

ТУНДРА И ЛЕС РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ: ВЕКТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

А. А. Тишков, Е. А. Белоновская, П. М. Глазов, А. Н. Кренке, А. Ю. Пузаченко,
Г. М. Тертицкий, С. В. Титова
ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2020 г.

Методами дистанционного анализа и наземной верификации изучена современная динамика леса в Арктической зоне Российской Федерации. Выявлены три варианта продвижения леса в тундру: восстановление на месте ранее уничтоженного древостоя, семенное возобновление в тундре, «наступление» от стенки леса при краткосрочном потеплении. Характерное время появления «зонального леса» в полосе контакта составляет не менее 200–400 лет и равно его сукцессионному циклу. Прослежены особенности этих процессов в регионах: вдоль речных долин на север, из долин на водораздел, а на водоразделах — от границ островов леса. Определены масштабы и интенсивность движения верхней границы леса (ВГЛ) в горных регионах АЗРФ. В XX — начале XXI в. выявляются два-три цикла облесения оро-тундровых поясов, а ВГЛ поднялась на 15–50 м. На основе зоогеографического районирования и сопоставления зональной фауны млекопитающих и птиц тундр, лесотундры и северной тайги подтверждено отнесение лесотундры к северо-таежному фаунистическому комплексу. Сделан вывод, что при сохранении среднесрочной цикличности климата в Арктике (около 60 лет) современное потепление не способно «двигать» зональные границы леса, а может только поддерживать полосу его контакта с тундрой в перманентном динамическом состоянии. Изменения границ возможны только при сохранении тренда климата не менее 100–200 лет.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, потепление климата, полоса контакта леса и тундры, вертикальная граница леса, биогеографический и сукцессионный статус, фауна млекопитающих и птиц, зоогеографическое районирование.

Введение

В условиях современного потепления Арктики внимание исследователей приковано к динамике северной границы леса, которая представляет плавный переход к тундровой зоне и проводится с большой долей условности. Так же определяется и граница лесотундры. Климатогенная трансформация зонального градиента происходит постепенно — от более или менее сомкнутой северной тайги до редколесий, групп и отдельно стоящих деревьев в тундре. Известно, что дальше всего «сомкнутые леса» заходят в тундру по долинам рек, а островки леса встречаются также по прогреваемым формам рельефа.

О каком биогеографическом явлении идет речь, когда обсуждается проблема изменений климата и северной границы леса в Евразии? В биогеографии есть представление о термо-поясных границах ареалов биоты, совпадающих с геофизическими и биофизическими градиентами среды. Благодаря «резкой» смене условий в этой полосе возникает сгущение границ ареалов растений и животных (так называемые симператы), которые и становятся значимыми в биотической дифференциации. Их статус повышается, если граница соответствует высокому таксону систематической группы биоты — семейству, отряду, порядку и др. Этот рубеж (северный предел леса) в Евразии среди животных формируют амфибии (*Amphibia*), рептилии (*Reptilia*), из млекопитающих — рукокрылые (*Chiroptera*), а среди растений древесные — хвойные (*Pinóphyta*), семейство

Pinaceae с родами *Picea*, *Pinus*, *Larix*. Обсуждение динамики границы леса можно вести с позиций ключевого биогеографического рубежа между циркумарктическим и циркумбореальным биорегионами. Его возникновение объяснимо наличием лимитирующих распространение деревьев факторов. Но надо учитывать, что (1) средообразующая роль биоты «смягчает» условия роста деревьев в тундре, (2) а на границе действует «правило предварения» и внутриландшафтной дифференциации, при которой лес и тундра занимают наиболее attractive для них места и «конкурируют» за них.

Поэтому для объяснения природы «зоны контакта» леса и тундры возникает много понятий. Первое — переходная полоса между лесными и безлесными пространствами (не линия, а именно полоса). Второе — собственно граница леса как предел непрерывных лесов. Третье — это самые северные точки распространения прямостоячих отдельно стоящих деревьев при сохранении под их пологом настоящей тундры.

Выявляемый биогеографический рубеж «тундра-лес» в Евразии, несмотря на физиономически и функционально близкий характер, вдоль всей полосы имеет разный климатический, историко-биогеографический, мерзлотный и почвенный фон. Он сформирован разными породами. Хвойные — это только детерминант границы, в ее сложении участвуют десятки видов деревьев. В атлантическом секторе, наиболее пострадавшем от рубок, пожаров и выпаса оленей, — береза Черепанова (*Betula pubescens ssp. czerepanovii*), ель европейская (*Picea abies*) и ее гибриды (*P. abies* × *P. obovata*), на Кольском полуострове — сосна (*Pinus sylvestris*) и осина (*Populus tremula*). На равнинах Европейской России, Полярном Урале и в Западной Сибири — ель сибирская (*P. obovata*) и лиственница сибирская (*Larix sibirica*), далее на востоке — лиственница даурская (*L. dahurica*, = *L. gmelinii* var. *gmelinii*, *L. cajanderi*). В горах — кедровый стланик (*Pinus pumila*) и ольховник (*Duschekia fruticosa*), а по долинам — чозения (*Chosenia arbutifolia*) и тополя душистый и бальзамический (*Populus suaveolens*, *P. balsamifera*). На всем протяжении границы леса в Евразии она повторяет береговую линию Северного Ледовитого океана, приближаясь к ней по долинам рек почти вплотную, как это наблюдается на реках Печора, Море-Ю, Колыма и др.

В настоящей статье в развитие идей оценки климатогенной динамики границы леса как пульсирующего процесса и одного из проявлений «позеленения» Арктики обсуждаются результаты анализа общих и региональных особенностей современной реакции биоты на потепление климата в полосе контакта леса и тундры.

Материалы и методы

В начале XXI в. исследования взаимодействия леса и тундры в Евразии получили новый импульс, особенно в период Международного полярного года,

когда стартовал проект «PPS Arctic — BENEFITS»¹. В российской Арктике он охватывал Кольский полуостров, Полярный Урал, полуостров Таймыр. В его основе были методы анализа космической информации (QuickBird, Terra/ASTER, Landsat и др.), позволяющие оценивать динамику северной границы леса [1; 2].

Для анализа динамики границы леса использовались данные «Global Land Analysis & Discovery group»² с 2000 г., полученные со спутников Landsat-5, разрешение 30×30 м. Для анализа изменений использовались данные за предыдущие и последующие годы с шагом пять лет.

В анализе изменений леса на основе выявления пространственных инвариант использовались иерархический факторный анализ и сегментация полученных переменных с целью выделения устойчивых состояний ландшафтов на определенных отрезках времени и сравнения этих состояний за все время наблюдения (в нашем случае — с конца 1980-х годов по 2019 г.). Этот метод, разработанный одним из авторов статьи (А. Н. Кренке), позволяет осуществлять прямые сравнения спутниковых данных Landsat 5 и Landsat 8 и детально анализировать изменения ландшафта на всю глубину архивных данных мультиспектральной съемки. Два полученных набора инвариант для модельных территорий на Кольском полуострове и в низовьях Надыма использовались как обучающие выборки, по которым проводилась интерполяция данных (анализ динамики полноты леса по изменению его площади в каждом пикселе). Мы использовали «High-Resolution Global Maps of 21st-century Forest Cover Change» (2013 г.)³.

Анализ динамики верхней границы леса в субарктических низкогорьях проводился на основе архивов снимков GoogleEarthPro. Сравнивались сцены разных лет с 1984 по 2018 гг. с периодичностью в пять лет. Для экспресс-анализа на каждой модельной территории экспертно выбирался склон южной и/или северной экспозиции и проводилась фиксация высоты верхней границы леса (ВГЛ) по переходу от зеленых к серым или бурым цветам.

В сравнительном анализе фауны млекопитающих и птиц в полосе перехода от леса к тундре в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) использовались базы данных лаборатории биогеографии Института географии РАН, а также цифровые ареалы млекопитающих «Digital Distribution Maps on The IUCN Red List of Threatened Species» v. 6.2⁴ и материалы собственных исследований (Г. М. Тертицкий) на севере Западной Сибири, а для оценки соответствия границ распространения фауны и зональной растительности — «GlobCover 2009 land

¹ <http://ppsarctic.nina.no/>.

² <https://glad.umd.edu/>.

³ <https://science.sciencemag.org/content/342/6160/850.full>.

⁴ <https://www.iucnredlist.org>.

cover map (ESA 2010 and UCLouvain)». Для анализа проведено районирование севера Евразии по составу «локальных фаун» — видов на площади 22 500 км² (квадрат со стороной 150 км). Анализ включал: определение состава локальных фаун, расчет матрицы из коэффициентов сходства (метрика Жаккара) между всеми парами локальных фаун, построение многомерной модели, описывающей состав локальных фаун в пределах севера Евразии, классификацию «локальных фаун» на основе переменных этой модели и выделение «биорегионов», наложение участков зоогеографического районирования на карту распределения растительного покрова «GlobCover 2009» для определения соответствия между ними и типом растительного покрова. Далее проведено сравнение списков видов наземных млекопитающих для тундр, северной тайги и лесотундры.

Результаты и их обсуждение

Климатогенная динамика северной границы леса и ее биогеографический статус. Наши попытки разработать унифицированный подход к учету сукцессионной динамики лесной растительности на северном пределе [3] не увенчались успехом потому, что мы столкнулись как минимум с тремя взглядами на природу переходной полосы от леса к тундре. Первый — это оригинальное биогеографическое и зональное явление, имеющее относительно постоянный ареал, часто выделяемый как зона/подзона или биом лесотундры. Климатические внутривековые циклы, свойственные Арктике (около 60 лет), не способны из-за малого «характерного времени» превратить его в лес или тундру.

Второй взгляд подтверждается концепцией «относительного безлесья» и сходством распространения подбуров и подзолистых альфегумусовых почв под северной тайгой, лесотундрой и даже южными тундрами. Если проанализировать параметры климата лесотундры Евразии, то ясно — они соответствуют климату северной тайги. А исторические данные свидетельствуют [4], что «полоса относительного безлесья» на севере составляет в ширину до 200—300 км и формировалась в результате нерегулируемых рубок, палов, пожаров и интенсивного выпаса домашних оленей.

Третий взгляд оставляет приоритет за тундрами как наследниками перигляциальной обстановки, которая допускала присутствие деревьев и кустарников, но на условиях так называемой инкубации (независимости) нижних ярусов, которые представляли зональную тундру. Основными лимитирующими факторами перигляциальной зоны для биоты выступали низкие температуры, слабая испаряемость, короткий вегетационный период и невысокий снежный покров. «Холодная саванна» и «криоаридные степи», а в северных горах — субальпийские редколесья и криволесья как наследие плейстоценовых оледенений (биогеографии — аркто-альпийские

экосистемы с аркто-альпийскими видами флоры и фауны, конвергентно представленными и в зональных тундрах).

Как следствие разных подходов в оценке статуса северной границы леса в современной биогеографии Г. Вальтер [5] выделяет лесотундру как самостоятельную растительную зону, но в рамках биомного деления она у него отсутствует. Нет ее и у А. Г. Исаченко [6] в схеме зональных ландшафтов, где она рассматривается вместе с тундрой. На карте «Биомы России» Г. Н. Огуревой [7] зона контакта леса и тундры не выделяется. Одним из авторов статьи при биомной дифференциации территории России [8; 9], наоборот, выделена группа биотических регионов, соответствующих северной границе леса: собственно лесотундра, тундролесья (Хибин, Урала, Чукотки и Корякии) и редколесья (Верхоянские, Колымские, Охотские и Омолонские).

Для выявления экзогенных механизмов, определяющих границу «лес-тундра», важно выделить лимитирующие факторы. Для древесных пород помимо средней температуры и суммы положительных температур значение имеет абсолютный минимум, так как «зимостойкость» у древесных видов предельна. В целом северная граница леса совпадает с изотермой июля +10°C, но для каждой породы она своя. В физиологическом отношении породы на северной границе леса характеризуются быстрым ростом побегов, наличием в период покоя мощных ингибиторов роста и нахождением воды в органах в форме коллоидного раствора, препятствующей замерзанию.

Но сам процесс движения леса на север — это не «испытание» физиологических возможностей вида, а реализация возможностей роста деревьев разных климатипов и освоения ими доступных элементов ландшафта, которые в идеале должны быть в полосе контакта крупными для того, чтобы в случае формирования древесного сообщества развивать сукцессию и усиливать средообразующую деятельность (создание благоприятного микроклимата, водного режима, снегонакопления, почвообразования и накопления углерода). Ведь норма реакции у древесных пород на севере Евразии в отношении климата достаточно широкая, а вот пространство для ее реализации через сукцессию ограничено. И если такие поверхности в зоне контакта леса и тундры малы и расположены далеко от источника семян (в сотнях и тысячах метров), то ближайшие тундровые сообщества могут рассматриваться как предклимаксные с «диаспорическим голодом» — заключительной (лесной) стадии сукцессии. «Эффективное расстояние рассеивания» семян деревьев, формирующих северную границу, не превышает нескольких сот метров на водоразделе. А жизнеспособные «тяжелые» семена хвойных пород и березы имеют сравнительно низкие скорость парашютирования и дальность разлета [10] — до 100—200 м. Этим объясняется тот факт, что сравнительно непродолжительные

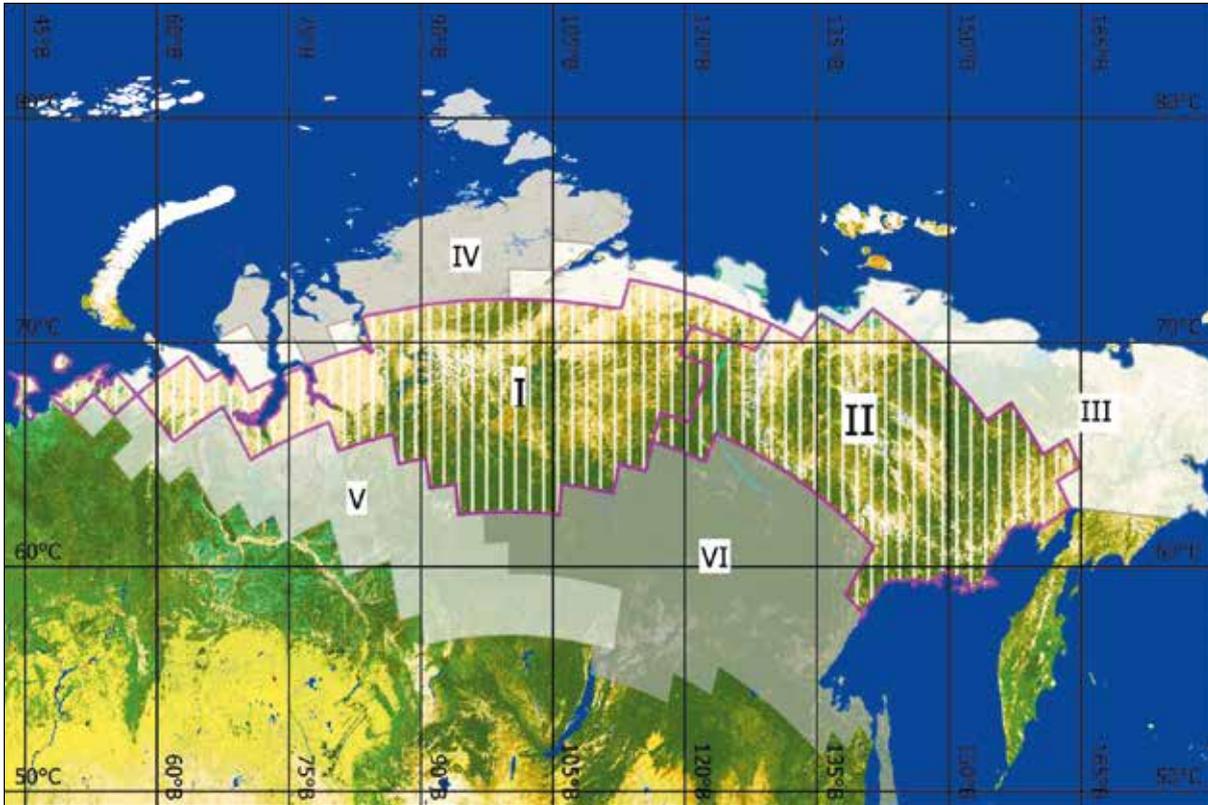


Рис. 1. Фрагмент зоогеографического районирования севера Евразии с границами на карте растительного покрова «GlobCover 2009». Лесотундра располагается внутри участков I и II, зона тундр – в III и IV, тайги – в V, VI и частично I и II
 Fig. 1. A fragment of zoogeographic zoning of the northern Eurasia with borders on the GlobCover 2009 vegetation map. The forest-tundra is located within sections I and II, the tundra zone is in III and IV, and the taiga is in V, VI and, partially, in I and II

(«быстрые») периоды потепления (раз в 60 лет) в Арктике не способны «двигать» зональные границы, лишь поддерживая полосу контакта леса и тундры в перманентном динамическом состоянии.

Продолжительные тысячелетние циклы — Голоценовый оптимум (5000—6000 лет назад), Римский оптимум (около 2000 лет назад), Раннесредневековый оптимум (900—1000 лет назад) — стимулировали наступление леса на тундру и позволяли ему закрепиться в широкой (сотни километров) полосе тундры в отдельных регионах [11].

Фаунистические критерии биогеографического статуса полосы между лесом и тундрой и его возможного изменения в результате потепления. В дополнение к анализу динамики растительности рассмотрим фаунистические критерии (разнообразие млекопитающих и птиц) возможных изменений полосы контакта леса и тундры. Ранее нами [12—15] были рассмотрены современные последствия потепления для фауны АЗРФ. В данной статье мы анализируем лишь перспективы ее изменений в связи с возможной трансформацией биогеографического статуса полосы перехода леса к тундре. Здесь хорошо просматривается широтный и долготный градиенты. В районировании первое условие — однородность фауны — проявляется

на относительно больших элементарных участках (рис. 1). Второе условие определяет их преимущественно широтное простираение и деление на западный и восточный сектора. Граница между западным и восточным секторами проходит в широтно-меридиональном направлении между 90° в. д. (на юге) и 135° в. д. (на севере).

В зоогеографическом районировании четко выделяется зона тундр (см. рис. 1, участки III и IV), а к югу от нее — северная тайга и лесотундра (участки I и II). Южнее располагаются средняя и частично южная тайга (участки V и VI). По составу наземных млекопитающих лесотундра относится к северо-таежному фаунистическому комплексу и не выделяется как самостоятельная зона. Современное потепление не способно поменять ее статус.

Сравнение списков при исключении синантропов, интродуцентов и эндемиков с локальными ареалами — землероек, леммингов, полевок (*Sorex portenkoi*, *Lemmus trimucronatus*, *Dicrostonyx vinogradovi* и др.) показало, что около 40 видов имеют ареалы, охватывающие тундру, лесотундру и северную тайгу (табл. 1).

В этой группе представлены: (а) широкоареальные, экологически пластичные и интразональные виды: волк, лиса, бурый медведь, куницы, заяц-беляк

и др.; (б) виды, связанные в своем распространении с тайгой, лесотундрой и тундрой: песец, россомаха, северный олень, лось, средняя и тундровая бурозубка, сибирский и копытный лемминги и др.; (в) виды, распространенные в специфических местообитаниях: снежный баран, крупнозубая бурозубка, пищуха, черношапочный сурок, длиннохвостый суслик и др.

Небольшая группа видов распространена в тайге и лесотундре и отсутствует в тундре (см. табл. 1). Это виды лесной зоны, а в лесотундру они проникают на краевых участках ареалов, в том числе по долинам рек. Таким образом, без эндемичных, узкоареальных видов список млекопитающих лесотундры включает 46 таксонов. Это не намного больше, чем в тундровой зоне (40 видов), но существенно меньше фауны тайги (около 90 видов) в части, попадающей на территорию биорегионов V, VI (см. рис. 1). Млекопитающих, ареалы которых связаны с лесотундрой, не обнаружено. В ней, как и в тундре, отсутствуют рукокрылые, которые являются наилучшим биоиндикатором северной границы тайги.

Иная картина присуща фауне птиц границы леса и тундры. Е. С. и Ю. С. Равнины [16] выделяют особый

«лесотундровый» тип населения птиц, хотя отмечают, как и многие орнитологи, отсутствие в нем собственно зональных видов. Установлено [17], что на севере Западной Сибири гнездится около 210 видов птиц: от границы северной тайги до южных тундр — 147, в том числе 134 в лесотундре, от лесотундры до южных тундр — только 69.

Для биогеографического анализа полосы контакта «лес-тундра» на севере Западной Сибири нами выделены фоновые виды птиц: в северной тайге — 95, в лесотундре — 85 и в кустарниковых тундрах Южного Ямала — 70. Общими в этих списках являются 47 видов, которые образуют три группы, предпочитающие сходные местообитания во всех трех подзонах. Первая группа представлена комплексом видов, населяющих в северной тайге и лесотундре пойменные ивняки и лесные сообщества с развитым кустарниковым ярусом, а в южных тундрах не только пойменные ивняки с элементами лесной растительности, но и зональные участки кустарниковых тундр. Фоновыми здесь являются 13 видов отряда Воробьинообразные (камышевка-барсучок, белобровик, варакушка, весничка, камышовая овсянка, овсян-

Таблица 1. Виды наземных млекопитающих тундр, лесотундры и северной тайги Евразии

№	Общие для тундр, лесотундры и тайги	№	Общие для лесотундры и тайги	№	Специфические для тайги
1	<i>Canis lupus</i>	1	<i>Pteromys volans</i>	1	<i>Martes martes</i>
2	<i>Gulo gulo</i>	2	<i>Mustela sibirica</i>	2	<i>Mustela altaica</i>
3	<i>Lutra lutra</i>	3	<i>Talpa altaica</i>	3	<i>Mustela eversmanii</i>
4	<i>Lynx lynx</i>	4	<i>Ochotona turuchanensis</i>	4	<i>Mustela itatsi</i>
5	<i>Martes zibellina</i>	5	<i>Eutamias sibiricus</i>	5	<i>Meles leucurus</i>
6	<i>Mustela erminea</i>	6	<i>Sicista betulina</i>	6	<i>Capreolus pygargus</i>
7	<i>Mustela lutreola</i>			7	<i>Cervus canadensis</i>
8	<i>Mustela nivalis</i>			8	<i>Moschus moschiferus</i>
9	<i>Ursus arctos</i>			9	<i>Sus scrofa</i>
10	<i>Ursus maritimus</i>			10	<i>Crocidura sibirica</i>
11	<i>Vulpes lagopus</i>			11	<i>Erinaceus amurensis</i>
12	<i>Vulpes vulpes</i>			12	<i>Mesechinus dauuricus</i>
13	<i>Alces spp.</i>			13	<i>Neomys fodiens</i>
14	<i>Ovis nivicola</i>			14	<i>Sorex gracillimus</i>
15	<i>Rangifer tarandus</i>			15	<i>Sorex unguiculatus</i>
16	<i>Sorex araneus</i>			16	<i>Alticola macrotis</i>
17	<i>Sorex caecutiens</i>			17	<i>Apodemus agrarius</i>
18	<i>Sorex daphaenodon</i>			18	<i>Apodemus argenteus</i>
19	<i>Sorex isodon</i>			19	<i>Apodemus speciosus</i>
20	<i>Sorex minutissimus</i>			20	<i>Apodemus peninsulae</i>
21	<i>Sorex minutus</i>			21	<i>Castor fiber</i>
22	<i>Sorex roboratus</i>			22	<i>Cricetus cricetus</i>
23	<i>Sorex tundrensis</i>			23	<i>Lemmus amurensis</i>

Окончание табл. 1

№	Общие для тундр, лесотундры и тайги	№	Общие для лесотундры и тайги	№	Специфические для тайги
24	<i>Lepus timidus</i>			24	<i>Microtus fortis</i>
25	<i>Ochotona hyperborea</i>			25	<i>Microtus maximowiczii</i>
26	<i>Alticola lemminus</i>			26	<i>Microtus sachalinensis</i>
27	<i>Arvicola amphibius</i>			27	<i>Myodes glareolus</i>
28	<i>Dicrostonyx torquatus</i>			28	<i>Sicista caudata</i>
29	<i>Lemmus sibiricus</i>			29	<i>Urocitellus undulatus</i>
30	<i>Marmota camtschatica</i>			30	<i>Micromys minutus</i>
31	<i>Microtus agrestis</i>			31	<i>Eptesicus nilssonii</i>
32	<i>Microtus gregalis</i>			32	<i>Barbastella leucomelas</i>
33	<i>Microtus hyperboreus</i>			33	<i>Murina ussuriensis</i>
34	<i>Microtus middendorffii</i>			34	<i>Myotis bombinus</i>
35	<i>Microtus oeconomus</i>			35	<i>Myotis brandtii</i>
36	<i>Clethrionomys rufocanus</i>			36	<i>Myotis dasycneme</i>
37	<i>Clethrionomys rutilus</i>			37	<i>Myotis daubentonii</i>
38	<i>Myopus schisticolor</i>			38	<i>Myotis frater</i>
39	<i>Sciurus vulgaris</i>			39	<i>Myotis ikonnikovi</i>
40	<i>Urocitellus parryi</i>			40	<i>Plecotus sacrimontis</i>
				41	<i>Vespertilio murinus</i>
				42	<i>Vespertilio sinensis</i>
				43	<i>Myotis macrodactylus</i>
				44	<i>Murina hilgendorfi</i>
				45	<i>Plecotus ognevi</i>

ка-крошка, рябинник, сероголовая гаичка, таловка, теньковка, чечетка, щур, юрок, дербник и обыкновенная кукушка). Вторая группа образована преимущественно водоплавающими и околоводными видами, обитающими на берегах водоемов: это береговая ласточка, круглоносый плавунчик, морская чернеть, морянка, полярная крачка, серебристая и сизая чайка, синьга, хохлатая чернеть, чернозобая гагара, чирок-свистун и шилохвость. Еще одна группа состоит из видов, предпочитающих открытые местообитания. В южных тундрах это возвышенные участки водоразделов с лишайниковыми и моховыми тундрами и осоковыми болотами в понижениях, а в северной тайге и лесотундре — плоскобугристые болота. В составе группы: азиатский и обыкновенный бекасы, белая куропатка, белая и желтая трясогузка, болотная сова, галстучник, гаршнеп, золотистая ржанка, каменка, краснозобый и луговой конек, кулик-воробей, лапландский подорожник, мородунка, средний кроншнеп, турухтан, фифи.

Фаунистическое сходство северной тайги и лесотундры дополняется еще 25 видами птиц, которых нет в списке фоновых для южной тундры. То есть в лесотундре число общих видов с северной тай-

гой составит 72 из 85. Общий список для лесотундры и южной тундры значительно короче и состоит всего из 9 видов. Если сравнивать упомянутые три подзоны с типичными тундрами, то список общих видов сократится более чем вдвое до 21 вида. Таким образом, анализ фоновых видов птиц от северной тайги до типичных тундр показал, что градиентом в их распространении будет не лесотундра, а южная кустарниковая тундра. В итоге прогрессирующее потепление климата в Арктике будет реально способствовать росту разнообразия птиц именно в южной тундре, не меняя существенно фауну других зон, где велика доля птиц интразональных местообитаний.

Анализ изменений леса на северном пределе на основе выявления пространственных инвариант. Для анализа были выбраны два контрастных по условиям модельных участка — низовья Надыма (Ямало-Ненецкий автономный округ, рис. 2) и район Серебрянского водохранилища на Кольском полуострове (рис. 3). Рассмотрено изменение полноты лесов на северной границе с конца 1980-х годов до 2019 г. Рассчитаны два факторных пространства, описывающие инварианты за 1986—1989 и 2017—

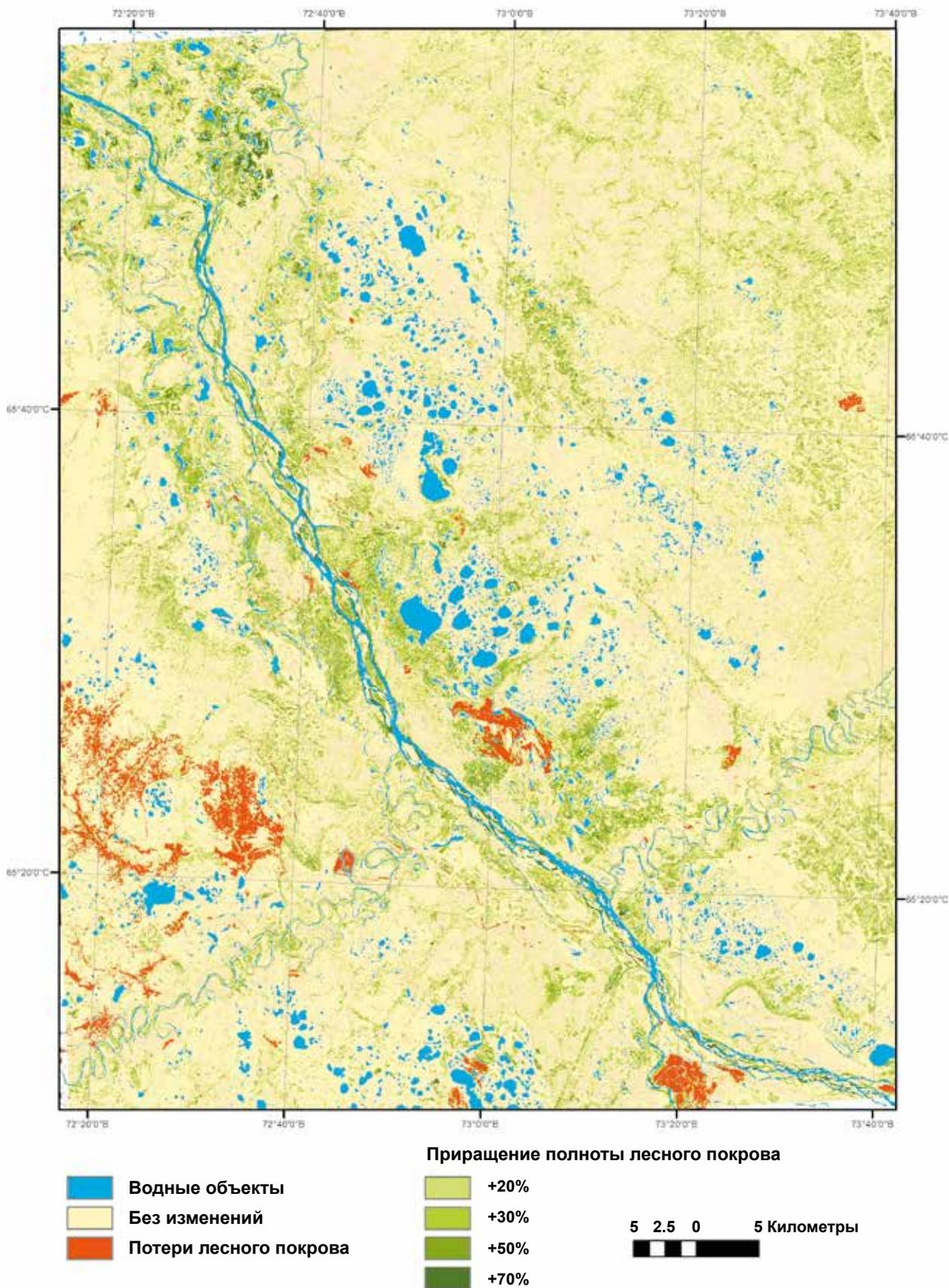


Рис. 2. Оценка изменений плотности лесного покрова на модельном участке низовьев Надыма (Ямало-Ненецкий автономный округ) с 1986 по 2019 гг.

Fig. 2. Assessment of changes in forest cover density in a model section of the lower reach of the river Nadym (Yamal-Nenets Autonomous Area) from 1986 to 2019

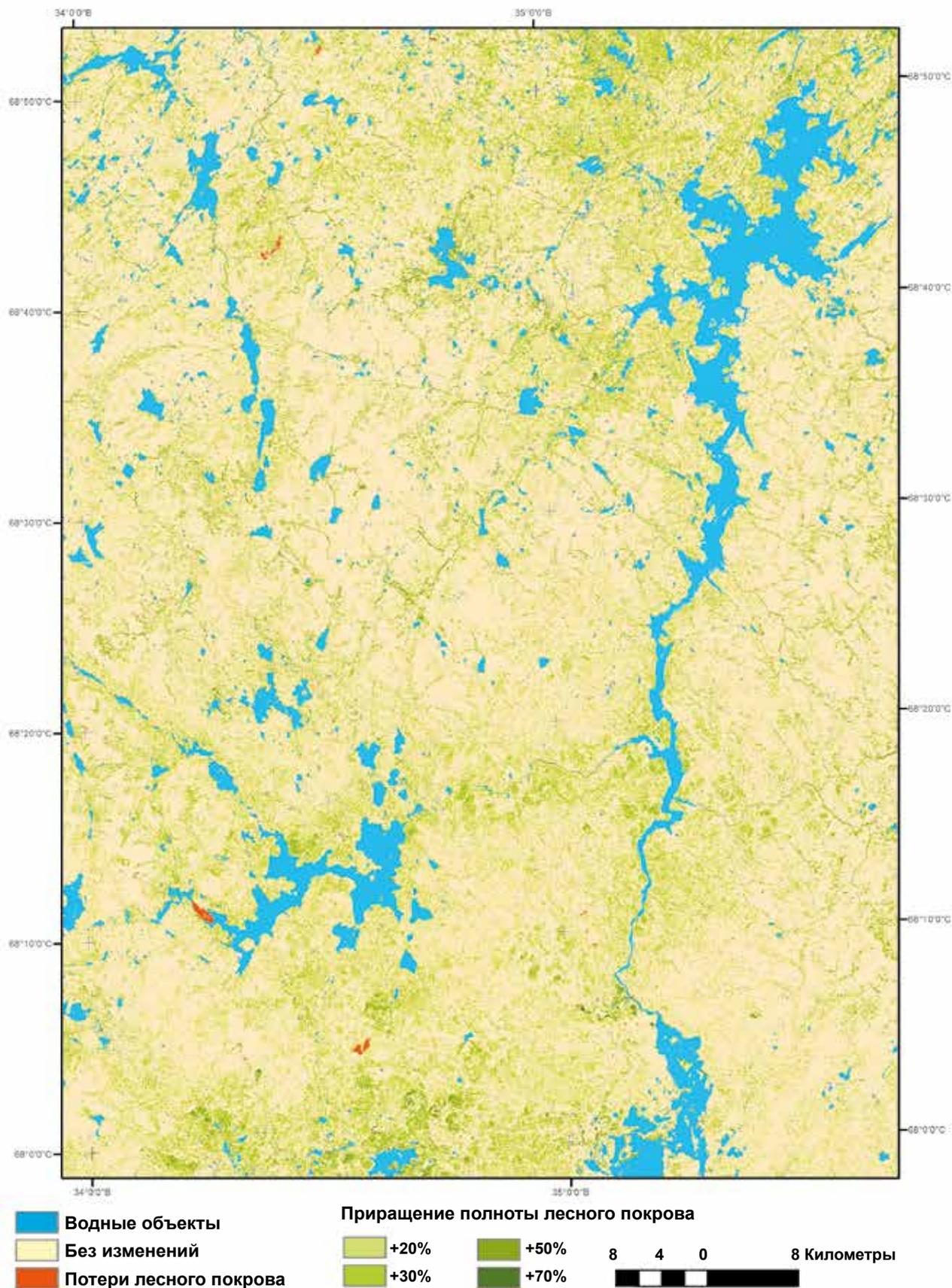


Рис. 3. Оценка изменений плотности лесного покрова на модельном участке Кольского полуострова (район Серебрянского водохранилища, Мурманская область) с 1986 по 2019 гг.

Fig. 3. Assessment of changes in the density of forest cover on the model site of the Kola Peninsula (Serebryansky Reservoir District, Murmansk Region) from 1986 to 2019

2019 гг. Качество дискриминации составило 74% для 1980-х годов и до 81% для современности. Полученные состояния полноты леса вычитывались друг из друга, что позволило оценить пространственные изменения состояния лесного покрова на модельных участках. Выявлено, что на 14% территории низовьев Надыма наблюдается увеличение покрытия лесом примерно на 20%, на 4% — рост на 30%, на 3% — рост 50% и на 8% — более 50% (см. рис. 2). Рост наблюдается, как и предполагалось, по долинам рек, демонстрируя один из описанных выше механизмов расширения северной границы леса в связи с потеплением. Но отмечены и варианты расширения островов леса на водоразделе. Общие потери леса отмечены на 8% территории и носят очаговый характер (пожары и т. п.). Аналогичные механизмы роста площадей леса, но с учетом его вертикальной границы, отмечены и на Кольском полуострове (см. рис. 3).

Результаты выявления региональных особенностей современного движения границы леса на равнинах и в горах АЗРФ. Проведен экспресс-анализ положения границ лесной растительности на космических снимках в программе GoogleEarthPro (22 октября 2019 г.) в некоторых арктических регионах России с запада на восток. Для горных территорий сравнивались сцены участков с 1984 по 2018 (2019) гг. с периодичностью в пять лет. На Кольском полуострове в Хибинах за рассматриваемый период (почти 40 лет) зафиксирован подъем верхней границы леса в среднем на 26 м на южных и на 15 м на северных склонах (рис. 4). Другие авторы [18] отмечают, что наиболее активным возобновление доминирующей на южном склоне горы Имандры сосны было между 1940-ми и 1970-ми годами и после 1985 г. На других профилях появление березы приурочено к 1920—1950-м годам и к периоду после 1970 г. На границе леса березы стали появляться в 1930-х годах, сосна — после 1980 г. А облесение происходило в 1960—2000-х годах [18].

В Большеземельской тундре и низовьях Печоры с начала XXI в. наблюдаются, по-видимому, самые активные движения границы леса на север [12—14; 19]. Здесь отмечены угнетенные ельники с *Betula nana* и кустарничками (*Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*). Для полосы контакта леса и тундр характерны редколесья, ерники и ивняки, в долинах и на террасах рек Хальмер-Ю и Ортина обычные реликтовые ельники (*Picea obovata*), в том числе внутри котловин выдувания [19]. На аллювии встречаются редколесья (*Larix sibirica*) и высокорослые заросли кустарников (*Salix viminalis*, *Duschekia fruticosa*, *Sorbus aucuparia*, *Padus avium*). Сравнение положения леса на космических снимках выявляет его прогрессирующее продвижение на север.

На Полярном и Северном Урале на снимках 2016 г. даже визуально прослеживается расширение площади древесной растительности, что отмечалось нами и ранее при анализе так называемого позе-

ления тундры [12; 20]. На модельных склонах северной и южной экспозиций Северного Урала за последние 30 лет верхняя граница леса поднялась на 15 и 3 м соответственно, что свидетельствует о закономерной в случаях потепления в Арктике смене лимитирующего рост леса фактора — с температуры на сухость (рис. 5). Сопоставление снимков 1984 и 2016 гг. свидетельствует об увеличении площади лесов в регионе. Улучшение условий прорастания деревьев на Полярном Урале подтверждается дендроклиматическими реконструкциями. Горизонтальная и вертикальная компоненты вектора перемещения границ составляли соответственно 3,2 и 0,3 м/год для сомкнутых древостоев и 5,8 и 0,4 м/год для редиин [22; 23]. Временное изменение границы сомкнутого леса носит дискретный характер из-за длительного прорастания семян. В нижней части экотона происходит внедрение ели сибирской и формирование лиственнично-еловых древостоев, в которых лиственница практически не возобновляется [21; 22].

ВГЛ с 1956 по 2017 гг. на Полярном Урале выросло, что привело к росту общей площади древостоев (перешедших из категории редиин и редколесий в сомкнутые леса), составившей 122,4 км² (0,45% площади леса в 2019 г.). В отдельных горных долинах увеличение лесистости составило 30—44% [24].

На севере Западной Сибири исследования северной границы леса выявляли ее смещение в зону тундры. Например, в низовьях Оби наступление леса на тундру отмечается на 30% площади, на 65% площади изменения положения границ лесотундры не наблюдалось, а на 5% отмечено сокращение площади лесов и увеличение заболачивания [25]. Данные, демонстрирующие усиление процесса экспансии лесов, для этого района получены нами при дистанционном анализе лесов низовий Надыма (см. рис. 2).

В горах Пutorаны (полуостров Таймыр) с 1956 по 2017 гг. общая площадь участков, где древостои перешли из категории редиин и редколесий в сомкнутые леса, составила за последние 50—60 лет около 645 км² (более 7% площади) [24]. Выявлены периоды облесения лиственницы — 1820—1870-е, 1900—1920-е и 1950—2000-е годы, но формирование ВГЛ началось в начале XIX в., массовое возобновление — в 1880—1920-х и 1940—1980-х годах [24].

Наступление лесов на тундру выявлено непосредственно и для самого северного в мире массива леса в урочище Ары-Мас [26]. В 1970—2000-х годах лиственничные редины продвигались в тундру со скоростью 3—11 м и 11—58 м/год — по укрытым понижениям. Использование методов дистанционного анализа дало разные оценки скорости наступления *Larix gmelinii* на тундру [2; 25], но общая его тенденция прослеживается волнообразно. Циклы фиксируются в динамике годичных колец [26]. На полуострове Таймыр самые северные находки *L. gmelinii* в виде стланика отмечены севернее реки Хатанга [27].

На острове Тит-Ары в устье Лены (Якутия) в настоящее время представлен один из самых северных массивов лиственницы (*Larix cajanderi*). Практически все леса на острове были вырублены в 1943—1945 гг. Современные насаждения появились в 1960—1980-х годах. За последние 50—60 лет плотность древостоя снизилась с 1,5 до 0,7 тыс. экз./га, а показатели его высоты (3—5 м) практически достигли близких к таковым в 1940-х годах. Климатические условия начала XXI в. благоприятствуют росту лиственницы, что отражается на увеличении осевых приростов в последние 10—15 лет. Исследователи выявили различие реакции на изменение климата у деревьев, произрастающих в тундре и в лесном массиве [28].

На космических снимках *Верхоянского, Яно-Индигирского и Колымского* участков полосы контакта леса и тундр в 1984 г. наблюдались большие контуры пожарищ, которые к 2017 г. постепенно заросли лесом. Но и в последние годы здесь наблюдаются пожарища, как и на *Чукотке*, где площадь лесов с 2010 г. по настоящее время сократилась на 13,5 тыс. га, где лесорастительные условия ухудшаются [15], а леса постоянно горят.

Заключение и выводы

Вопрос о динамике границы леса в Арктике, волновавший исследователей и в начале, и в середине, и в конце XX в. [3; 4; 29; 30], продолжает интересовать их и в XXI в. [12—15; 20; 31—33]. Частично на него получен ответ с позиций современного биогеографического и сукцессионного статуса лесов на северном пределе.

1. Выявлены три варианта развития лесов в тундре в условиях потепления: (а) восстановление позиций на участках с ранее уничтоженным древостоем, (б) расширение площадей на «новых» в пределах тысячелетней динамики местообитаниях в тундре, (в) «надвигание» леса на

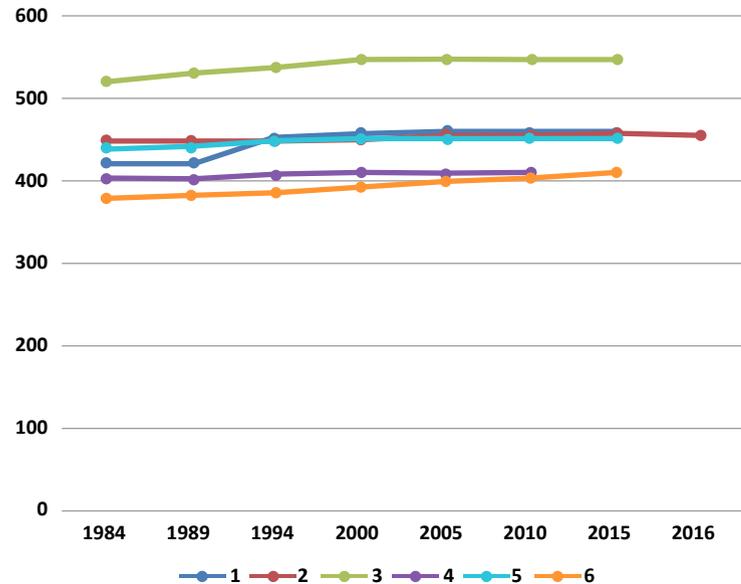


Рис. 4. Динамика верхней границы леса в Хибинах (Кольский полуостров) на модельных южном (1 — 67°43'23,43" с. ш., 33°51'09,55" в. д.; 2 — 67°43'22,85" с. ш., 34°02'34,80" в. д.; 3 — 67°39'19,26" с. ш., 33°54'10,69" в. д.) и северном (4 — 67°43'36,76" с. ш., 34°03'24,04" в. д.; 5 — 67°44'13,65" с. ш., 33°56'47,65" в. д.; 6 — 67°46'05,04" с. ш., 33°56'01,90" в. д.) склонах

Fig. 4. Dynamics of the timberline in the Khibiny (Kola Peninsula) on the model of the southern (1 — 67°43'23.43" N, 33°51'09.55" E; 2 — 67°43'22.85" N, 34°02'34.80" E; 3 — 67°39'19.26" N, 33°54'10.69" E) and northern (4 — 67°43'36.76" N, 34°03'24.04" E; 5 — 67°44'13.65" N, 33°56'47.65" E; 6 — 67°46'05.04" N, 33°56'01.90" E) slopes

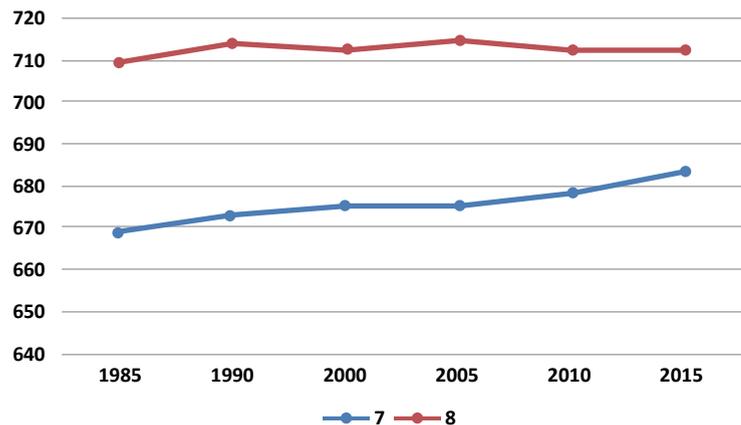


Рис. 5. Динамика верхней границы леса на северном (7 — 65°19'44,82" с. ш., 60°42'23,46" в. д.) и южном (8 — 65°20'45,76" с. ш., 60°56'46,37" в. д.) модельных склонах Северного Урала

Fig. 5. Dynamics of the timberline in the Northern Ural on the model of the northern (7 — 65°19'44.82" N, 60°42'23.46" E) and southern (8 — 65°20'45.76" N, 60°56'46.37" E) slopes

тундру в краткосрочные периоды потепления. Характерное время развития «зонального леса» составляет 200—400 лет, т. е. равно его сукцессионному циклу.

2. Во всех вариантах динамики проявляются ландшафтные особенности наступления леса на тундру: (а) вдоль речных долин, (б) из долин на террасы и склоны водораздела, (в) на водоразделах — от стенки леса и от границ островов леса — «omnidirectional expansion».

3. Определены масштабы и интенсивность движения ВГЛ в горных регионах АЗРФ. В последнее столетие здесь выявляется не менее двух-

трех циклов облесения. По вертикальному вектору скорости составляли от 0,5—1,0 до 3,0—5,0 м/год, что позволило ВГЛ подняться за последний внутри-вековой цикл потепления (30—40 лет) на 15—50 м.

4. Проведено зоогеографическое районирование зоны контакта «леса-тундра» на севере Евразии. Выявлено, что по составу наземных млекопитающих лесотундра относится к *северо-таежному фаунистическому комплексу* и не выделяется как самостоятельная полоса; современное потепление не способно поменять ее статус. В отношении фауны птиц показано, что градиентом в их распространении в зоне контакта леса и тундры является не лесотундра, где специфических видов нет, а южная тундра. Потепление в Арктике реально способствует обратимому росту разнообразия птиц именно в этой подзоне, не меняя фауну других зон, где значительна доля птиц интразональных местообитаний.

5. Сравнительно непродолжительные периоды потепления, повторяющиеся раз в 60 лет, в Арктике не способны «двигать» зональные границы леса на север, а могут только поддерживать полосу контакта леса и тундры в перманентном динамическом состоянии. Для зональных смен тренды климата должны быть не менее 100—200 лет, как это наблюдалось неоднократно в последние тысячелетия.

Статья подготовлена в рамках гранта РФФИ № 18-05-60057 «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты» и по теме государственного задания Института географии РАН № 0148-2019-0007 «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования».

Литература/References

1. Кравцова В. И., Лошкарева А. Р. Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2010. — № 6. — С. 49—57.
2. Kravtsova V. I., Loshkareva A. R. Issledovaniye severnoy granitsy lesa po kosmicheskim snimkam raznogo razresheniya. [Study of the northern forest border using satellite images of various resolutions]. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya, 2010, no. 6, pp. 49—57. (In Russian).
3. Proceedings of the final workshop of Norway-Russia cooperation project BENEFITS. Moscow, 24—27 February 2011. Ed. by O. V. Tutubalina and E. I. Golubeva. Moscow, Lomonosov State Univ., 2011, 70 p.
4. Тишков А. А. Экологическая реставрация нарушенных экосистем Севера. — М.: Рос. акад. образования, 1996. — 125 с.
5. Tishkov A. A. Ekologicheskaya restavratsiya narushennykh ekosistem Severa. [Ecological restoration of disturbed ecosystems in the North]. Moscow, Ros. akad. obrazovaniya, 1996, 125 p. (In Russian).
6. Крючков В. В. Чуткая Субарктика. — М.: Наука, 1976. — 137 с.

Kryuchkov V. V. Chutkaya Subarktika. [Vulnerable Subarctic]. Moscow, Nauka, 1976, 137 p. (In Russian).

5. Вальтер Г. Растительность Земного шара. Эколого-физиологическая характеристика. — Т. 3: Тундры, луга, степи, внетропические пустыни. — М.: Прогресс, 1975. — 429 с.

Walter H. Rastitel'nost' Zemnogo shara. Ekologo-fiziologicheskaya kharakteristika. T. 3. Tundry, luga, stepi, vnetropicheskiye pustyni. [Vegetation of the Earth. Ecological and physiological characteristics. Vol. 3. Tundra, meadows, steppes, extratropical deserts]. Moscow, Progress, 1975, 429 p. (In Russian).

6. Исаченко А. Г. Избранные труды (к 90-летию со дня рождения). — СПб.: ВВМ, 2012. — 486 с.

Isachenko A. G. Izbrannyye trudy (k 90-letiyu so dnya rozhdeniya). [Selected Works (in honour of the 90th birthday)]. St. Petersburg, VVM, 2012, 486 p. (In Russian).

7. Огуреева Г. Н. Карта «Биомы России»: М. 1:7 500 000 (перераб. и дополн.). — М.: WWF России, 2018.

Ogureyeva G. N. Karta "Biomy Rossii". M. 1:7 500 000 (pererab. i dopoln.). [Map "Biomes of Russia". 1:7 500 000. (Revised and supplemented)]. Moscow, WWF Rossii, 2018. (In Russian).

8. Тишков А. А. Биосферные функции природных экосистем России. — М.: Наука, 2005. — 309 с.

Tishkov A. A. Biosfernyye funktsii prirodnykh ekosistem Rossii. [Biosphere functions of Russia's natural ecosystems]. Moscow, Nauka, 2005, 309 p. (In Russian).

9. Тишков А. А. Карта биомов России // Доклад «Живая планета-2008». — WWF Intl / WWF России, 2008. — С. 6.

Tishkov A. A. Karta biomov Rossii. Doklad "Zhivaya planeta-2008". [Map of Biomes of Russia / Report "Living Planet-2008"]. WWF Int. / WWF Rossii, 2008. P. 6 (In Russian).

10. Денисов С. А. Лесоведение. Смена пород. — Йошкар-Ола: Марийский ГТУ, 1999. — 78 с.

Denisov S. A. Lesovedeniye. Smena porod. [Forest science. Change of species]. Yoshkar-Ola, Mariyskiy GTU, 1999, 78 p. (In Russian).

11. Сергиенко В. Г. Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменений климата // Тр. Санкт-Петербург. НИИ лесного хоз-ва. — 2015. — № 1. — С. 5—19.

Sergiyenko V. G. Dinamika granits lesorastitel'nykh zon Rossii v usloviyakh izmeneniy klimata. [The dynamic of the limits of forest zones in Russia under climate change]. Tr. Sankt-Peterburg NII lesnogo khoz-va, 2015, no. 1, pp. 5—19. (In Russian).

12. Белоновская Е. А., Тишков А. А., Вайсфельд М. А. и др. «Позеленение» Арктики и современные тренды ее биоты // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2016. — № 3. — С. 67—82.

Belonovskaya E. A., Tishkov A. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tsarevskaya N. G., Tertitsky G. M. "Pozeleneniye" Arktiki i sovremennyye trendy eyo bioty. ["Greening" of the Arc-

- tic and current trends of its biota]. *Izv. RAN, Ser. geogr.*, 2016, no. 3, pp. 28—39. (In Russian).
13. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А. и др. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 31—44. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44.
- Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Tertitsky G. M. "Pozeleneniye" tundry kak drayver sovremennoy dinamiki arkticheskoy bioty. ["Greening" of the tundra as a driver of the modern dynamics of the Arctic biota]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 2 (30), pp. 31—44. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44. (In Russian).
14. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М. и др. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 38—51. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51.
- Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G., Shmatova A. G. Antropogennaya transformatsiya arkticheskikh ekosistem Rossii: podkhody, metody, otsenki. [Anthropogenic transformation of the Russian Arctic ecosystems: approaches, methods, assessments]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 4 (36), pp. 38—51. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51. (In Russian).
15. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А. и др. Региональные биогеографические эффекты «быстрых» изменений климата в российской Арктике в XXI в. // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 31—45. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-45.
- Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaysfel'd M. A., Glazov P. M., Lappo E. G., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tertitsky G. M., Titova S. V., Tsarevskaya N. G. Regional'nyye biogeograficheskiye efekty "bystrykh" izmeneniy klimata v Rossiyskoy Arktike v XXI v. [Regional biogeographic effects of "fast" climate changes in the Russian Arctic in the 21st century]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 2 (38), pp. 31—45. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-45. (In Russian).
16. Равкин Е. С., Равкин Ю. С. Птицы равнин Северной Евразии. — Новосибирск: Наука, 2005. — 303 с.
- Ravkin Ye. S., Ravkin Yu. S. Ptitsy ravnin Severnoy Yevrazii. [Birds of the Northern Eurasia plains]. Novosibirsk, Nauka, 2005, 303 p. (In Russian).
17. Рыжановский В. Н. Лесотундра как среда обитания птиц // Рус. орнитол. журн. — 2009. — Т. 18, экспресс-вып. № 469. — С. 379—403.
- Ryzhanovskiy V. N. Lesotundra kak sreda obitaniya ptits. [Lesotundra as a habitat for birds]. *Russk. ornitol. zhurn.*, 2009, vol. 18, ekspress-vyp. no. 469, pp. 379—403. (In Russian).
18. Моисеев П. А., Галимова А. А., Бубнов М. О. и др. Динамика древостоев и их продуктивности на верхнем пределе произрастания в Хибинах на фоне современных изменений климата // Экология. — 2019. — № 5. — С. 341—355. — DOI: 10.1134/S0367059719050081.
- Moiseyev P. A., Galimova A. A., Bubnov M. O., Devi N. M., Fomin V. V. Tree Stands and Their Productivity Dynamics at the Upper Growing Limit in Khibiny on the Background of Modern Climate Changes. *Russian J. of Ecology*, 2019, vol. 50, no. 5, pp. 431—444. DOI: 10.1134/S1067413619050084.
19. Лавриненко О. В., Лавриненко И. А. Островные ельники восточно-европейских тундр // Ботан. журн. — 2003. — Т. 88, № 8. — С. 59—77.
- Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A. Ostrovnyye yel'niki vostochno-yevropeyskikh tundr. [Island spruce forests of the East European tundra]. *Botan. zhurn*, 2003, vol. 88, no. 8, pp. 59—77. (In Russian).
20. Тишков А. А., Кренке-мл. А. Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 28—38.
- Tishkov A. A., Krenke Jr A. N. "Pozeleneniye" Arktiki v XXI v. kak effekt sinergizma deystviya global'nogo potepleniya i khozyaystvennogo osvoyeniya. ["Greening" of the Arctic in the 21st century as an effect of synergy between global warming and economic development]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 4 (20), pp. 28—38. (In Russian).
21. Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. — 2007. — № 6. — С. 1—13.
- Shiyatov S. G., Mazepa V. S. Klimatogennaya dinamika lesotundrovoy rastitel'nosti na Polyarnom Urale. [Climatogenic dynamics of forest-tundra vegetation in the Polar Urals]. *Lesovedeniye*, 2007, no. 6, pp. 1—13. (In Russian).
22. Шиятов С. Г., Терентьев М. М., Фомин В. В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. — 2005. — № 2. — С. 83—90.
- Shiyatov S. G., Terent'yev M. M., Fomin V. V. Spatiotemporal dynamics of forest-tundra communities in the Polar Urals. *Russian J. of Ecology*, 2005, vol. 36, no. 2, pp. 69—75.
23. Шиятов С. Г., Терентьев М. М., Фомин В. В., Циммерманн Н. Е. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. — 2007. — № 4. — С. 243—248.
- Shiyatov S. G., Terent'yev M. M., Fomin V. V., Zimmermann N. Ye. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century. *Russian J. of Ecology*, 2007, vol. 38, no. 4, pp. 223—227.
24. Григорьев А. А., Дэви Н. М., Кукарских В. В. и др. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. — 2019. — № 4. — С. 243—254. — DOI: 10.1134/S0367059719040073.
- Grigor'yev A. A., Devi N. M., Kukarskikh V. V., V'yukhin S. O., Galimova A. A., Moiseyev P. A., Fomin V. V. Structure

and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau. *Russian J. of Ecology*, 2019, vol. 50, no. 4, pp. 311—322. DOI: 10.1134/S1067413619040076.

25. Rees G., Brown I., Mikkola K. et al. How can the dynamics of the tundra taiga boundary be remotely monitored? *Ambio*, 2002, vol. 31, Special iss. 12, pp. 56—62.

26. Рудинский М. Г. Экологические факторы, влияющие на рост и возобновление лиственницы в острове леса Ары-Мас (Восточный Таймыр): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Иркутск, 2016. — 24 с.

Rudinskiy M. G. Ekologicheskiye faktory, vliyayushchiye na rost i vozobnovleniye listvennitsy v ostrove lesa Ary-Mas (Vostochnyy Taymyr). [Ecological factors affecting the growth and renewal of larch in the forest island of the Ary-Mas (East Taimyr)]. Avtoref. dis. ... kand. biol. Nauk. Irkutsk, 2016, 24 p. (In Russian).

27. Поспелов И. Н., Поспелова Е. Б. О северном пределе распространения лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) на восточном Таймыре // Ботан. журн. — 2013. — Т. 98, № 5. — С. 621—629.

Pospelov I. N., Pospelova E. B. O severnom predele rasprostraneniya listvennitsy Gmelina (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) na vostochnom Taymyre. [On the northern limit of distribution of larch Gmelin (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) in eastern Taimyr]. Botan. zhurn., 2013, vol. 98, no. 5, pp. 621—629. (In Russian).

28. Исаев А. П., Габышева Л. П., Михалёва Л. Г. Вековая динамика таксационных показателей лиственничных редколесий у северной границы ареала на острове Титары (низовья реки Лены) // Успехи современ. естествознания. — 2016. — № 4. — С. 77—82. Isayev A. P., Gabysheva L. P., Mikhailova L. G. Vekovaya dinamika taksatsionnykh pokazateley listvennichnykh redkolesiy u severnoy granitsy areala na ostrove Titary

(nizov'ya reki Leny). [Century-time dynamics of taxation indicators of larch sparse forests at the northern limit of the area on the island of Titara (lower part of the Lena-river)]. *Uspekhi sovrem. yestestvoznaniya*, 2016, no. 4, pp. 77—82. (In Russian).

29. Танфильев Г. И. Предел лесов в Полярной России по исследованиям в тундре тиманских самоедов. — Одесса: Тип. Е. И. Фесенко, 1911. — 286 с.

Tanfil'yev G. I. Predel lesov v Polyarnoy Rossii po issledovaniyam v tundre timanskikh sameyodov. [The limit of forests in Polar Russia according to research in the tundra of Timan Samoyeds]. Odessa, Tip. Ye. I. Fesenko, 1911, 286 p. (In Russian).

30. Андреев В. Н. Продвижение древесной растительности в тундру в связи с защитными свойствами лесопосадок на Севере // Ботан. журн. — 1954. — Т. 39, № 1. — С. 28—47.

Andreyev V. N. Prodvizheniye drevesnoy rastitel'nosti v tundru v svyazi s zashchitnymi svoystvami lesoposadok na Severe. [Penetration of forest vegetation into the tundra as the result of the protective properties of forest plantations in the North]. Botan. zhurn., 1954, vol. 39, no. 1, pp. 28—47. (In Russian).

31. Chapin III F. S., Callaghan T. V., Bergeron Y. et al. Global change and the boreal forest: thresholds, shifting states, or gradual change. *Ambio*, 2004, vol. 33, no. 6, pp. 361—365.

32. Lopenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D. et al. Acclimation of Russian forest to recent changes in climate. *Global Change Biology*, 2005, vol. 11, no. 12, pp. 2090—2102.

33. Bala G., Caldeira K., Mirin A. et al. Multicentury Changes to the Global Climate and Carbon Cycle: Results from a Coupled Climate and Carbon Cycle Model. *J. of Climate*, 2005, vol. 18, iss. 21, pp. 4531—4544.

Информация об авторах

Тишков Аркадий Александрович, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор, заместитель директора, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., 29), e-mail: tishkov@biodat.ru.

Белоновская Елена Анатольевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: belena53@mail.ru.

Глазов Петр Михайлович, научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: glazpech@mail.ru.

Кренке Александр Николаевич, кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: ankrenke@mail.ru.

Пузаченко Андрей Юрьевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: andreypuzak@gmail.com.

Тертицкий Григорий Маркович, старший научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: tertitski@mail.ru.

Титова Светлана Владимировна, научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: canoruss@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М. и др. Тундра и лес российской Арктики: вектор взаимодействия в условиях современного потепления климата // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 48—61. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-48-61.

TUNDRA AND FOREST OF THE RUSSIAN ARCTIC: THE INTERACTION VECTOR IN THE CONTEXT OF CURRENT WARMING

Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V.
Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on April 20, 2020

Abstract

The aim of the research is to analyze the climatogenic dynamics of the timberline in the Russian Arctic. The authors consider the issue from the perspective of the current biogeographic and succession status of forests on the northern limit using remote analysis and ground-based verification methods. They identify three penetration options of the forest to the tundra: (a) the forest recovers its position in cutover areas; (b) the forest expands its area, occupying the “new” tundra habitats within its millennium-long dynamics; (c) forest vegetation “approaches” the tundra, using the conditions of short-term temperature anomalies, while maintaining the geobotanical and biogeographic status of the tundra. The research proves that the characteristic formation/restoration time of the “zonal forest” in the contact zone with the tundra is at least 200–400 years, i.e. equal to its succession cycle. Using remote methods, the researchers trace the landscape features of the forest advance on the tundra in the regions: along river valleys from south to north, from valleys to terraces and the watershed slopes, and on watersheds — from the forest wall and from the borders of the forest broken masses. According to the literature and analysing the satellite imagery archives, the researchers with help of the GoogleEarthPro program determine the scale and intensity of the upper timberline (UTL) dynamics in the mountainous regions of the Russian Arctic. In the last century, they reveal here at least 2–3 cycles of afforestation of the oro-tundra belts. Over the last intra-century warming cycle (30–40 years), UTL rose by 15m (northern slopes) — 50m (southern slopes) m. Based on the special zoogeographic zoning and comparison of the zonal fauna of mammals and birds of the tundra, forest-tundra, and northern taiga the researchers confirm the attribution of the forest-tundra to the north-taiga to faunistic complex. They conclude that while maintaining the medium-term cyclical climate in the Arctic (about 60 years), current warming is not able to “move” the zonal borders of the forest, but can only maintain its contact with the tundra in a permanent dynamic state. This is possible only if the trend is maintained for at least 100–200 years.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, climate warming, forest – tundra contact strip, vertical timberline, biogeographic and succession status, fauna of mammals and birds, zoogeographic zoning.

The article was prepared under RFBR grant No. 18-05-60057 “The tundra “greening” as a driver of current dynamics of the Arctic biota” and on the state assignment theme of the Institute of geography of the RAS No. 0148-2019-0007 “Assessment of physical, geographical, hydrological and biotic changes in the environment and their implications for laying the foundations of sustainable nature management”.

Information about the authors

Tishkov Arkadiy Aleksandrovich, Doctor of Geography, Corresponding Member of RAS, Professor, Deputy Director, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tishkov@biodat.ru.

Belonovskaya Elena Anatol'evna, PhD of Geography, Leading Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: belena@igras.ru.

Glazov Petr Mikhailovich, Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: glazpech@mail.ru.

Krenke Alexander Nikolaevich, PhD of Geography, Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: ankrenke@mail.ru.

Puzachenko Andrey Yur'evich, Doctor of Biology, Leading Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: andreypuzak@gmail.com.

Tertitsky Grigoriy Markovich, Senior Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tertitski@mail.ru.

Titova Svetlana Vladimirovna, Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: canopuss@yandex.ru.

Bibliographic description

Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V. Tundra and forest of the Russian Arctic: the interaction vector in the context of current climate warming. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 3 (39), pp. 48–61. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-48-61. (In Russian).

© Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V., 2020