотных поясов к 2050-м годам, приведено в табл. 1.

При потеплении климата очевидны существенные сдвиги высотных поясов и их площадей для всего региона (см. рис. 4, табл. 1). В современном климате нелесные экосистемы — тундры и степи занимают около 1/4 площади гор Южной Сибири и, соответственно, 3/4 занимают леса (с учетом субальпийских и лесостепных редколесий). При потеплении климата тундра почти исчезнет, и ее местообитания могут занять субальпийско-подгольцовые леса. Но и их площади уменьшатся в 2.5 раза по мягкому сценарию и или они почти исчезнут по жесткому сценарию. Большую часть сомкнутых горно-таежных лесов составляют светлохвойные леса (27%) и существенно меньшую — темнохвойные леса (15%). Светлохвойная тайга перейдет в лесостепь бореальную, а последняя — в лесостепь умеренную.

Появятся условия для произрастания хвойно-широколиственных лесов неморального облика, которых сегодня не существует, за исключением рефугиума липы сибирской площадью 5000 га в подножьях Кузнецкого Алатау. Площадь этих лесов будет сопоставима с площадями исчезающих субальпийско-подгольцовых редколесий. Иде-

альные условия создадутся для лесостепи: вместе с бореальной широколиственной лесостепью составит 45% территории в то время, как сегодня ее площадь только 26%.

Таким образом, потепление в середине века приведет к значительному сокращению холодных ВПК — горных тундр и субальпийского и подгольцового редколесий. Темнохвойная тайга частью перейдет в черневую на своей нижней границе, а, в свою очередь, в нижней части черневой тайги создадутся условия для появления элементов широколиственных лесов.

Аридизация климата приведет к существенно увеличению засушливых ВПК: площади степей и полупустынь увеличатся 1.5–2 раза при разных сценариях. При этом основная часть засушливых ВПК как в настоящее время, так и в будущем, останется на территории Северной Монголии.

ОБСУЖДЕНИЕ

Биоклиматическое моделирование лесной растительности в горах Южной Сибири на основе климатических ординаций высотных поясов началось с конца 1950-х годов в работах (Назимова, 1975; Назимова и др., 1981; Поликарпов и др., 1986; Преображенский и др., 1959) и продолжается в настоящее время в виде прогнозного биоклиматического моделирования (Tshebakova et al., 2009; и др.).

В настоящее время происходит всплеск исследований по моделированию экологической ниши вида, распределения видов, но работ, посвященных моделированию сложных сообществ, какими являются ВПК, немного. В работе (Zischg et al., 2021) авторы используют аналогичный алгоритм для моделирования перемещения высотных поясов растительности в одном регионе Швейцар-

ских Альп под воздействием изменений климата. Сначала определяются климатические индексы категорий растительности с последующим моделированием потенциальных ареалов этих категорий в прогнозируемом климате.

В данной работе мы использовали два сценария изменения климата: мягкий сценарий ssp126 (green economics) и жесткий сценарий ssp585 (business-as-usual) Института вычислительной математики РАН (Володин, 2022). В мягком сценарии мир представлен быстрым ростом населения, но с быстрым развитием экономики, ориентированной на информационные технологии, на сокращение материалоемкости и внедрения чистых и ресурсно-эффективных технологий с акцентом на глобальные решения проблем экономической, социальной и экологической устойчивости. В соответствии с жестким сценарием происходит быстрый рост населения, но экономическое развитие ориентировано на регионы, экономический рост и технический прогресс носит разобщенный и медленный характер и происходит на основе использования ископаемого топлива. Российская МОЦАО INM-CM5-0, как отмечается ее авторами (Володин, 2022), является умеренно чувствительной к увеличению концентрации CO₂ и приводит к умеренным величинам аномалий основных метеоэлементов на нашей территории. Следствием этого является не очень большие различия аномалий по этим крайним сценариям.

При моделировании пространственного распределения видов и сообществ всегда возникает проблема сравнения с эталонами, полученными независимым путем, например, использовать для этой цели данные дистанционного зондирования (*Landsat*, *Sentinel*), однако это нетривиальная задача — дешифровать высотно-поясные комплексы растительности. Этому можно найти объяснение. Виды лесообразующих пород — это реально существующие объекты, имеющие четкую идентификацию; в то время как ВПК — это идеализированные сложные объекты, не имеющие четких границ. На профиле, рассмотренном в статье (Назимова и др., 2020), при одних и тех же лесообразующих породах (кедр, пихта) по высотному профилю идет смена трех ВПК: черногого, горно-таежного и субальпийского, различающихся продуктивностью и флористическим составом напочвенного покрова, которые не идентифицируются на снимках. При этом следует отметить, что, если верхнюю границу леса можно считать климатогенной, то нижняя граница является продуктом антропогенного воздействия.

В Доп. материале 3 мы сравнили с помощью каппа-статистики (Tchebakova et al., 2009) распределение ВПК, полученное по конвертной модели, с распределением ВПК, полученным нами с помощью программы MaxEnt. Сравнение каждой

пары ВПК на картах показали в целом удовлетворительное соответствие (каппа более 0.4), а для тундры, светлохвойной тайги и степи — хорошее и отличное. Но для темнохвойной и черневой тайги результаты оказались неудовлетворительными, что требует дополнительного анализа причин.

Используемая здесь МОЦАО и ее сценарии не дают значительной аридизации климата и не показывают существенного риска для лесных, и в частности темнохвойных ВПК. В результате, лесное пространство (с учетом экотон лесотундры и лесостепи) изменится не так сильно: от 76.4% в современном климате до 74.4 и 65.6% для ssp126 и ssp585 сценариев соответственно. Но вдвое сократятся площади сомкнутого горно-таежного леса. Потенциальные смещения верхней и нижней границы леса могут достигать сотни метров. Смягчение зимних температур и общее повышение теплоресурсов дают возможность неморальным элементам рефугиумов субнеморальных лесов обогатить лесную флору. Из существующих в настоящее время в регионе флористических элементов широколиственных лесов можно упомянуть липу сибирскую и виды напочвенного покрова: копытень европейский, бруннера сибирская, ясменник душистый, сныть обыкновенная, ветреница байкальская, папоротник Брауна и др. (Назимова и др., 1987).

При общем благоприятном климатическом потенциале для стабильного существования горных лесов региона к середине века, следует отметить, что любая степень аридизации климата увеличивает вероятность пожаров на нижней границе леса, определяемой засушливостью климата. При увеличении повторяемости пожаров и сокращении интервалов между ними возобновления леса не будет, а, значит, граница леса будет отступать вверх в горы, и в итоге лес будет замещаться степью.

Следует коснуться вопроса о широко распространенных в настоящее время моделях, применяемых в определении потенциальных и прогнозных ареалов видов (Олонова, Гудкова, 2017). Как правило, в качестве климатических слоев при таком моделировании берутся данные климатической базы WorldClim (Hijmans et al., 2005). При этом авторы не учитывают, что база WorldClim была создана для установления биоклиматических закономерностей именно на глобальном уровне, а применение таких биоклиматических индексов как BIO3 — isothermality, BIO4 — seasonality и т.п. (Huang et al., 2022) не имеет смысла на региональном уровне, характеризуемом существенно меньшей вариабельностью климатических условий. Также совершенно неоправданно использование всех 19 климатических показателей из WorldClim. В работе (Назимова и др., 1981) показано, что “избыток признаков климата не

улучшает качества деления на классы растительности". Многие авторы считают достоинством этой базы климатические слои детального разрешения (от 10' до 30''), но такое разрешение является результатом формальной интерполяции и не дает желаемой точности, если в регионе находится малое количество метеостанций, как, например, в горах или на отдаленных территориях. Более того, в WorldClim для интерполяции климатических слоев используются далеко не все региональные станции, так как Российская служба Росгидромет передает в ВМО данные только трети российских станций. Для региональных исследований мы рекомендуем использовать данные всех метеостанций исследуемого региона и на их основе самостоятельно проводить интерполяцию данных для получения климатических слоев детального разрешения, используя, например, пакет ANUSPLIN (Hutchinson, 2011).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены возможные последствия изменения климата для перераспределения высотных поясов растительности в крупном регионе гор Южной Сибири и Северной Монголии. Горная растительность представлена широким спектром типов растительности бореального и умеренного климатических поясов: фрагментами пустынь, степью, лесом различной структуры и продуктивности, тундрой и нивальным поясом. Основное внимание было уделено лесной растительности.

Для характеристики изменения климата к середине века (2040–2060 гг.) были использованы прогнозные проекции отечественной модели циркуляции атмосферы и океана INM-CM5-0 Института вычислительной математики РАН и два крайних сценария развития мирового сообщества мягкий — ssp126 и жесткий — ssp585, разработанные МГЭИК (IPCC). Как отмечается авторами климатической модели INM-CM5-0, она является не очень чувствительной к удвоению концентрации CO₂, поэтому прогнозные аномалии температур и осадков не выглядят экстремальными даже по жесткому сценарию ssp585. Эта модель прогнозирует повышение как тепло-ресурсов, так и влагоресурсов в регионе, однако не пропорциональное, что ведет к умеренной аридизации и расширению вдвое степей и полупустынь, основные ареалы которых находятся на территории Северной Монголии.

Вдвое также возрастет потенциальная площадь лесостепи, в которую трансформируются горно-таежные светлостойные леса. Потенциальное лесное пространство (включая экотоны лесотундры и лесостепи) изменится в незначительной степени: не изменится при мягком сценарии и сократится на 10% при жестком сценарии.

Естественным результатом потепления климата в регионе будет замещение лесотундры таежными лесами. Также расширится пояс черневых лесов за счет темнохвойных горно-таежных. Более теплая часть современных черневых лесов будет соответствовать хвойно-широколиственным лесам Европейской территории России по параметрам теплообеспеченности и умеренности климата, что способствует расширению ареалов неморальных элементов, например, липы, реликтовых растений напочвенного покрова.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках базового проекта № 0287-2021-0008.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность четырём рецензентам за их кропотливую работу с рукописью, которая помогла прояснить многие дискуссионные моменты, чем существенно улучшила нашу работу.

FUNDING

The study is supported by the Basic project no. 0287-2021-0008.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their sincere gratitude to four reviewers for their thorough work with our manuscript, which helped us to clear many debatable issues that significantly improved our manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антамошкина О., Брюханов А., Трофимова Н. Малонарушенные лесные территории в Алтае-Саянском экорегионе: анализ ситуации и возможности сохранения // Устойчивое лесопользование. 2016. № 2 (46). С. 39–45. <https://wwf.ru/resources/publications/periodicals/zhurnal-ustoychivoe-lesopolzovanie/ustoychivoe-lesopolzovanie-2-46-2016> (дата обращения 05.03.2023).
- Бажина Е.В., Сторожев В.П., Третьякова И.Н. Усыхание пихтово-кедровых лесов Кузнецкого Алатау в условиях техногенного загрязнения // Лесоведение. 2013. № 2. С. 15–21.
- Власенко В.А., Турмух Д., Назын Ч.Д., Власенко А.В. Моделирование ниши и особенности распространения копробионтных грибов в Азии на примере *Syathus stercoratus* // Самарский науч. вестн. 2021. Т. 10. № 3. С. 41–46.
- Володин Е.М. Вероятные изменения климата в XXI веке на территории России по данным модели климата INM-CM5-0 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 5–13.
- Воронин В.И., Софронов А.П., Морозова Т.И., Осолков В.А., Суховольский В.Г., Ковалёв А.В. Ланд-

- шафтная приуроченность бактериальных болезней темнохвойных лесов хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 56–65.
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(56-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65))
- Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР: Азиатская часть. Изд. 4, испр. и доп. 1987. 448 с.
- Исаев А.П., Борисов Б.З., Никифорова Е.Н. Биоклиматическое моделирование ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24. № 3. С. 121–133.
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-11>
- Ландшафтная карта СССР: М-6 1 : 4000000 / под ред. А.Г. Исаченко. М.: ГУГК, 1988.
- Леса Монгольской Народной Республики (география и типология) / ред. Е.М. Лавренко, В.Е. Соколов. М.: Наука, 1978. 128 с.
- МГЭИК, 2021: Резюме для политиков. Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / ред В. Массон-Дельмонт, М.П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, С. Бергер, Н. Кауд, Ю. Чэнь, Л. Голдфарб, М.И. Гомис, М. Хуан, К. Лейтцелл, Э. Лонной, Дж.Б.Р. Мэтьюз, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, О. Йелекчи, Р.Ю. и Б. Чжоу. Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2021. С. 3–32.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.001> (дата обращения 24.04.2023)
- Михайлов Н.И. Горы Южной Сибири. 1961. 238 с.
- Мячкова Н.А. Климат СССР. М.: Изд-во МГУ, 1983. 192 с.
- Назимова Д.И., Коротков И.А., Чередникова Ю.С. Основные высотно-поясные подразделения лесного покрова в горах Южной Сибири и их диагностические признаки / Чтения памяти академика В.Н. Сукачева. V. Структура и функционирование лесных биогеоценозов Сибири. М.: Наука, 1987. С. 30–64.
- Назимова Д.И., Молокова Н.И., Джансеитов К.К. Высотная поясность и климат в горах Южной Сибири // География и природные ресурсы. 1981. № 2. С. 68–78.
- 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.
- Олонова М.В., Гудкова П.Д. Биоклиматическое моделирование: задания для практической работы и методические указания к их выполнению. Томск: Изд. Дом Томск. гос. ун-та, 2017. 50 с.
- Парфенова Е.И., Чебакова Н.М. Возможные изменения растительности Горного Алтая при потеплении климата и построение прогнозных карт // Геоботаническое картографирование 1998–2000. СПб.: БИН РАН, 2000. С. 26–31.
- Парфенова Е.И., Чебакова Н.М. Биоклиматические модели коренных лесов гор Южной Сибири // Лесоведение. 2009. № 5. С. 34–42.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.
- Преображенский В.С., Фадеева Н.В., Мухина Л.И., Томилов Г.М. Типы местности и природное районирование Бурятской АССР. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1959. 218 с.
- Сайгин И.А., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Метод детектирования долгосрочных усыханий темнохвойных лесов России на основе спутниковых данных: матер. 17-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2019. [http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/17/7902_IKI_konf2019_3\(2\)\(1\)_1.pdf](http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/17/7902_IKI_konf2019_3(2)(1)_1.pdf) (дата обращения 05.03.2023).
- Самойлова Г.С. Ландшафтная карта Алтае-Саянского экорегиона. М-6 1 : 200 000. М.: ИГЕМ РАН, 2001.
- Санданов Д.В., Дугарова А.С., Селютин И.Ю. Моделирование распространения видов секции *Xerobia* Bunge рода *Oxytropis* DC. на территории Центральной Азии при климатических изменениях в прошлом и будущем // Вестн. Томск. Гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 85–104.
- Справочник по климату СССР. Вып. 17, 20–24. Ч. 1–4. Ленинград: Гидрометеиздат, 1967–1970. <http://www.pogodaiklimat.ru; www.meteo.ru> (дата обращения 05.03.2023).
- Типы лесов гор Южной Сибири / ред. В.Н. Смагин. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- Чебакова Н.М., Парфенова Е.И. Перераспределение растительности в бассейне озера Байкал при возможном потеплении климата // География и природные ресурсы. 2000. № 1. С. 64–68.
- Чебакова Н.М., Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Сенашова В.А. В поисках фактора “икс”: обзор публикаций по проблеме усыхания темнохвойных лесов Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 123–140.
- Booth T.H., Nix H.A., Busby J.R., Hutchinson M.F. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies // Diversity and Distributions, (Diversity Distrib.). 2014. № 20. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists // Diversity and Distributions. 2011. № 17. P. 43–57.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatology. 2005. № 25. P. 1965–1978.
- Huang B., Mao J., Zhao Y., Sun Y., Cao Y., Xiong Z. Similar Pattern of Potential Distribution of *Pinus yunnanensis* Franch and *Tomicus yunnanensis* Kirkendall under Climate Change in China // Forests. 2022. № 13. P. 1379.
<https://doi.org/10.3390/f13091379>
- Hutchinson M.F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines // Int. J. Geographical Information Systems. 1995. № 9. P. 385–403.
- Hutchinson M.F. ANUSPLIN ver. 4.3. 2011. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian Nation-

- al University. <http://fennerschool.anu.edu.au/research/products/anusplin> (accessed 05.03.2023).
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia // *Forest Ecology and Management*. 2017. № 384. P. 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.050>
- Monserud R.A., Tchebakova N.M. A vegetation model for the Sayan Mountains, Southern Siberia // *Canadian J. Forest Res.* 1996. № 26. P. 1055–1068.
- Nazimova D.I., Danilina D.M., Stepanov N.V. Biodiversity of Rain-Barrier Forest Ecosystems of the Sayan Mountains // *Botanica Pacifica*. 2014. Vol. 3. № 1. P. 39–47. http://botsad.ru/media/aux/bp/BP_2014_3_1_nazimova.pdf
- Petrenko T.Y., Korznikov K.A., Kislov D.E., Belyaeva N.G., Krestov P.V. Modeling of cold-temperate tree *Pinus koraiensis* (Pinaceae) distribution in the Asia-Pacific region: Climate change impact // *Forest Ecosystems*. 2022. № 9. Art. 100015. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100015>
- Tchebakova N.M., Blyakharchuk T.A., Parfenova E.I. Reconstruction and prediction of climate and vegetation change in the Holocene in the Altai-Sayan Mts, Central Asia // *Environ. Res. Let.* 2009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045025>
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate // *Environ. Res. Let.* 2016. № 11. Art. 03501. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035016>
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts Are Not the Likely Primary Cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* Forest Dieback in the South Siberian Mountains // *Forests*. 2022. Vol. 13. № 8. Art. 1378. <https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Zischg A.P., Frehner M., Gubelmann P., Augustin S., Brang P., Huber B. Participatory modelling of upward shifts of altitudinal vegetation belts for assessing site type transformation in Swiss forests due to climate change // *Applied Vegetation Science*. 2021. № 24. Art. e12621. <https://doi.org/10.1111/avsc.12621>

Potential Forest Distribution over the South Siberian and North Mongolian Mountains Related to Predicted Climate Change by the Midcentury

E. I. Parfenova^{1,*} and N. M. Tchebakova¹

¹*Sukachev Institute of Forests FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

*e-mail: lyeti@ksc.krasn.ru

The South Siberian and North Mongolian Mountains have enormous forests potential; however, more and more territories of forests disturbed by cutting and fire appeared during the late twenty years. One more negative phenomenon has been observed in unique dark-needle forests across the South Siberian Mountains: massive dieback of dark-needled forests that was related to climate aridization by many researchers. Our goal was to study predicted climate change impacts on the montane vegetation (altitudinal vegetation belts, AVB) transformation in a changing climate across the South Siberian and North Mongolian Mountains (window 48°–58° N and 80°–120° E). We based on outputs of the general circulation model the of the Computing Mathematics Institute, RAS (INM-CM5-0) and recent climate change scenarios (IPCC 2022) at 2050: the moderate ssp126 and extreme ssp585. Predictions of climate anomalies at 2050 were July temperatures 2–5°C, January temperature 1–4°C and annual precipitation 50–125 mm. According to this climate change, potential AVB may undergo transformation as follows: tundra, subalpine and “podgolets” open forest (under bare uplands) would significantly shrink; montane taiga would shrink 1.7-fold from the moderate scenario and 2.3-fold from the extreme scenario. Dark-needled AVB would remain on the same areas at the expense of subalpine AVB. Potential forest space including forest-tundra and forest-steppe ecotones would change insignificantly: would not change under the moderate scenario and would 10% decrease under the extreme scenario. Forest-steppe AVB would twice increase at the expense of light-needled AVB. One third of forest-steppe would favor broad-leaved forest-steppe. Steppe and semidesert would extend.

Keywords: climate change, global circulation model INM-CM5-0, moderate scenario ssp126, extreme scenario ssp585, bioclimatic models, vegetation altitudinal belts, dark- and light-needled taiga

REFERENCES

- Antamoshkina O., Bryukhanov A., Trofimova N. Intact Forest areas in the Altai-Sayan ecoregion. *Ustoichivoe Lesopol.*, 2016, vol. 46, no. 2, pp. 39–45. (In Russ.).
- Bazhina E.V., Storozhev V.P., Tret'yakova I.N. Dieback of fir-siberian stone pine forests under technogenic pollution in the Kuznetsky Alatau mountains. *Lesoved.*, 2013, no. 2, pp. 15–21. (In Russ.).
- Booth T.H., Nix H.A., Busby J.R., Hutchinson M.F. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. *Divers. Distrib.*, 2014, no. 20, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.*, 2011, no. 17, pp. 43–57.

- Gvozdet'skii N.A., Mikhailov N.I. *Fizicheskaya Geografiya SSSR: Aziatskaya Chast'* [Physical Geography of the USSR: Asian Part]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1987. 448 p.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2005, no. 25, pp. 1965–1978.
<https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Huang B., Mao J., Zhao Y., Sun Y., Cao Y., Xiong Z. Similar Pattern of Potential Distribution of *Pinus yunnanensis* Franch and *Tomicus yunnanensis* Kirkendall under Climate Change in China. *Forests*, 2022, no. 13, art. 1379.
<https://doi.org/10.3390/f13091379>
- Hutchinson M.F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 1995, no. 9, pp. 385–403.
- Hutchinson M.F. ANUSPLIN version 4.3, 2011. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University. Available at: <http://fenner-school.anu.edu.au/research/products/anusplin> (accessed: 05.03.2023).
- IPCC, 2021. *Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. Cambridge; New York: CUP, 2021, pp. 3–32.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Isaev A.P., Borisov B.Z., Nikiforova E.N. Bioclimatic modeling of the distribution of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) in Yakutia. *Prir. Resur. Arkt. Subarkt.*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 121–133. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-11>
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia. *For. Ecol. Manag.*, 2017, no. 384, pp. 191–199.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.050>
- Landshaftnaya karta SSSR: Masshtab 1 : 4000000* [Landscape Map of the USSR: 1 : 4000000]. Isachenko A.G., Ed. Moscow: GUGK Publ., 1988.
- Lesy Mongol'skoi narodnoi Respubliki: geografiya i tipologiya* [Forests of Mongolian People Republic: Geography and Typology]. Lavrenko E.M., Sokolov V.E., Eds. Moscow: Nauka Publ., 1978. 128 p.
- Mikhailov N.I. *Gory Yuzhnoi Sibiri* [Mountains of the Southern Siberia]. Moscow: Geografiz Publ., 1961. 238 p.
- Monserud R.A., Tchepakova N.M. A Vegetation model for the Sayan Mountains, Southern Siberia. *Can. J. For. Res.*, 1996, no. 26, pp. 1055–1068.
- Myachkova N.A. *Klimat SSSR* [Climate of the USSR]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 1983. 192 p.
- Nazimova D.I., Molokova N.I., Dzhansaitov K.K. Altitudinal belts and climate in the Southern Siberia mountains. *Geogr. Prir. Resur.*, 1981, no. 2, pp. 68–78. (In Russ.).
- Nazimova D.I., Danilina D.M., Stepanov N.V. Biodiversity of Rain-Barrier Forest Ecosystems of the Sayan Mountains. *Botanica Pacifica*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 39–47.
- Nazimova D.I., Korotkov I.A., Cherednikova Y.S. Basic Forest altitudinal subdivisions of the forest cover in the South Siberian mountains and their diagnostic signs. In *Chleniya pamyati akademika V.N. Sukacheva. V. Struktura i funktsionirovanie lesnykh biogeotsenozov Sibiri* [Readings in Memory of Academician V.N. Sukachev. V. Structure and Functioning of Siberian Forest Biogeocenoses]. Moscow: Nauka Publ., 1987, pp. 30–64. (In Russ.).
- Nazimova D.I., Ponomarev E.I., Konovalova M.E. A role of the altitudinal-belt basis and remote sensing data in the sustainable management of the mountain forests. *Lesoved.*, 2020, no. 1, pp. 3–16. (In Russ.).
- Olonova M.V., Gudkova P.D. *Bioklimaticheskoe modelirovanie: zadaniya dlya prakticheskoi raboty i metodicheskie ukazaniya k ikh vypolneniyu* [Bioclimatic Modeling: Tasks for Practical Exercises and Methodological Instructions]. Tomsk: Izd. Tomsk. Gos. Univ., 2017. 50 p.
- Parfenova E.I., Tchepakova N.M. Possible vegetation change in the Mountain Altai under climate warming and prognostic mapping. In *Geobotanicheskoe kartografirovanie 1998–2000 gg.* [Geobotanical Mapping in 1998–2000]. St. Petersburg: BIN RAN, 2000, pp. 26–31. (In Russ.).
- Parfenova E.I., Tchepakova N.M. Bioclimatic models of primary mountain forests in Southern Siberia. *Lesoved.*, 2009, no. 5, pp. 34–42. (In Russ.).
- Petrenko T.Y., Korznikov K.A., Kislov D.E., Belyaeva N.G., Krestov P.V. Modeling of cold-temperate tree *Pinus koraiensis* (Pinaceae) distribution in the Asia-Pacific region: Climate change impact. *For. Ecosyst.*, 2022, no. 9, art. 100015.
<https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100015>
- Polikarpov N.P., Tchepakova N.M., Nazimova D.I. *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* [Climate and Mountain Forests of the Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986. 225 p.
- Preobrazhenskii V.S., Fadeeva N.V., Mukhina L.I., Tomilov G.M. *Tipy mestnosti i prirodnoe raionirovanie Buryatskoi ASSR* [Terrain Types and Natural Zoning of the Buryat ASSR]. Moscow: Izd. Akad. Nauk SSSR, 1959. 218 p.
- Saigin I.A., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. Detection method of long-term dieback of dark needled forests of Russia on the base of remote sensing data. In *Materialy 17 Vseross. otkrytoi konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Proc. of the 17th all-Russia Open Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space"]. Moscow: IKI RAN, 2019. Available at: [http://conf.rse.geos-mis.ru/files/pdf/17/7902_IKI_konf2019_3\(2\)\(1\)___1.pdf](http://conf.rse.geos-mis.ru/files/pdf/17/7902_IKI_konf2019_3(2)(1)___1.pdf) (accessed: 05.03.2023). (In Russ.).
- Samoilova G.S. *Landshaftnaya karta Altae-Sayanskogo eko-regiona. Masshtab 1 : 200000* [Landscape Map of the Altai-Sayan Ecoregion. 1 : 200000]. Moscow: IGE RAN, 2001.
- Sandanov D.V., Dugarova A.S., Selyutina I.Yu. Species distribution modeling for the section Xerobia Bunge of the genus *Oxytropis* DC. on the territory of Central Asia

- under past and future climate change. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Biol.*, 2020, no. 52, pp. 85–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/52/5>
- Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 17, 20–24, ch. 1–4* [Reference Book on Climate of the USSR. Vol. 17, 20–24, Part 1–4]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967–1970.
- Tchebakova N.M., Bazhina E.V., Parfenova E.I., Senashova V.A. Erratum to: “In Search of an X Factor: A Review of Publications on the Issue of Dark-needed Forest Decline/Dieback in Northern Eurasia”. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, no. 47, art. 485. <https://doi.org/10.3103/S1068373922060097>
- Tchebakova N.M., Blyakharchuk T.A., Parfenova E.I. Reconstruction and prediction of climate and vegetation change in the Holocene in the Altai-Sayan mountains, Central Asia. *Environ. Res. Lett.*, 2009, no. 4, art. 045025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045025>
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I. Vegetation redistribution in the lake Baikal basin by possible climate warming. *Geogr. Prir. Resur.*, 2000, no. 1, pp. 64–68. (In Russ.).
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate. *Environ. Res. Lett.*, 2006, no. 11, art. 03501. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035016>
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts Are Not the Likely Primary Cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* Forest Dieback in the South Siberian Mountains. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 8, art. 1378. <https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* [Forest Types of the Southern Siberia Mountains]. Smagin V.N., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 336 p.
- Vlasenko V.A., Turmunkh D., Nazyn C.D., Vlasenko A.V. Modelling the niche and peculiarities of the coprobiont fungi distribution in Asia: a case study by *Cyathus stercoreus*. *Samar. Nauch. Vestn.*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 41–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/snv2021103105>
- Volodin E.M. Possible Climate Change in Russia in the 21st Century Based on the INM-CM5-0 Climate Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, no. 47, pp. 327–333. <https://doi.org/10.3103/S1068373922050016>
- Voronin V.I., Sofronov A.P., Morozova T.I., Oskolkov V.A., Sukhovol'skii V.G., Kovalev A.V. The landscape-specific occurrence of bacterial diseases in dark-coniferous forests on Khamar-Daban range (southern Cisbaikaliya). *Geogr. Prir. Resur.*, 2019, no. 4, pp. 56–65. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(56-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65))
- Zischg A.P., Frehner M., Gubelmann P., Augustin S., Brang P., Huber B. Participatory modelling of upward shifts of altitudinal vegetation belts for assessing site type transformation in Swiss forests due to climate change. *Appl. Veg. Sci.*, 2021, no. 24, art. e12621. <https://doi.org/10.1111/avsc.12621>