

УДК 574.9:551.58

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ГОРНЫХ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ НА ЮГЕ ПРИЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

© 2023 г. Д. И. Назимова^а, *, В. Л. Кошкарлова^а, **,
Д. М. Данилина^а, ***, М. Е. Коновалова^а, ****

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), Красноярск, Россия

*e-mail: inpol@mail.ru

**e-mail: koshkarova.vl@ksc.krasn.ru

***e-mail: danilina.dm@ksc.krasn.ru

****e-mail: markonovalova@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2023 г.

После доработки 04.09.2023 г.

Принята к публикации 22.09.2023 г.

Устойчивое управление лесными ресурсами в горных районах требует расширения региональных баз данных и современной эколого-географической основы для прогноза ближайшего будущего горных лесов. В Приенисейской части Саян авторами проведены мультидисциплинарные исследования на горных профилях в ряде конкретных регионов. На основе геоинформационных систем (ГИС) для трех ключевых горных территорий (национального парка Столбы и Саяно-Шушенского заповедника, окрестности пос. Танзыбей) созданы серии ландшафтно-типологических карт с количественными параметрами базовых климатических факторов (тепло, влагообеспеченность, степень континентальности и др.) в каждом высотном поясе. Представлена концепция и результаты исследований, имеющие прямой выход на региональный прогноз и планирование лесопользования в контексте глобальных прогнозов климата. Концепция прогноза состава темнохвойных лесов, разрабатываемая авторами, учитывает их прошлое, современное состояние, степень нарушенности пожарами и рубками, а также характер изменения климата в горных ландшафтах. Представлены итоги исследований по пространственно-временным изменениям темнохвойных экосистем в горах юга Приенисейской Сибири. Используются материалы информационных систем разного масштаба — от АИС “Биом” для Сибири до региональных ГИС Приенисейской Сибири на ООПТ и для отдельных лесничеств. Базы данных включают блоки информации о биоразнообразии, климате, комплексных стационарных наблюдениях за 60-летний период, космические снимки и картографические материалы разного масштаба, экологические характеристики хвойных видов-лесообразователей — кедра, пихты, ели, сосны, лиственницы и других. В ходе работы применялись методы палеогеографии, климатической ординации, информационного анализа, картографирования на геоинформационной основе и др. Показана наиболее вероятная реакция темнохвойных пород, в том числе кедра сибирского, на потепление и увлажнение климата, прогнозируемое разными климатическими моделями. Предложены меры по сохранению и восстановлению ценных хвойных насаждений в горах.

Ключевые слова: горные темнохвойные экосистемы, виды-лесообразователи, пространственно-временная динамика, климатогенные смены, региональные прогнозы, высотные пояса, геоинформационные системы, юг Приенисейской Сибири

DOI: 10.31857/S2587556623080149, **EDN:** GQZDAR

ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху данные климатического мониторинга однозначно подтверждают тренд потепления климата на территории Сибири за последние 100 лет, а возможно и более (Анализ ..., 2018; Липка и др., 2022; IPCC ..., 2007; и др.). Леса реагируют на него и одновременно на другие факторы внешнего фона (антропогенные, пироген-

ные, биогенные) изменением состава и структуры. Известно, что состав хвойных формаций в прошлые эпохи голоцена зависел от колебаний волн тепла и похолодания и изменения увлажнения (IPCC ..., 2022; Кошкарлов, Кошкарлова, 2021; Кошкарлов и др., 2021; Развитие ..., 2010; Groisman et al., 2013; и др.). Колебания климата и других факторов окружающей среды сопровождается наруше-

нием равновесия между темнохвойными, светлохвойными и лиственными формациями на юге Сибири. Из-за недостатка сведений о климате конкретной территории и знаний о биологии и экологии видов-лесообразователей отдельные прогнозы ученых на ближайшее будущее недостаточно доказательны (Kharuk et al., 2020), а выводы об аридизации климата на юге Сибири опровергаются фактическими данными (Tchebakova et al., 2022).

Происходящие в последние десятилетия климатогенные смены хвойных лесов на юге Сибири маскируются под вид пирогенных или послерубочных сукцессий, демутиационных, либо дигрессивных смен сообществ и имеют много общего с ними в последовательности стадий. Анализ ситуации с применением данных экологических моделей показал, что увеличение частоты и площади лесных пожаров и очагов заражения насекомыми-вредителями может ускорить изменение пространственно-временной структуры и мозаичного состава лесного покрова. Действительно, в Сибири за последние 20 лет неоднократно отмечались экстремальные пожарные сезоны (Пономарев и др., 2019). Потепление климата вызывает и миграцию леса в горах вверх по склону, тогда как на нижней границе их ареал сокращается. Вспышки насекомых-вредителей также часто имеют причиной сокращение ареала темнохвойных лесов при росте температуры, но при явном отсутствии аридизации на юге Приенисейской Сибири (Мониторинг..., 2008; Региональные ..., 2007).

Опыт информационного моделирования на базе связей зональных категорий покрова и отдельных формаций с климатическими параметрами тепло-, влагообеспеченности и степени континентальности (Биоразнообразие ..., 2006) показал, что за последние 60 лет отчетливо фиксируется тренд потепления и смещения в климатическом пространстве всех точек гидрометеостанций в областях подтайги и южной тайги на территории юга Приенисейской Сибири и более восточных регионов в сторону ослабления континентальности (Мониторинг ..., 2008; и др.). Соответственно, усиливаются позиции мелколиственных формаций в зональных классах подтайги и южной тайги на всем юге Средней Сибири. Эти процессы настолько явно выражены, что находят отражение в атласах (Атлас ..., 1973) и на картах¹ конца XX и начала XXI в. и в еще большей степени в данных учета лесного фонда СССР и России (Барталев и др., 2010; Исаев, Коровин, 2003; и др.).

В палеоэкологических работах показано, что смена темнохвойных (пихта, ель, кедр) и светлохвойных формаций (сосна, лиственница) в низкогорьях Приенисейской Сибири происходила

неоднократно в течение всего голоцена, но в последние столетия упрочилась тенденция к расширению позиций темнохвойных – пихты (*Abies sibirica*), кедра (*Pinus sibirica*), ели (*Picea obovata*), за счет сокращения ареала лиственницы (*Larix sibirica*) (Кошкарлова, Кошкарлов, 2021a). В современную климатическую эпоху граница светлохвойной подтайги и темнохвойной тайги в рассматриваемом регионе является ареной борьбы темнохвойных пород со светлохвойными и мелколиственными в довольно узком поле климатического пространства, определяемом континентальностью и увлажнением (гумидностью) климата (Андреева и др., 2006). Но при этом вмешательство человека и других факторов риска (рубки, пожары, нашествия вредителей и патогенов, ветровалы и др.) может изменить эволюционный ход климатогенной сукцессии, что уже и происходит в реальном времени и пространстве: темнохвойные леса отступают в долины и выше в горы. Из этого следует, что для прогноза будущего состава и структуры темнохвойных лесов необходимы не только связи с макроклиматом (зональными параметрами климата тайги, подтайги, степей и т.д.), но обширная многоплановая (междисциплинарная) база данных, включающая историю (палеогеографию), биоразнообразие сообществ и видов, разномасштабные картографические материалы за разные годы, ГИС, ДДЗ и многие другие сведения. Важен весь объем информации о лесных экосистемах, их структуре, составе пород-лесообразователях, взаимосвязях и конкурентных взаимоотношениях. Актуальными задачами в отсутствие точных данных по современной растительности и будущему климату остаются вероятностные оценки трансформации темнохвойных экосистем и их географического распространения с привлечением экспертов – лесоводов, географов и экологов к обсуждению прогноза лесов будущего.

Цель данной работы – представить общую концепцию прогноза климата и динамики горных темнохвойных лесов и результаты исследований с использованием регионального прогноза для планирования лесопользования на ближайшие десятилетия в контексте климатических изменений. Основной задачей была характеристика пространственно-временных изменений, наблюдаемых в составе и структуре темнохвойных экосистем на разных уровнях генерализации – от зонального (высотно-поясного в горах) до локального в разных регионах юга Приенисейской Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение пространственно-временной динамики горных темнохвойных лесов на юге Приенисейской Сибири проводилось на разных уровнях

¹ Карта хвойных лесов России. 2015. <https://geographyofrus-sia.com/wp-content/uploads/2015/01/366-367>.

организации растительного покрова: субконтинентальном (секторно-зональном) – рассматривается горный юг Сибири; на региональном уровне высотных поясов (территорий Саяно-Шушенского биосферного заповедника, Танзыбейского ключевого участка, национального парка Столбы) и локальном уровне – по материалам долговременных стационарных наблюдений на постоянных пробных площадях.

Для регионального прогноза состава горных лесов на юге Приенисейской Сибири значение имеет история формирования лесного покрова, открывающая возможности оценки устойчивости формаций при изменениях климата в голоцене. Для оценки многовековой динамики были применены методы палеогеографии: палеокарпологии, палинологии, геохронологии (Кошкарлов и др., 2021). Темнохвойные леса наиболее изучены в типологическом и экологическом плане (Кедровые ..., 1985; Поликарпов и др., 1986; Типы ..., 1980), и это делает возможным прогноз устойчивости их позиций на фоне меняющегося климата. Его ключевыми параметрами являются три – **тепло** (энергообеспеченность), **относительное увлажнение** (влагообеспеченность или гумидность) и их сезонный многолетний режим, оцененный с использованием коэффициента **континентальности** (Назимова и др., 1981; Назимова, 1998). Эти параметры были использованы нами при биоклиматическом моделировании для построения вероятностных моделей состава хвойных лесообразователей зональных категорий лесного покрова юга Сибири на основе информационной системы “Биом”, созданной в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (Андреева и др., 2006; Nazimova et al., 2010; и др.). Ее структура включает в себя параметры климата, растительности, почв, экологические параметры основных лесообразующих видов России, в том числе всех хвойных пород, с количественной и качественной оценкой их устойчивости к основным лимитирующим факторам среды и изменениям климата. Важный блок в информационной системе “Биом” составляют данные дистанционного зондирования, благодаря которым была собрана актуальная информация о состоянии, пространственной структуре и динамике горных лесов на юге Приенисейской Сибири в 2000–2020 гг. (Пономарев и др., 2019). Она оказалась востребованной при обосновании высотно-поясных комплексов типов леса как необходимых единиц классификации горных лесных экосистем, обладающих не только особенностями типологического состава, но и разными экологическими функциями (Назимова и др., 2020).

На локальном уровне, на стационарных объектах – постоянных пробных площадях, начиная с 60-х годов XX в. проводились лесоводственные и геоботанические исследования лесных биогеоценозов по общей методике В.Н. Сукачева и

С.В. Зонна (1961). Оценивались вертикальная и горизонтальная неоднородность фитоценотической структуры методами картирования и профилирования, состояние естественного возобновления. Для характеристики динамики структуры видового разнообразия оценивались соотношения обилия видов эколого-ценотических групп (ЭЦГ) (Молокова, 1992; Назимова и др., 2012).

С целью выявления закономерностей структуры растительности и особенностей ее пространственного распределения и динамики созданы геоинформационные системы (ГИС) для территорий “Саяно-Шушенского биосферного заповедника”, Танзыбейского ключевого участка, национального парка “Столбы”. Для создания ГИС использованы программные пакеты ESRI ArcGIS, MapInfo, EasyTrace. Проведен геоинформационный анализ с помощью графического оверлея в ГИС и получены серии карт (Гостева, 2010; Рыжкова и др., 2021; Egunova et al., 2006). Геоинформационные модели трех ключевых территорий отражают особенности горного ландшафта, закономерную смену высотных поясов, характеристик климата, почв и растительного покрова горной территории. Каждый высотный пояс может быть представлен несколькими вариантами – высотно-поясными комплексами, которые отличаются своим качественным составом типов леса, групп типов леса и серий типов леса. Серии идентифицируют сходные типы лесорастительных условий при возможных различиях в составе эдификаторного яруса. Данная система единиц (высотно-поясной комплекс–формация–группа–тип леса или серия типов леса), реализована в ГИС в виде различных карт среднего масштаба (от 1 : 50000 и мельче). Она связана с количественными характеристиками природных комплексов на уровне выделов, и, по сути, представляет универсальную эколого-географическую основу для прогнозного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для концепции прогноза представляется важным рассмотреть весь климатический ареал видов-лесообразователей юга Сибири. С использованием АИС “Биом” и информационного моделирования (Биоразнообразие ..., 2006) на субконтинентальном уровне была показана определяющая роль не только параметров тепло- и влагообеспеченности, но и степени континентальности климата в распространении видов-лесообразователей (Андреева и др., 2006; Назимова, 1998; Ecosystems ..., 2005; и др.). По итогам анализа для хвойных лесообразователей Сибири выявлена следующая закономерность: участие темнохвойных пород уменьшается с нарастанием континентальности. Индекс континентальности *Icont* (по Конраду) на территории Сибири колеблется от 50 до 98 на рав-

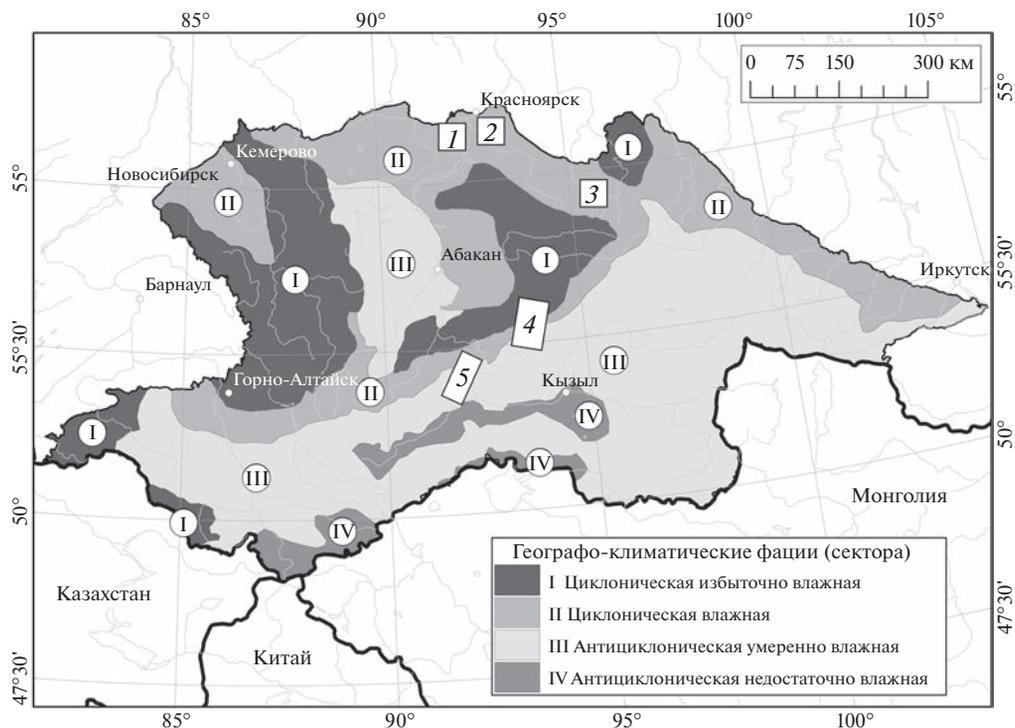


Рис. 1. Ключевые территории на картосхеме географо-климатических фаций Алтае-Саянского экорегиона (Российская часть): 1 – Дивногорский, 2 – Столбы, 3 – Идарское Белогорье, 4 – Танзыбей (Ермаковский), 5 – Саяно-Шушенский. Географо-климатические фации горных лесов: I – циклоническая избыточно влажная (пергумидная) умеренно-континентальная с доминированием темнохвойных (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*) травяных и крупнотравно-папоротниковых лесов; II – циклоническая влажная (гумидная) континентальная с доминированием темнохвойных (*Pinus sibirica*, *Abies sibirica*) кустарничково-зеленомошных лесов; III – антициклоническая умеренно влажная (семигумидная) резко континентальная, с доминированием светлохвойных *Larix sibirica* разнотравных и кустарничковых лесов и лесостепи; IV – антициклоническая умеренно сухая (семиаридная) крайне континентальная с доминированием степей с редуцированными высокогорными лиственничниками (*Larix sibirica*). Авторы-составители карты: Д.И. Назимова, О.В. Дробушевская, Д.М. Исмаилова, Е.И. Пономарев.

нинах и от 35 до 100 в горах. В интервале I_{cont} 46–67 встречаются все хвойные и мелколиственные породы. Когда I_{cont} увеличивается, первыми исчезают пихта и кедр, затем – ель. Когда значения I_{cont} превышают 74, темнохвойные виды исчезают из состава доминантов. Затем сходят на нет как главные породы береза и сосна; границы индекса континентальности для них составляют 74–81 и 81–88 соответственно. Наиболее устойчивой к резко континентальному климату является лиственница (*Larix sibirica*, *L. gmelini*), которая может доминировать почти во всем диапазоне I_{cont} , от 60 до 95–100. В тувинской части Приенисейских Саян максимальная континентальность отмечается в безлесных котловинах, а минимальная – в верхнем лесном поясе гор, в котором господствуют кедр и лиственница, пихта практически отсутствует, а ель, требовательная к почвенной влажности, тяготеет к долинам, но нередко доходит до верхней границы леса.

Континентальный режим в Приенисейской Сибири определяет собой и годовой ход температур, и влажности, и облачность, и гидротермиче-

ские особенности высотных поясов. Поэтому при классификации высотно-поясных комплексов и их спектров он включен в название биоклиматических секторов и географо-климатических фаций горных лесов (рис. 1).

Горные профили (полигон-трансекты в районах исследований 1–5, см. рис. 1) репрезентативно отражают особенности соответствующих высотных поясов, формационный и типологический состав их высотно-поясного комплекса и приуроченность к мезорельефу.

Региональные базы данных, созданные при участии авторов, пополняются и расширяются, за счет новых данных (дешифрованных космоснимков разного масштаба, в том числе *Landsat*, *Sentinel*, *Modis*) и текущих метеоданных. Ниже нами приведено сравнение климатических показателей за последние 60–70 лет, для двух гидрометеостанций в Приенисейской Сибири (рис. 2а и б). Они интересны тем, что показывают волнообразный ход параметров тепла и увлажнения, с очень незначительным долговременным трендом потепления (на ГМС Оленья речка). За последние

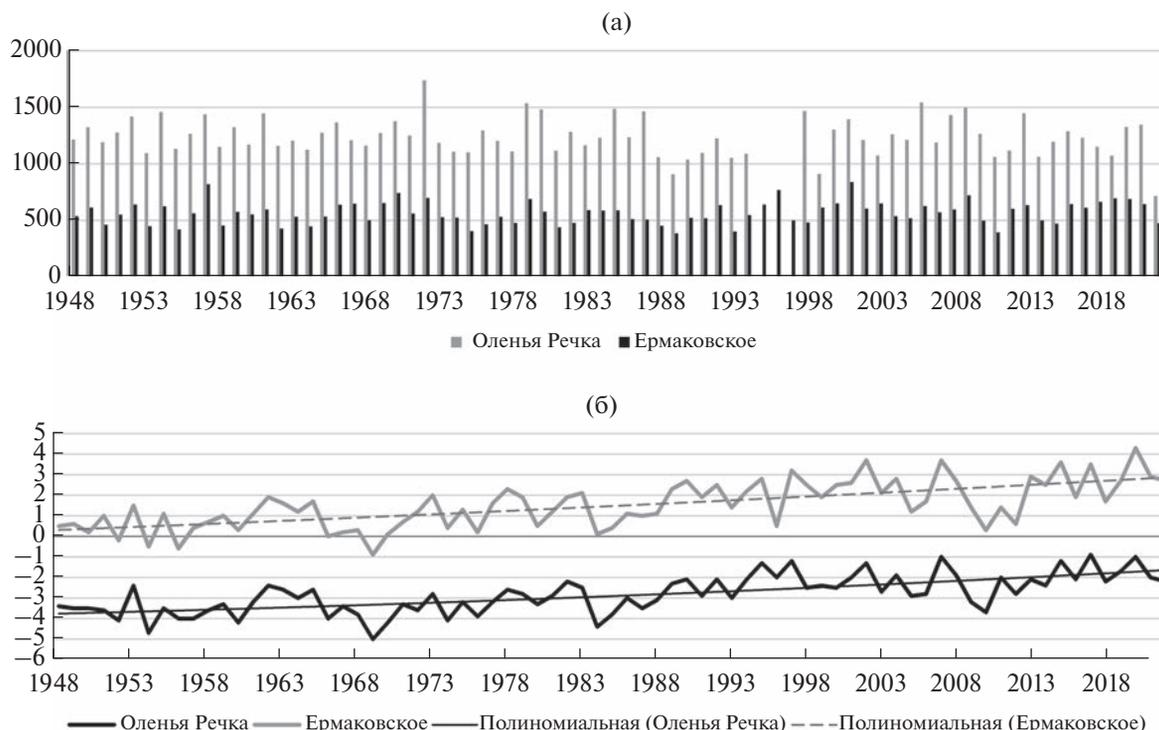


Рис. 2. Сравнение хода климатических показателей за 1948–2022 гг. в разных высотных поясах Западного Саяна на горном профиле по данным метеостанций Ермаковское (низкогорье, подтайга, 370 м над ур. м.) и Оленья Речка (субальпийское высокогорье, 1400 м над ур. м.): (а) среднегодовые суммы осадков и (б) среднегодовая температура воздуха.

74 года (с 1948 по 2022 г.) годовая сумма осадков по данным метеостанции Ермаковское уменьшилась на 80 мм, а по данным ГМС Оленья речка увеличилась на 65 мм; средняя годовая температура повысилась на 2.5°C по данным метеостанции Ермаковское и на 2°C по данным метеостанции Оленья речка. Сравнивая данные гидрометеостанций Ермаковское и Оленья Речка, можно убедиться в синхронном ходе разногодичной динамики температур на всем северном макросклоне Западного Саяна. Варьирование осадков по годам довольно велико, но без явного тренда в ту или иную сторону. Отсутствие аридизации в регионе подтверждается и другими исследованиями (IPCC ..., 2022; Tchebakova et al., 2022).

Еще более точные данные за разные годы наблюдений по высотным поясам получены при стационарных исследованиях за климатом и фенологией (Молокова, 1992 и др.). Продолжать это направление исследований на современном этапе можно уже с использованием базы данных со спутников *Terra Modis* и других, постоянно пополняемой для Ермаковского лесничества (Исмаилова и др., 2011; Кошкарлов и др., 2021; Степанов, 2016). Кроме того, повышение температуры и изменения, вызванные потеплением в горах Приенисейской Сибири происходят быстрее, чем прогнозировалось. Ответные реакции горных

темнохвойных лесов могут оказаться многовариантными, в отличие от классических моделей (Shugart et al., 1992), основанных на вековой динамике леса.

Примером многовековой трансформации лесных экосистем при воздействии природно-климатических факторов служит национальный парк «Столбы». Реконструкция динамики лесных формаций на его территории в позднем голоцене на основе комплексного анализа палеоботанических данных (макроостатки, спорово-пыльцевые комплексы) и датирования по ^{14}C позволило определить структуру доминирующих типов зональной растительности и установить временные рамки их существования на разном гипсометрическом уровне (табл. 1). В интервале 3700–2500 л. н. на большей части территории была развита лесостепь при сумме активных температур $>10^\circ\text{C}$ 1900°C (современное – 1500°C). Наступившее 2500–2000 л. н. похолодание (сумма активных температур $>10^\circ\text{C}$ – 1200°C) обусловило расширение таежных формаций: пихтово-елово-кедровых на восточных подветренных склонах. Дальнейшее потепление климата (сумма активных температур $>10^\circ\text{C}$ – 1700°C) способствовало широкому развитию подтаежного мелколиственно-светлохвойного комплекса, просуществовавшего с 2000 до 1000 л. н. Очевидно, климатический ре-

Таблица 1. Динамика пространственно-временной структуры позднеголоценовых лесных формаций национального парка “Столбы” за последние 3700 лет

Временные периоды позднего голоцена, л. н.	Время, датированное по ^{14}C , л. н.	Западная часть		Восточная часть	
		Высота, м над ур. м.			
		200	400	400	600
Совр.—250		Лиственнично-березовая остепненная разнотравная	Елово-березовая с сосной разнотравная	Сосново-лиственничная с березой разнотравная	Елово-пихтовая с кедром, березой мелкотравная
250—500	250 ± 40	Березово-лиственничная с сосной разнотравная	Елово-березовая мелкотравная	Березово-лиственничная мелко-травно-осоковая	Кедрово-пихтовая мелкотравная
500—600	480 ± 40	Березово-сосновая остепненно-разнотравная	Подтаежная осиново-березовая с пихтой разнотравная	Березово-сосновая кустарничково-разнотравная	Пихтово-еловая с кедром разнотравная
600—800	650 ± 50	Подтаежная сосново-березовая разнотравная	Подтаежная березово-лиственничная высокотравная	Лиственнично-сосновая с елью разнотравно-кустарничковая	Кедрово-елово-пихтовая разнотравная
800—1000	825 ± 60	Березово-лиственничная с малиной разнотравная	Лиственнично-березовая разнотравно-василисниковая	Сосново-лиственничная кустарничково-моховая	Пихтово-елово-кедровая с осинкой мелкотравно-зеленомошная
1000—2000	1035 ± 80	Лиственнично-березовая остепненно-разнотравная	Осиново-березовая с елью разреженная крупнотравная	Сосново-лиственничная остепненно-разнотравная	Пихтовая с осинкой, кедром папоротниково-крупнотравная
2000—2500	—	Горнотаежная березово-сосново-лиственничная кустарничково-разнотравная	Горнотаежная елово-березово-лиственничная разнотравно-кустарничковая	Елово-пихтово-лиственничная с сосной, березой кустарничково-разнотравная	Кедрово-лиственничная и пихтово-кедровая кустарничково-моховая
2500—3300	2900 ± 45	Лесостепь березово-лиственничная разнотравная	Подтаежная сосново-березовая разнотравная	Подтаежная сосново-лиственничная с березой, елью разнотравная	Сосновая с елью, пихтой разнотравная
3300—3700	3240 ± 90	Лесостепь лиственнично-березовая разнотравно-попынная	Подтаежная березово-сосновая высокотравная	Лесостепная сосново-лиственничная с березой попынно-разнотравная	Подтаежная лиственнично-сосновая с кедром, пихтой высокотравная

жим того времени был оптимальным для устойчивого сохранения светлохвойной подтайги и для трансформации части таежной темнохвойной растительности в подтаежный комплекс. Затем фиксируемые короткопериодные похолодания, начиная с 800 л. н., которые можно сопоставить с “малым ледниковым периодом”, способствовали постепенному усилению позиций светлохвойных — лиственницы и сосны в низкогорном (подтаеж-

ном) поясе, при сохранении темнохвойных видов в среднегорьях (600 м над ур. м.). Формирование устойчивого подтаежного комплекса на переходе между южной тайгой и лесостепью во второй половине голоцена обусловлено в первую очередь циклическими колебаниями климата. Тенденция расширения темнохвойных (пихты) за счет светлохвойных (лиственницы) возникла около 1000 л. н., что сохраняется до настоящего времени.

В целом палеоклиматический анализ бореальной зоны Сибири (Кошкарлов, Кошкарлова, 2021) указывает на то, что потепление XX в., вероятно, было самым значительным за последние 1000 лет.

Современная ландшафтно-лесотипологическая карта национального парка “Столбы” (2007 г.) составлена по результатам обследований нескольких туров лесоустройства на основе ГИС. Она свидетельствует о длительном беспожарном развитии лесного покрова на основной территории, хотя регулярные весенние палы на крутых световых склонах не исключены и в наше время. По результатам учета лесов при лесоустройстве 1948, 1977 и 2006 гг. доля лесов из лиственницы сократилась как в низкогорной подтайге, где теперь абсолютно господствуют сосна и береза, так и в горной тайге на водоразделах, где доминируют пихта и ель и локально кедр. Зафиксировано общее снижение доли площади лиственничников с 10 до 6%. Маяки старых лиственниц (возрастом 300–500 лет) говорят о том, что еще не так давно (2–3 века назад) здесь господствовала лиственница. Возраст основного полога древостоя из пихты и березы, возникшего после пожара, составляет 80–120 лет.

В последние десятилетия активизировались темнохвойные – особенно пихта, и это согласуется с текущей фазой потепления климата, начавшейся с конца XIX в., с 1890-х годов. На фоне этого периода потепления в Приенисейской Сибири отмечаются более короткие **фазы колебания увлажнения**, даже засушливости, и одновременно периоды повышенной горимости лесов (Пономарев, 2019). Это наиболее опасные периоды для темнохвойных массивов, которые на огромных площадях уничтожаются верховыми пожарами, как, например, в 1925–30-х годах (Назимова и др., 2012; Fire ..., 1996). На смену им приходят смешанные молодняки (пихта, ель, сосна, береза) и мелколиственные насаждения. Для подроста пихты и кедра, появившихся в благоприятную фазу под пологом сосны и лиственных, повторные низовые пожары губительны, и это главный фактор, препятствующий распространению кедра и пихты в подтаежных лесах. Подтайга – зона риска для **кедра**, особенно чувствительного к огню в молодом возрасте, тогда как не менее чувствительная **пихта**, в отличие от кедра, способна обеспечивать обильное возобновление на гораздо большей территории. Поэтому она заселяет все пригодные для нее местообитания в подтайге гораздо быстрее, чем кедр.

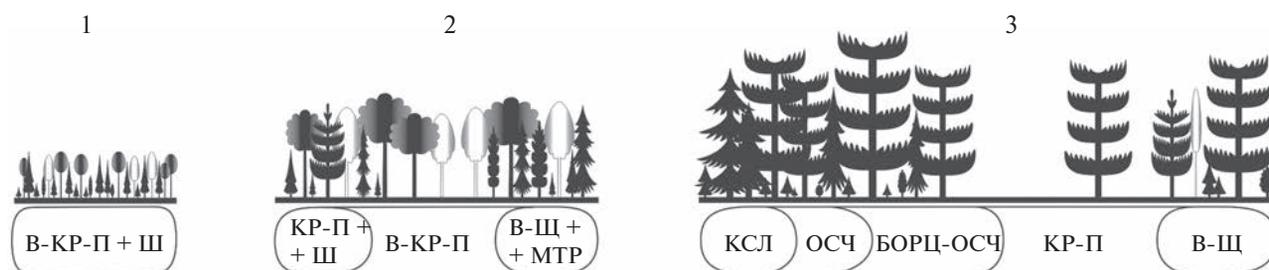
О ели можно кратко отметить следующее. **Ель** сибирская (*Picea obovata*) приурочена к условиям повышенного грунтового увлажнения – к долинам и вогнутым склонам, поэтому ей в наименьшей степени угрожают засухи. Но пожары, вызванные человеком (охотниками, рыбаками, ту-

ристами), нередко случаются в весенне-летний сезон именно по долинам и прилегающим склонам и приводят к частым сменам ельников производными смешанными формациями с темнохвойными, березой, осинкой, ивой.

Исходя из сказанного, следует предположить, что, **климатические и почвенные факторы увлажнения**, их сезонный ход играют, и будут играть самую важную роль для сохранения позиций темнохвойных пород лесообразователей на юге Приенисейской Сибири в перспективе ближайших и будущих десятилетий. Влияние температурных факторов, очевидно, нет смысла рассматривать обособленно, без учета соотношения с влажностью воздуха.

Пожары и рубки как факторы риска для темнохвойных лесов. В отличие от *низовых пожаров*, повреждающих молодые поколения темнохвойных, *верховые пожары* ведут к радикальным сменам зрелых и производных типов леса, когда надземная часть полностью уничтожена, а частично уцелевшая подземная часть продолжает существовать по инерции долгое время (десятилетия) и оказывать свое воздействие на вновь формирующийся биогеоценоз. Дальнейшую сукцессию определяет наличие источников семян в окружении и характер нижних ярусов (травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый покров). Кедр значительно медленнее, чем пихта и ель, может распространяться на далекие расстояния (лишь кедровка, способная разносить семена кедра в радиусе до 10 км и более, не оценима как важнейший биоценотический фактор в поддержании устойчивости кедра и расширении его ареала) (Кедровые ..., 1986). Поэтому мы не видим кедровников в зоне подтайги, вдали от темнохвойных массивов с кедром, тогда как ельники и пихтарники с елью обычно встречаются в подтайге в соответствующих местообитаниях с повышенным увлажнением почв.

Иная картина наблюдалась нами в 1950–80-х годах на нижней границе темнохвойных черневых кедрово-пихтовых лесов при сплошных рубках в травяных (крупнотравных, папоротниковых) группах типов леса на Танзыбейском ключевом участке (Ермаковское лесничество Красноярского края). *Черневой низкогорной пояс (350–850 м)* – это самая оптимальная полоса для произрастания пихты и кедра, представленная лишь в группе избыточно-влажных (пергумидных, по Холдриджу) районов Приенисейских Саян. Сумма активных температур (выше 10°C) достигает 1600°C, сумма осадков 800–1100 мм в год. Это климатический оптимум ареала кедра в Сибири. Однако здесь кедр подвергается самому большому риску по ряду причин. Вырубка лучших массивов кедровников в 1930-е–60-е годы привела к сокращению его ареала и смене кедрово-пихтовых массивов на длительно произ-



Виды	Онтогенетическое состояние				Виды	Онтогенетическое состояние			
	имматурное	виргинильное	молодое генеративное	зрелое генеративное		имматурное	виргинильное	молодое генеративное	зрелое генеративное
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.					<i>Pinus sibirica</i> Du Tour				
<i>Betula pendula</i> Roth					<i>Abies sibirica</i> Ledeb				
<i>Populus tremula</i> L.									

Рис. 3. Изменение вертикальной и горизонтальной структуры черневого кедровника после рубки в ходе восстановительно-возрастной динамики (1948–2018 гг.). Стадии: 1 – начальная смешанного леса, 2 – производный мелколиственно-темнохвойный лес, 3 – условно-коренной пихтово-кедровый лес. Синусии травяного яруса: В-КР-П + Ш – ветниково-крупнотравно-папоротниковая с широколиственным, В-Щ + МТР – ветниково-шитовниковая с мелколиственным, КСЛ – кисличная, ОСЧ – осочковая, БОРЦ-ОСЧ – борцово-осочковая, КР-П – крупнотравно-папоротниковая.

водные лиственные и пихтово-лиственные леса, в которых практически отсутствует возобновление кедр. Детальное картирование стационарных пробных площадей в масштабе 1 : 100 позволило изучить пространственно-временную структуру и динамику лесных сообществ и процессы возобновления кедр на локальном уровне (рис. 3).

Продолжительность производной стадии может достигать 200 лет и более. Причина – разрастание крупнотравья, ветников, а в последующем – конкуренция с пихтой, заглушающей немногочисленный кедровый подрост, сохранившийся после рубок. Эти причины и последствия для кедр детально проанализированы специалистами, которыми предложены способы восстановления кедровников (Кедровые ..., 1986; Konovalova et al., 2018; Konovalova and Danilina, 2019).

Долговременные наблюдения, проводимые с 1960 г. на стационарных объектах Института леса СО РАН и в заповедниках юга Сибири, показывают, что темнохвойные леса реагируют на погодноклиматические флюктуации не столько изменением в составе древостоя, сколько изменением состава видов нижних ярусов под пологом [разрастаются виды таежного мелколиственного и мезофильных трав, мхов, активизируются процессы возобновления лиственных пород (осины, березы) и темнохвойных (пихты, ели) при отсутствии пожаров (Назимова и др., 2012; Danilina et al., 2021)]. Хотя такие смены маскируются из-за весенних и осенних пожаров, антропогенных воздействий и др., но на постоянных лесных участках мониторинга эти процессы зафиксированы в базах данных и ГИС Ермаковского стационара (Молокова, 1992; Danilina et al., 2021).

Геоинформационный анализ ключевых территорий “Танзыбейского” и “Саяно-Шушенского” (см. рис. 1) показал устойчивые позиции кедр – как основного эдификатора горной тайги в супергумидной и гумидной климатических фациях, где отмечается наивысшее разнообразие высотнопоясных комплексов (табл. 2) и типологического состава. Кедр, как главный лесообразователь и эдификатор, в горах Сибири выработал в ходе длительной эволюции высокую степень устойчивости к неблагоприятным факторам среды и может произрастать в широком диапазоне обеспеченности по теплу (от 350 до 1800°C и более сумм активных температур), на бедных и богатых почвах, на скалистых обнажениях и каменистых россыпях, но имеет ограниченный диапазон толерантности (терпимости) к засушливости климата.

Для прогноза устойчивости в меняющемся климате именно *относительному увлажнению*, а точнее, его недостатку, принадлежит ключевая роль как фактору риска. Этот параметр климата используется через показатель радиационного индекса сухости Будыко, либо коэффициент увлажнения Мезенцева, либо отношение потенциальной эвапотранспирации по Холдриджу (Поликарпов и др., 1986). Колебания температур даже в очень широком диапазоне их варьирования не представляют фактора риска для кедр, в отличие от пихты. Широкий потенциал естественной адаптации кедр в различных условиях подтвержден палеогеографическими и палеоэкологическими исследованиями в Приенисейской Сибири и Алтае-Саянском регионе (Кошкаров и др., 2021). Требуемость к влажности воздуха (радиационный

Таблица 2. Высотно-поясная дифференциация лесного покрова на горном юге Приенисейской Сибири (на примере ключевых территорий)

Ключевая территория (площадь, га)	Высотно-поясный комплекс
Танзыйский ключевой участок (373483)	1. Подтаежный (лиственнично-сосновые травяные леса) 2. Черневой (пихтово-осиновые с кедром крупнотравно-папоротниковые леса) 3. Горно-таежный (кедрово-пихтовые травяно-зеленомошные) 4. Подгольцово-субальпийский (кедровые редколесья в комплексе с крупнотравными субальпийскими лугами)
Национальный парк “Столбы” (47200)	1. Лесостепной (фрагменты кустарничково-разнотравных сосняков в сочетании со степями) 2. Подтаежный (светлохвойные лиственнично-березово-сосновые травяные леса) 3. Горно-таежный (темнохвойная пихтовая с елью и кедром травяно-зеленомошная тайга)
Саяно-Шушенский биосферный заповедник (390368)	1. Подтаежно-лесостепной (лиственничные, сосновые и мелколиственные леса разнотравные и кустарничковые в сочетании с фрагментами дерновинно-злаковых степей) 2. Светлохвойно-таежный (лиственничные кустарничково-зеленомошные леса) 3. Темнохвойно-таежный (кедровые и лиственнично-кедровые кустарничково-зеленомошная и багульниково-моховая тайга) 4. Подгольцово-таежный (кедровая с лиственницей тайга бруснично-зеленомошная, багульниково- и осоково-моховая)

индекс сухости Будыко не более 0.65 в Приенисейской Сибири) сужает его ареал в горах. Важную роль в этом играют факторы межвидовой конкуренции (Konovalova and Sobachkin, 2020). Избыточное увлажнение почв, как и длительная сезонная мерзлота, также с трудом переносится кедром, поэтому класс бонитета в высокогорьях не выше IV–V.

Основной риск для сохранения кедра представляют пожары, более частые в умеренно-влажных районах Алтае-Саянского экорегиона (см. рис. 1). Но еще большую угрозу, чем стихийные факторы, составляет человек, способный нанести непоправимый ущерб природе, а следовательно, и будущим поколениям. На границе темнохвойных лесов с подтайгой темнохвойные виды имеют хорошие показатели роста и продуктивности (класс бонитета кедровников I–III), что позволяет восстанавливать их ареал. Поэтому при планировании лесопользования и лесоразведения следует тщательно подбирать условия для посадки, концентрироваться в местообитаниях, наиболее увлажненных и защищенных от источников огня. Как правило, естественные участки с кедром и другими темнохвойными породами сохраняются в таких сырых урочищах и создают главный источник семян. Далее отсюда они распространяются кедровкой и млекопитающими, поддерживая равновесие и устойчивость кедра в наименее горимых местообитаниях.

Обсуждая перспективы и ближайшие задачи многоцелевого лесопользования на горном юге Сибири, следует отметить, что в каждом горном лесничестве проявляется от 2–3 до 5 разных высот-

но-поясных комплексов (см. табл. 2) – вариантов высотных поясов. Они характеризуются своим лесорастительным потенциалом, продуктивностью, типологическими особенностями, средообразующими функциями, сезонным развитием, факторами риска при нарушениях. Все это говорит о необходимости их учета при ведении лесного хозяйства на конкретной территории, что потребует внесения изменений в действующие инструкции по инвентаризации и ведению хозяйства в горных лесничествах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования авторов на юге Приенисейской Сибири показали, что климатические изменения здесь, как и во всей Сибири происходили в виде волн потепления и похолодания, продолжительность которых имела разные временные масштабы – от сотен лет в голоцене, до десятилетий в последние века. Представленная авторами концепция прогноза состава лесов учитывает их прошлое, современное состояние, степень нарушенности пожарами и рубками, а также неоднозначный характер изменения климата в горных ландшафтах.

Пространственно-временные изменения темнохвойных экосистем в горах на юге Приенисейской Сибири закономерно связаны с изменениями климата. При потеплении и увлажнении климата происходила активизация темнохвойных, при похолодании, наоборот, усиление пожаров, отступление кедра и пихты в верхние пояса в горах, а ели – в долины. Каждый вид лесообразова-

теля обладал своей климатической нишей и стратегией поведения, которая позволяла ему сохраняться при всех изменениях климата. Кедр как главный доминант среди темнохвойных видов обладает наиболее широкой климатической нишей, поэтому формация кедровников в горах представлена наибольшим разнообразием типов леса по составу, структуре, биоразнообразию и продуктивности. Площади кедровников, как выяснилось при инвентаризации конца 1980–90-х годов, оказались преувеличенными в силу формальных правил отнесения к кедровникам всех смешанных насаждений, если доля участия кедра составляла по запасу 3 единицы и более. Это вызвало искаженное представление о широком распространении кедровников в низкогорьях и среднегорьях юга Сибири, которое сохраняется и сегодня. В высокогорьях пространственная структура кедровников разрежена и представлена низкопродуктивными редколесьями. Тем не менее их ценность состоит в ландшафтостабилизирующих, водорегулирующих и природоохранительных функциях.

Пространственно-временная динамика состава хвойных лесов при длительных многовековых циклах охарактеризована нами на *субконтинентальном уровне*. При менее длительных вековых циклах динамика лесов на *региональном уровне* подчинялась законам сукцессионной (восстановительной и возрастной динамики), когда смены стадий определялись внешними разрушительными факторами (пожары, ветровалы, рубки и др.). Но при этом природно-климатический потенциал оставался в пределах многолетней нормы. Эти смены коренных и производных формаций широко распространены, их связь с изменениями климата прослеживается не всегда, но существует объективно. На *локальном уровне* связь с погодно-климатическими изменениями установлена нами при стационарных наблюдениях на постоянных пробных площадях, при этом выявляется активизация одних групп видов и деградация других.

Пространственно-временная динамика лесных сообществ, таким образом, складывается процессами разного временного масштаба при меняющемся климате, как показано в разрабатываемых предложениях по концепции прогноза. В них экология и биология видов-лесообразователей играет важную роль. Ключевые параметры климата: теплообеспеченность, увлажнение и континентальность рассматриваются нами как системообразующие для высотно-поясных комплексов и их спектров в разных географо-климатических фациях гор юга Сибири. Еще один вход в систему климат-растительность образует региональный состав биоты, в первую очередь – состав жизненных форм растений верхних и нижних ярусов. Этот минимальный набор параметров и признаков сообществ достаточен для построения биоклиматических информационных моделей и свидетель-

ствует об иерархической системной организации лесного покрова в горах.

С учетом масштабов влияния антропогенного и природных факторов, проявляющихся в современных условиях в сравнительно короткие периоды времени, только комплексный, мультидисциплинарный подход к прогнозированию возможных смен в ближайшем будущем и планированию лесопользования имеет шанс быть принятым к использованию на практике. При этом в ходе научной экспертизы не следует исключать разные варианты прогноза и отказываться от вариантов, предлагаемых экспертами в области глобальных (макро-региональных) и более узких (региональных и локальных) прогнозов. Региональные прогнозы лучше раскрывают механизмы пространственно-временной динамики формационного и типологического состава лесных сообществ и экосистем. Они должны учитывать высотно-поясную структуру, проявляющуюся в каждом горном лесничестве как основные категории многоцелевого управления лесными территориями. Высотно-поясные комплексы являются основными категориями многоцелевого управления лесными территориями в горах Сибири.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИЛ СО РАН “Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири”, № 0287-2021-0009, а также гранта РФФИ № 18-05-00781А.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за совместную работу по созданию региональных ГИС сотрудникам Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, участникам гранта РФФИ № 18-05-00781А.

FUNDING

The work was carried out with the support of the basic project of the V.N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of RAS “Functional and dynamic indication of biodiversity of forests of Siberia,” no. 0287-2021-0009, as well as RFBR grant no. 18-05-00781A.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude for the joint work on the creation of regional GIS to the staff of the V.N. Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of RAS, participants of the RFBR grant no. 18-05-00781A.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ и прогноз изменений климата в российской части Алтае-Саянского экорегиона и на пригра-

- ничных территориях Казахстана и Монголии / отв. ред. О.Н. Липка. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2018. 289 с.
- Андреева Н.М., Назимова Д.И., Кофман Г.Б., Ноженкова Л.Ф., Поликарпов Н.П., Степанов Н.В.* Портретные модели структурного биоразнообразия лесного покрова // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Новосибирск, 2006. С. 517–536.
- Атлас лесов СССР. М.: ГУГК, 1973. 221 с.
- Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.Ф., Уваров И.А.* Карта растительного покрова России. М.: ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН, 2010.
- Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование / отв. ред. В.К. Шумный, Ю.И. Шокин, Н.А. Колчанов, А.М. Федотов. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. 678 с.
- Гостева А.А., Ерунова М.Г., Ильина А.П.* Векторизация плана лесоустройства заповедника “Столбы” 1948 года // Труды гос. заповедника “Столбы”. Красноярск, 2010. Вып. 19. С. 39–47.
- Данилина Д.М., Назимова Д.И., Гостева А.А., Степанов Н.В., Бабой С.Д.* Выявление потенциальных ареалов охраняемых видов растений на эколого-географической основе // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 42–51.
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1\(42-51\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(42-51))
- IPCC 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. <https://www.ipcc.ch/report/arg6/wg2/> (accessed 6.10.2023).
- Исаев А.С., Коровин Г.С.* Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // Лесоведение. 2003. № 3. С. 3–11.
- Исмаилова Д.М., Бабой С.Д., Гостева А.А., Назимова Д.И.* Применение ГИС для анализа связи лесной растительности с рельефом на примере барьерно-дождевых ландшафтов Западного Саяна // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 29–35.
- Кедровые леса Сибири / отв. ред. А.С. Исаев. Новосибирск: Наука, 1985. 258 с.
- Коновалова М.Е., Собачкин Д.С.* Ценопопуляционная структура ключевых видов в горно-таежных лесах Сибирской сосны Восточного Саяна // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 71–84.
- Кошкарлов А.Д., Кошкарлова В.Л.* Динамика лесных формаций заповедника “Столбы” в позднем голоцене и их пространственно-временное картографирование // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. XXXIX. № 5. С. 372–377.
- Кошкарлов А.Д., Кошкарлова В.Л., Назимова Д.И.* Многовековые климатические тренды трансформации кедровников в разных лесорастительных зонах гор Западного Саяна // Сибирский лесной журн. 2021. № 2. С. 3–16.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20210201>
- Липка О.Н., Корзунин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546.
<https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>
- Молокова Н.И.* Эколого-ценотический анализ и феноиндикация высотно-поясных комплексов типов леса. Дис. ... канд. биол. наук. Красноярск: изд. Ин-та Леса СО РАН, 1992. 515 с.
- Мониторинг биологического разнообразия лесов России. Методология и методы / отв. ред. А.С. Исаев. М.: Наука, 2008. 453 с.
- Назимова Д.И.* Секторно-зональные закономерности структуры лесного покрова (на примере гор Южной Сибири и бореальной Евразии). Дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск: изд. Ин-та Леса СО РАН, 1998. 50 с.
- Назимова Д.И., Молокова Н.И., Джансеитов К.К.* Высотная поясность и климат в горах Южной Сибири // География и природные ресурсы. 1981. № 2. С. 68–72.
- Назимова Д.И., Дробушевская О.В., Данилина Д.М., Коновалова М.Е., Кофман Г.Б., Бугаева К.С.* Биоразнообразие и динамика низкогорных лесов Саяна: региональный и локальный уровни // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. М.: ООО “Товарищество научных изданий КМК”, 2012. Т. 1. С. 131–172.
- 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.
<https://doi.org/10.31857/S0024114820010106>
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И.* Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 226 с.
- Пономарев Е.И., Харук В.И., Швецов Е.Г.* Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы. Красноярск: СФУ, 2019. 220 с.
- Развитие ландшафтов и климата Северной Евразии. Поздний плейстоцен – голоцен. Элементы прогноза / отв. ред. А.А. Величко. М.: ГЕОСБ, 2010. Вып. III. 220 с.
- Региональные проблемы экосистемного лесоводства / отв. ред. А.А. Онучин. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 329 с.
- Рыжкова В.А., Данилова И.В., Корец М.А., Назимова Д.И.* Картографирование горных экосистем на основе ГИС-технологий на примере Саяно-Шушенского биосферного заповедника: матер. междунаrod. научно-практ. конф. “Управление лесными экосистемами в условиях изменения климата” (7–9 сентября 2021 г.). Бишкек, 2021. С. 66–71.
- Степанов Н.В.* Сосудистые растения Приенисейских Саян. Красноярск: Изд. СФУ, 2016. 251 с.
- Сукачев В.Н., Зонн С.В.* Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.
- Типы лесов гор Южной Сибири / отв. ред. В.Н. Смагин. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- Danilina D.M., Nazimova D.I., Konovalova M.E.* Spatio-temporal structure and dynamics of the late succession stage of taiga cedar pine of the Western Sayan Mountains // Contemporary Problems of Ecology. 2021.

- Vol. 14. № 7. P. 750–759.
<https://doi.org/10.1134/S1995425521070064>
- Ecosystems of the World. Coniferous Forests. Chapter 2. Boreal Forest of Eurasia / F. Andersen (Ed.). Amsterdam—London—New York, 2005. P. 23–99.
- Erunova M.G., Sadovsky M.G., Gosteva A.A.* GIS-aided simulation of spatially distributed environmental processes at “Stolby” state reservation // *Ecol. Model.* 2006. Vol. 195. № 3–4. P. 296–306.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.11.037>
- Fire in ecosystems of Boreal Eurasia / J.G. Goldammer, V.V. Furyaev (Eds.) // *Forest Science.* 1996. Vol. 48. 328 p.
- Groisman P.A., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B.M., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.Ch., Korovin G.N., Meshcherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Chebakova N.M., Vygodskaya N.N.* Climate changes in Siberia // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences.* 2013. P. 57–109.
- IPCC 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis: contribution of working group I. Fourth Assessment Report.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.
- IPCC 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Sixth Assessment Report.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed 6.10.2023).
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S.* Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2020. № 30. P. 543–556.
<https://doi.org/10.1111/geb.13243>
- Konovalova M.E., Danilina D.M., Nazimova D.I.* Thinning-based formation of Siberian Pine forests in the dark chern zone of Western Sayan // *Contemporary Problems of Ecology.* 2018. Vol. 11. № 7. P. 779–788.
<https://doi.org/10.1134/S1995425518070065>
- Konovalova M.E., Danilina D.M.* Cenopopulation Structure of Key Species in Climax Siberian Pine Chern Forests of the Western Sayan Mountains // *Russian J. Ecology.* 2019. Vol. 50. № 3. P. 234–240.
<https://doi.org/10.1134/S1067413619030081>
- Nazimova D.I., Tsaregorodtsev V.G., Andreyeva N.M.* Forest vegetation zones of southern Siberia and current climate change // *Geography and Natural Resources.* 2010. Vol. 31. № 2. P. 124–131.
<https://doi.org/10.1016/j.gnr.2010.06.006>
- Shugart H.H., Leemans R., Bonan G.B.* *A Systems Analysis of the Global Boreal Forest.* Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1992. 565 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511565489>
- 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 // *Environmental Research Lett.* 2016. Vol. 11. № 3. 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.Y.* Droughts are not the likely primary cause for Abies sibirica and Pinus sibirica Forest Dieback in the South Siberian Mountains // *Forests.* 2022. Vol. 13. № 9. Art. 1378.
<https://doi.org/10.3390/f13091378>

The Spatio-Temporal Dynamics of Mountain Dark Coniferous Forests in the South of Priyenisei Siberia in the Climate Change

D. I. Nazimova^{1, *}, V. L. Koshkarova^{1, **}, D. M. Danilina^{1, *}, and M. E. Konovalova^{1, ****}**

¹*Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Sciences, Siberian Branch – Separate Division of FRC KSC SB RAS (IF SB RAS), Krasnoyarsk, Russia*

**e-mail: inpol@mail.ru*

***e-mail: koshkarova.vl@ksc.krasn.ru*

****e-mail: danilina.dm@ksc.krasn.ru*

*****e-mail: markonovalova@mail.ru*

Sustainable management of forest resources in mountainous areas requires the development of regional databases and a modern ecological and geographical basis for forecasting the near future of mountain forests. In the Priyenisei part of the Sayans, the authors carried out multidisciplinary studies on mountain profiles in various regions. Based on geoinformation systems for the three key mountain territories (Stolby, Sayano-Shushensky, Tanzybey) the series of landscape-typological maps with numerous parameters of basic climatic conditions (heat, moisture supply, degree of continentality, etc.) in each altitudinal belt were created. The conception and results of studies that have direct access to the regional forecast and forest management planning in the context of global climate changes is present. The concept of forest forecast, developed by the authors, leads to their past, modern state, the degree of damage caused by fires and cuttings, as well as to the ambiguous character of climate change in mountain landscapes. At this stage, the task includes the studying of space-temporal changes in dark coniferous ecosystems in the mountains of the Priyenisei Siberia. Materials of information systems of various scales were used from the AIS “Biom” for Siberia to regional geographic information systems of the Priyenisei Siberia. The databases include blocks of information on biodiversity, climate, stationary observations for a 60-year period, satellite images and cartographic materials of various scales, ecological characteristics of coniferous forest-forming species: Siberian pine, fir, spruce, Scotch pine, larch, and others. The methods of paleogeography, climatic ordination, information analysis, geoinforma-

tion-based mapping, and others were used. The most probable reaction of dark coniferous species, including Siberian pine, to the warming of the climate, predicted by climatic models, is shown. The measures are suggested to preserve valuable coniferous stands in the mountains and restoration of their areal.

Keywords: mountain dark coniferous forests, forest-forming species, space-temporal dynamics, climate-induced changes, regional prognoses, altitudinal belts, information systems, south of Priyenisei Siberia

REFERENCES

- Analiz i prognoz izmenenii klimata v rossiiskoi chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona i na prigranichnykh territoriyakh Kazakhstana i Mongolii* [Analysis and Forecast of Climate Change in the Russian Part of the Altai-Sayan Ecoregion and in the Border Areas of Kazakhstan and Mongolia]. Lipka O.N., Ed. Moscow: WWF, 2018. 289 p.
- Andreeva N.M., Nazimova D.I., Kofman G.B., Nozhenkova L.F., Polikarpov N.P., Stepanov N.V. Portrait models of structural biodiversity of forest cover. In *Bioraznoobrazie i dinamika ekosistem: informatsionnye tekhnologii i modelirovanie* [Biodiversity and Ecosystem Dynamics: Information Technologies and Modeling]. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, pp. 517–536. (In Russ.).
- Atlas lesov SSSR* [Atlas of Forests of the USSR]. Moscow: GUGK Publ., 1973. 221 p.
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.F., Uvarov I.A. *Karta rastitel'nogo pokrova Rossii* [Vegetation Map of Russia]. Moscow: IKI RAN; TSEPL RAN, 2010.
- Bioraznoobrazie i dinamika ekosistem: informatsionnye tekhnologii i modelirovanie* [Biodiversity and Ecosystem Dynamics: Information Technologies and Modeling]. Shumny V.K., Shokin Yu.I., Kolchanov N.A., Fedotov A.M., Eds. Novosibirsk: SO RAN Publ., 2006. 678 p.
- Boreal Forest of Eurasia*. In *Ecosystems of the World. Coniferous Forests*. Andersen F., Ed. Amsterdam, London, New York, 2005, pp. 23–99.
- Danilina D.M., Nazimova D.I., Gosteva A.A., Stepanov N.V., Baboy S.D. Identification of potential habitats of protected plant species on an ecological and geographical basis. *Geogr. Prirod. Resur.*, 2018, no. 1, pp. 42–51. (In Russ.).
- Danilina D.M., Nazimova D.I., Konovalova M.E. Spatio-temporal structure and dynamics of the late succession stage of taiga cedar pine of the Western Sayan Mountains. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2021, vol. 14, no. 7, pp. 750–759. <https://doi.org/10.1134/S1995425521070064>
- Erunova M.G., Sadovsky M.G., Gosteva A.A. GIS-aided simulation of spatially distributed environmental processes at “Stolby” state reservation. *Ecol. Model.*, 2006, vol. 195, no. 3–4, pp. 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.11.037>
- Fire in ecosystems of Boreal Eurasia*. Goldammer J.G., Furrayaev V.V., Eds. Forest Science, 1996.
- Gosteva A.A., Erunova M.G., Il'ina A.P. Vectorization of the forest management plan of the Stolby Nature Reserve in 1948. In *Trudy gosudarstvennogo zapovednika “Stolby”. Vyp. 19* [Working Papers of the Stolby Nature Reserve]. Krasnoyarsk, 2010, pp. 39–47. (In Russ.).
- Groisman P.A., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B.M., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.Ch., Korovin G.N., Meshcherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Chebakova N.M., Vygodskaya N.N. Climate changes in Siberia. In *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Groisman P.Ya., Gutman G., Eds. Dordrecht: Springer, 2013, pp. 57–109.
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The physical science basis: contribution of working group I. Fourth Assessment Report*. Cambridge: CUP, 2007.
- IPCC 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Sixth Assessment Report*. Cambridge: CUP, 2007. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed: 06.10.2023).
- Isaev A.S., Korovin G.S. Large-scale changes in Eurasian boreal forests and methods of their assessment using space information. *Lesoved.*, 2003, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.).
- Ismailova D.M., Baboi S.D., Gosteva A.A., Nazimova D.I. Application of GIS to analyze the relationship of forest vegetation with relief on the example of barrier-rain landscapes of Western Sayan. *Geoinform.*, 2011, no. 3, pp. 29–35. (In Russ.).
- Kedrovye lesa Sibiri* [Siberian Pine Forests of Siberia]. Isaev A.S., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985. 258 p.
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. Climate-driven conifer mortality in Siberia. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 2020, no. 30, pp. 543–556. <https://doi.org/10.1111/geb.13243>
- Konovalova M.E., Danilina D.M. Cenopopulation structure of key species in climax Siberian Pine forests of the Western Sayan Mountains. *Russ. J. Ecol.*, 2019, vol. 50, no. 3, pp. 234–240. <https://doi.org/10.1134/S1067413619030081>
- Konovalova M.E., Danilina D.M., Nazimova D.I. Thinning-based formation of Siberian Pine forests in the dark chern zone of Western Sayan. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2018, vol. 7, no. 11, pp. 779–788. <https://doi.org/10.1134/S1995425518070065>
- Konovalova M.E., Sobachkin D.S. Cenopopulation structure of the key species in Siberian Pine mountain-taiga forests of the East Sayan mountains. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ., Biol.*, 2020, no. 52, pp. 71–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/52/4>
- Koshkarov A.D., Koshkarova V.L. Dynamics of forest formations of the Stolby Nature Reserve in the Late Holocene and their spatial and temporal mapping. *Khvoyn. Borealn. Zony*, 2021, vol. 39, no. 5, pp. 372–377. (In Russ.).

- Koshkarov A.D., Koshkarova V.L., Nazimova D.I. Centuries-old climatic trends of transformation of cedar forests in different forest-growing zones of the Western Sayan mountains. *Sibir. Lesn. Zh.*, 2021, no. 2, pp. 3–16. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15372/SJFS20210201>
- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Yu., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. A role of forests in natural systems adaptation to climate change. *Lesoved.*, 2021, no. 5, pp. 531–546. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>
- Molokova N.I. Ecological-cenotic analysis and pheno-indication of altitude-belt complexes of forest types). *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forests, 1992. 515 p.
- Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii. Metodologiya i metody* [Monitoring of Biological Diversity of Russian Forests. Methodology and Methods]. Isaev A.S., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2008. 453 p.
- Nazimova D.I. Sector-zonal patterns of forest cover structure (on the example of the mountains of Southern Siberia and Boreal Eurasia). *Extended Abstract of Dr. Sci. (Biol.) Dissertation*. Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forests, 1998. 50 p.
- Nazimova D.I., Drobusheskaya O.V., Danilina D.M., Konovalova M.E., Kofman G.B., Bugaeva K.S. Biodiversity and dynamics of low-mountain forests of Sayan: regional and local levels. In *Raznoobraziye i dinamika lesnykh ekosistem Rossii. Tom 1* [Diversity and dynamics of forest ecosystems of Russia. Vol. 1]. Moscow: KMK Publ., 2012, pp. 131–172. (In Russ.).
- Nazimova D.I., Molokova N.I., Dzhanseitov K.K. Altitudinal zonation and climate in the mountains of Southern Siberia. *Geogr. Prirod. Resur.*, 1981, no. 2, pp. 68–72. (In Russ.).
- 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. *Lesoved.*, 2020, no. 1, pp. 3–16. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0024114820010106>
- Nazimova D.I., Tsaregorodtsev V.G., Andreyeva N.M. Forest vegetation zones of southern Siberia and current climate change. *Geogr. Nat. Res.*, 2010, vol. 31, no. 2, pp. 124–131.
<https://doi.org/10.1016/j.gnr.2010.06.006>
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I. *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* [The Climate and Mountain Forests of Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986. 226 p.
- Ponomarev E.I., Haruk V.I., Shvetsov E.G. *Monitoring prirodnikh pozharov v Sibiri: dinamika gorimosti v sovremenno klimata, prostranstvenno-vremennye zakonomernosti, kharakteristiki i prognozy* [Monitoring of Wildfires in Siberia: Dynamics of Burnability in the Modern Climate, Spatial and Temporal Patterns, Characteristics and Forecasts]. Krasnoyarsk: SFU Publ., 2019. 220 p.
- Razvitiye landshaftov i klimata Severnoi Evrazii. Pozdnii pleistotsen – golotsen. Elementy prognoza. Vyp. 3* [Evolution of Landscapes and Climates of the Northern Eurasia. Late Pleistocene – Holocene. Forecast Elements. Vol. 3]. Velichko A.A., Ed. Moscow: GEOS Publ., 2010. 220 p.
- Regional'nye problemy ekosistemnogo lesovodstva* [Sustainable Forest Management Challenges at a Regional Level]. Onuchin A.A., Ed. Krasnoyarsk: Inst. Lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN, 2007. 329 p.
- Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Korets M.A., Nazimova D.I. Mapping of mountain ecosystems based on GIS technologies on the example of the Sayano-Shushensk Biosphere Reserve. In *Materialy mezhdun. nauch.-prakt. konf. "Upravlenie lesnymi ekosistemami v usloviyakh izmeneniya klimata" (7–9 sentyabrya 2021 g.)* [Proc. of the Int. Sci.-Pract. Conf. "Management of Forest Ecosystems in the Context of Climate Change (September 7–9, 2021)"]. Bishkek, 2021, pp. 66–71. (In Russ.).
- Shugart H.H., Leemans R., Bonan G.B. *A Systems Analysis of the Global Boreal Forest*. Cambridge: CUP, 1992.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511565489>
- Stepanov N.V. *Sosudistye rasteniya Prieniseiskikh Sayan* [Vascular Plants of the Yenisei Sayans]. Krasnoyarsk: SFU Publ., 2016. 251 p.
- Sukachev V.N., Zonn S.V. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu tipov lesa* [Methodological Guidelines for the Study of Forest Types]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961. 144 p.
- 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.*, 2016, vol. 11, no. 3, article 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.Y. 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. 9, article 1378.
<https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* [Types of Forests of the Mountains of Southern Siberia]. Smagin V.N., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 336 p.