



УДК 630*574.4*641

Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата

© В. Г. Сергиенко

The dynamics of the boundaries of forest vegetation zones in Russia under climate change

V.G. Sergienko (Saint-Petersburg Forestry Research Institute)

This article analyzes published data containing the results of long-term studies of climate change impacts on the dynamics of the boundaries of forest vegetation zones and forest ecosystems. An overview is provided of the dynamics of the boundaries of forest vegetation zones at the northern limit in the ecotone tundra-forest and subalpine zone of high mountains in European Russia and Western Siberia. Feedbacks are analyzed arising between of forest vegetation and the atmosphere at current and future climate change in permafrost, high-altitude mountain zones and taiga boreal forest. The data on the fluctuation of the northern limit of forest vegetation at thermal maximum in Holocene and the last 100 years are given. Based on a comparison of rhythms of climate change, forecast is presented of bias in the future boundaries of different climatic and forest vegetation zones in some regions in Russia.

Climate change is an important factor in the transformation of forest ecosystems, which is reflected in changes in the structure and species composition of forests, growth, productivity, and other characteristics of the stands. Observations on the dynamics of the boundaries of forest vegetation zones and changes of forest vegetation under conditions of global warming are needed to improve the system of evaluation of the forecast of forests and adaptation of forest vegetation in forest management in a changing climate as well as to predict the productivity, species composition and biodiversity of forest ecosystems.

Key words: climate change, forest boundaries, forest vegetation zone, permafrost, adaptation

Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата

В.Г. Сергиенко

Статья посвящена анализу литературных данных, содержащих результаты многолетних исследований влияния изменения климата на динамику границ лесорастительных зон и лесные биогеоценозы. Приводится обзор динамики границ лесорастительных зон на северном пределе в экотоне тундра–лес и в субальпийском поясе высокогорий в европейской части России и Западной Сибири. Проанализированы обратные связи, возникающие между лесной растительностью и атмосферой при текущих и будущих изменениях климата в криолитозоне, высотных поясах гор и таежной зоне бореальных лесов. Приведены данные о колебании северного предела лесной растительности при термическом максимуме голоцена и за последние 100 лет. На основе сопоставления ритмов изменения климата исследован прогноз смещения границ различных климатических и лесорастительных зон.

Климат является важным фактором, влияющим на трансформацию лесных экосистем, которая выражается в изменении структуры и породного состава лесов, хода роста, продуктивности и других характеристик древостоев. Наблюдения за динамикой границ лесорастительных зон и лесной растительности в условиях глобального потепления климата необходимы для совершенствования системы оценки состояния лесов и адаптации лесной растительности при ведении лесного хозяйства в изменяющихся климатических условиях, а также для оценки наиболее вероятных изменений в продуктивности, породном составе и биоразнообразии лесных экосистем.

Ключевые слова: изменение климата, граница леса, лесорастительная зона, криолитозона, адаптация

Сергиенко Валерий Гаврилович, ст. науч. сотр. научно-исследовательского отдела использования лесов, канд. биол. наук

ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
194021, Санкт-Петербург, Институтский пр., 21
Телефон: 8 (812) 552-79-49
E-mail: valerysergienko@mail.ru

Введение

Одной из центральных проблем исследований в современных условиях остается изучение многофункционального влияния разнообразных природных и антропогенных факторов глобального изменения климата на виды и сообщества организмов, их динамику, эволюционные процессы, последствия техногенного загрязнения среды и структурную организацию лесных экосистем [1]. Современные тенденции климатогенных изменений лесного покрова проявляются и изучены в основном в сфере изменений границ ареалов многих видов растительного покрова [11]. Результатом последствий глобального потепления предполагается смещение границы лесной зоны на север, а в горах — верхней границы лесов в альпийский пояс [10]. Особое значение такие воздействия имеют для высоких и средних широт Северного полушария. Здесь глобальное потепление проявится особенно сильно. По модельным расчетам температура атмосферы наиболее значительно повысится именно на этой территории.

В последнее время большое внимание уделяется проблемам глобального изменения климата, которое с неизбежностью будет приводить к всеобъемлющим нарушениям в биосфере, в том числе в ландшафтообразующих процессах и в конечном итоге в облике ландшафтов и растительного покрова территории. Возможный отклик на это оценивается чувствительностью лесных экосистем, под которой понимается его способность реагировать на воздействия внешних факторов. При этом необходимо иметь в виду, что даже на одни и те же изменения климата различные элементы биоты отзываются по-разному. Их реакция различается как в качественном, так и в количественном отношении. Изменения климата анализируются в важнейших показателях возможного колебания параметров температурного режима и увлажнения, а основные проявления чувствительности природных территорий — в трансформации структуры, свойств и в целом условий существования биоты.

Разными авторами предложены возможные сценарии динамики растительного покрова при изменении климата и обратные связи взаимодействий между растительным покровом и климатом. Были исследованы последствия изменения климата для реорганизации растительности на зональном, видовом и популяционном уровнях. Несмотря на значительные успехи в разработке более полных численных адаптационных моделей с учетом главных компонентов системы «атмосфера-гидросфера-литосфера-криосфера-биосфера» параметризация динамики биосферы по-прежнему остается недостаточно изученной. Важными вопросами в изучении последствий изменения климата в лесных экосистемах являются следующие: какова была трансформация лесного покрова в прошлом, как это воздействие выражено в настоящее время и что будет происходить в будущем, в какой степени леса влияют на это и возможно ли бороться с глобальным изменением климата за счет управления лесами с помощью мероприятий по адаптации и смягчению климатической безопасности в лесном секторе экономики [12, 25].

Результаты анализа динамики границ лесорастительных зон Европейского Севера и Западной Сибири

Современное изменение климатических характеристик вызывает смещение ареалов видов, в основном, двух типов — «на север» и «вверх» — в горных местностях. Уменьшение или увеличение площади лесообразующих пород, может привести к перемещению биомов и лесорастительных зон в горах — в результате продвижения деревьев и кустарников в тундру или альпийские луга из прилежащих биомов или лесорастительных зон. Положение границы между бореальным лесом и тундрой в основном контролируется температурой в течение вегетационного периода и годовыми осадками.

В XX в. усиление процесса лесовозобновления и увеличение сомкнутости древостоев на верхнем пределе произрастания

древесной растительности были отмечены в различных регионах мира [32, 33]. В современную эпоху климатогенные изменения наиболее ярко проявляются на северном пределе распространения леса в высокоширотных и высокогорных районах севера европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири. Это подтверждено результатами изучения лесовозобновления на верхней и нижней границах леса в различных районах Северной Европы – на севере Швеции [34, 35], Полярном [6, 28-29], Приполярном [5], Северном [7, 17] и Южном Урале [16], на Кольском полуострове в Хибинах, в бассейне р. Териберки [13, 15], а также в Сибири – на Ямале [21], Таймыре, Енисейском Кряже, в горах Западного Саяна [4, 22, 23].

В этих и других регионах отмечено локальное продвижение леса вверх по склонам. В анализе временной динамики экотона как лесотундры, так и тайги использованы методы повторных ландшафтных фотографий, космические снимки высокого разрешения и дендрохронологический метод отклика лесных экосистем на изменение климата. Полученные с применением этих методов данные свидетельствуют о высокой степени зависимости трансформаций в структуре растительных сообществ в пределах переходной зоны между тундрой и тайгой – лесотундровой зоны (экотона тундра-тайга) и высотной границы леса в средне- и высокогорных районах (экотона субальпийско-альпийские луга) от изменений климатических характеристик.

На севере ЕТР имеется целый ряд изолированных лесных островов в тундровой зоне Восточной Европы в бассейнах рек Море-Ю, Ортина, Адзьва Большеземельской тундры, которые могут служить индикаторами изменений климата [18, 20]. Была проведена оценка изменения еловых древостоев (*Picea obovata*) за последние 100 лет в лесных островах Медвежий (Ошдимыльк) и в термальных урочищах Пымвашор и Дэршор востока Большеземельской тундры (бассейн р. Адзьвы) на основе метода повторных ландшафт-

ных фотографий (фотоснимки 1909 и 2010 гг.). Все островные ельники востока Большеземельской тундры являются разновозрастными и типологически представлены различными вариантами ерниковых еловых сообществ. Эти лесные острова еще не вполне трансформировались в лесные фитоценозы и представляют собой редколесья и редины на месте ерниковых и горных тундр. В районе лесных островов отмечено увеличение высоты кустарниковых пород (ивы, березы извилистая и карликовая). На месте моховых тундр образовались густые ерниковые заросли. За минувшие 100 лет произошло существенное расширение по площади лесных островов, значительное увеличение густоты и высоты древостоя, формирование сомкнутых лесных сообществ и редколесий на месте редин [3]. Эти сведения согласуются с данными для других регионов ЕТР.

По наблюдениям, за последние 45 лет происходило интенсивное расселение древесной и кустарниковой растительности в горные тундры Полярного Урала, в результате чего верхняя граница леса поднялась и возросла степень облесенности территории [31]. Значительно увеличилась густота, сомкнутость и продуктивность древостоев. Таким образом, на верхней границе леса на Полярном Урале отмечен подъем по склонам гор древесной и кустарниковой растительности в пояс горных тундр. Верхняя граница распространения лиственничных редколесий и сомкнутых древостоев из *Larix sibirica* за последние 80-90 лет повысилась в среднем на 35-40 м (а в максимуме – на 50-80 м).

На рисунке 1 показаны геоботанические карты распределения лесотундровых сообществ на верхней границе древесной растительности на Полярном Урале в начале 1910 и 2000 годов. За прошедшие 90 лет, для которых была типична положительная тенденция климатических условий для произрастания древесной растительности, происходила интенсивная ее экспансия в горные тундры [27].

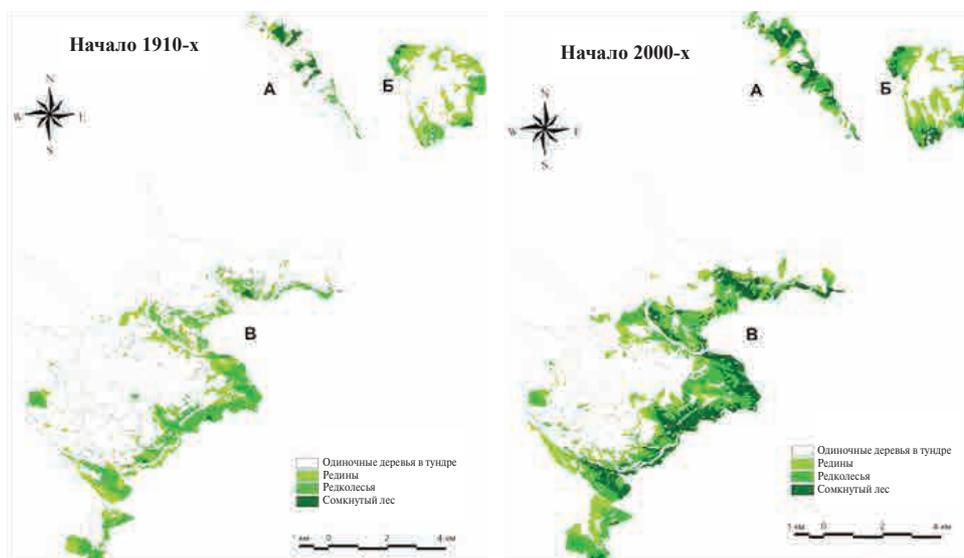


Рис. 1. Распределение различных категорий лесотундровых сообществ на верхней границе древесной растительности на Полярном Урале в начале 1910 и 2000 годов: А – северо-восточный склон массива Рай-Из, Б – гора Сланцевая, В – юго-восточный склон массива Рай-Из и подножие горы Черной [27].

На основе разновременных ландшафтных фотоснимков, сделанных с одних и тех же точек в горах Приполярного (на примере хребта Сабля) и Полярного Урала, выявлено, что за исследуемый 90-летний период произошло существенное увеличение густоты, сомкнутости, а также смещение верхней границы древесной растительности вдоль высотного градиента. Эти результаты показывают, что экотон верхней границы леса в горах Урала значительно изменился в течение XX в. Лиственница продвинулась в ранее безлесную тундру. В 1920-е годы форма роста большинства существовавших деревьев лиственницы сменилась со стланиковой на многоствольную и началось массовое появление одноствольных деревьев. Смене формы роста лиственницы и экспансии леса в тундру в XX в. благоприятствовало изменение климата, так как зимы стали теплее и многоснежнее за счет удвоения количества зимних осадков [5, 6].

В средневысотных горных массивах Северного Урала в тундре подгольцового пояса на каменистых россыпях изучены состав и струк-

тура древостоев на верхнем пределе их распространения. С середины XIX столетия произошло существенное (около 100 м высоты) поднятие верхнего предела произрастания древостоев различной сомкнутости, а их формирование началось еще в конце XVIII в. Безлесные пространства стали заселяться *Larix sibirica* и *Picea obovata*, а в конце XIX в. – березой извилистой (*Betula tortuosa*). Анализ метеоданных с этого времени по настоящее время указывает на потепление и повышение влажности климата, приведшие к увеличению длины вегетационного периода и уменьшению суровости зимы, то есть на благоприятные условия, способствующие экспансии древесной растительности на безлесные территории [7, 17]. Таким образом, в течение последних 90 лет на Полярном [29] и Южном Урале [16] произошло продвижение верхней границы древостоев – в виде сомкнутых лесов и редколесий – выше в горы на 30-80 м, а на Северном Урале даже на 100 м [17].

Экспансия лиственницы сибирской в зону тундры отмечается и на севере Западной Сибири. Динамика лиственничного лесного острова

Ары-Мас в бассейне р. Хатанги исследована методом сопоставления разновозрастных космических снимков в 1955-2000 годах [22]. Установлено, что за 45 лет произошло увеличение сомкнутости древостоев, а также их продвижение в тундру со скоростью 3-10 м/год. Причиной таких изменений является возрастание температуры воздуха и глубины оттаивания почвогрунтов.

Отмечено продвижение лиственницы и формирование возрастных поколений на полярной границе леса на п-ове Ямал. Исследована возрастная структура древостоев в редколесьях вблизи полярной границы леса с 1880 по 1980 г. в зависимости от времени их появления. Выявлены два возрастных поколения лиственницы, сформировавшиеся с 1900 по 1935 г. и с 1950 по 1970 г. Сравнение полученных результатов с данными инструментальных наблюдений за температурой и осадками показало, что возникновение новых поколений лиственницы в значительной степени определяется температурой воздуха июля в первые годы жизни подроста, когда он достигает высоты 10-20 см [21].

Аналогичные процессы с поднятием верхнего предела произрастания древостоев различной сомкнутости в растительности экотона тундра-тайга, начиная с середины XIX в., были выявлены во многих горных и тундровых регионах Северной Европы, что связано с условиями современного изменения климата в сторону потепления. Это повлияло на вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов. В горах Скандинавии по мониторинговым наблюдениям было обнаружено возрастание численности сосны и её внедрение в горную лесотундру. Продвижение сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) выше верхней границы леса на севере Швеции [34, 35] и лиственных кустарников вверх по склону на 50 м и более зафиксировано также на Кольском полуострове для Хибин. Активный рост кустарниковой растительности, в особенности ив, наблюдается в восточно-европейских тундрах [13].

Динамика северной границы леса и состояние растительности экотона тундра-тайга на Кольском полуострове и в Швеции исследованы по разновременным космическим снимкам со спутника Landsat в 1986 и 2005 гг. На основе спутникового мониторинга вегетационного индекса или индекса фотосинтетической активности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который позволяет связать изменение вегетации растительности с теплообеспеченностью, выявлено увеличение продуктивности. Она выражается в сомкнутости редколесий, загущении кустарничковой растительности в тундре и лесотундре, продвижении её в лишайниковую тундру и зарастании болот древесно-кустарниковыми породами на Кольском полуострове, а также в появлении сосны обыкновенной выше верхней границы леса на севере Швеции [13, 35]. Определено, что за период 1982-2008 гг. в целом по Арктике теплообеспеченность увеличилась на 21%, а индекс NDVI вырос на 7% [2].

Анализ обратных связей между растительным покровом и изменением климата

Проанализированы возможные обратные связи, возникающие между растительностью и атмосферой при текущих и будущих изменениях климата. При этом положительной обратной связью называется та, которая усиливает эффект потепления, и отрицательной, которая его ослабляет или меняет на противоположный [24].

В зоне тундры, помимо смещения границ лесной растительности, происходит быстрая деградация зоны многолетнемерзлых пород [26]. Прогнозируемое нарушение соотношения площадей лесорастительных зон вызовет изменение альбедо большой по площади территории тундры — одного из главных факторов климатической системы. На многих участках криолитозоны происходит повышение температуры верхнего слоя многолетнемерзлых грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания, что приводит к деградации многолетней мер-

злоты и увеличению выбросов парникового газа метана и, в свою очередь, — к потеплению на территории прибрежных зон Северного Ледовитого океана в будущем. Сокращение площади тундры и лесотундры приведет к уменьшению альбедо на севере, что вызовет в регионе дополнительное потепление (положительная обратная связь). Для растительности тундры пороговой является температура воздуха 14 °С, выше которой фотосинтез у растений подавляется, а дыхание усиливается [25].

При глобальном потеплении углеродный баланс тундр трансформируется из слабого стока в существенный источник углерода, что приведет к дополнительной эмиссии CO₂ в атмосферу и будет способствовать дальнейшему потеплению, с которым связывают катастрофические выбросы метана из болот субарктических районов Западной Сибири — их объем составляет четверть мирового. Таяние северных болот на вечной мерзлоте в Субарктике также может привести к быстрому и непосредственному освобождению большого количества метана замерзших болот в атмосферу. При иссушении болот метан окисляется и поступает в виде углекислого газа в атмосферу, а из обводненных болот — прямо в атмосферу [31]. Учитывая, что тепличный эффект метана в 20 и более раз сильнее, чем углекислого газа, обратные положительные связи между болотами в зоне вечной мерзлоты и атмосферой будут достаточно существенными и могут стать причиной необратимых процессов таяния мерзлоты.

В лесной зоне пожары, вероятно, станут главным фактором, контролирующим экологические процессы в бореальной зоне, и механизмом, с помощью которого леса будут продвигаться к состоянию равновесия с климатической системой [25]. Поскольку бореальные леса занимают огромные территории в обоих полушариях, изменение площадей — лесных и нелесных, разного породного состава (лиственных, хвойных, в том числе темно- и светлохвойных) — вызванное пожарами, будет влиять на суммарное альбедо региона, а оно, в свою очередь, — на формирование обратных связей.

Например, увеличение площади молодняков, возобновляющихся на горячих, приведет к региональному охлаждению, а увеличение темнохвойного подроста в лиственничниках вызовет уменьшение альбедо в течение большей части года, когда лиственница остается без хвои, что может стать причиной регионального потепления в южной части Сибири [14, 23].

Таяние мерзлоты, с одной стороны, ведет к улучшению лесорастительных условий, а с другой — к болотообразованию и увеличению эмиссии метана. Эти проблемы тесно связаны с адаптацией местообитаний растительности и животных к экстремальным условиям при глобальном изменении климата, который воздействует на биоту и природные экосистемы [8]. Отступление мерзлоты и частые пожары усиливают солифлюкцию и термокарстовые явления на больших площадях, что приводит к нарушению баланса между лесорастительными условиями и самим существованием леса. Под влиянием усиления штормовых ветров при потеплении климата, особенно в условиях таяния мерзлоты в криолитозоне, должна увеличиться вероятность ветровалов, что вызовет накопление мертвых деревьев и их разложение, обусловив на долгие годы обратную положительную связь. В болотных экосистемах лесной зоны может понизиться стояние вод, что приведет к линейному росту эмиссии углекислого газа. Увеличение стока северных рек, отмеченное в последнее время, может быть вызвано также деградацией вечной мерзлоты. Возросший приток пресной воды в Северный Ледовитый океан уменьшает его соленость и, соответственно, изменяет циркуляцию океанических течений.

Колебание границы леса и лесные ритмы в позднеледниковый период

Формирование ареалов основных лесорастительных зон — длительный инерционный процесс, требующий не одного десятилетия. Поэтому как для определения климатических границ, так и для восстановления современных ареалов лесорастительных зон необходимо ис-

следование динамики растительности в течение достаточно продолжительного времени.

Миграция лесообразующих пород является следствием процесса смен климатических условий при таянии последнего ледникового покрова на северо-западе Европы. Это повлияло на динамику приполярного предела лесов и на смещение зональных рубежей растительного покрова. Современная растительность тундровой, лесотундровой и таежной зон этого региона сформировались аллохтонно в послеледниковое время в голоцене в результате нескольких миграционных волн.

Доказано, что в одну из теплых фаз послеледникового времени древесная растительность продвигалась значительно дальше на север, чем в настоящее время. На промежуток от 7 до 5 тыс. лет назад приходится наиболее теплый и влажный период голоцена [30]. Температуры были на 2-3 °С выше, чем в середине XX в. Север ЕТР был покрыт тайгой (рис. 2), простиравшейся от Северного Ледовитого океана до линии Великий Новгород—Пермь, южнее находились широколиственные и смешанные леса. К югу от линии Киев—Саратов леса сменялись лесостепью и степями.



Рис. 2. Растительность Европы 5000 лет назад в теплый и влажный период голоцена [30]

Следы «термического максимума голоцена» обнаруживаются в виде остатков древесины, шишек, ископаемой пыльцы древесных пород в торфяниках тундровой зоны. Имеются также указания на то, что в прошлом леса заходили в горы значительно (на 100-200 м) выше, чем теперь. Затем наступило очередное похолодание, вызвавшее регрессию полярной и вертикальной границ леса.

В современный период регрессия в Уральских горах, очевидно, продолжалась и в начале прошлого столетия. Можно предположить несколько различных объяснений причин отмирания лесных опушек на их верхнем пределе:

- проявление результата ухудшения климата;

- верхняя граница леса в горах скачкообразно смещается в связи с циклическими колебаниями климата (продолжительность цикла 140-160 лет). В холодные периоды, длящиеся 70-80 лет, лесовозобновление прекращается, горные мелколесья на их верхней кромке погибают, а граница леса снижается;

- происходящее в настоящее время поднятие Урала, и связанное с этим изменение климата горных вершин, усиление эрозии, смыв мелкозема и оголение каменистого субстрата.

В начале прошлого столетия признаки массового отмирания лесов на их верхнем пределе отмечались лишь в северной части Уральского хребта (Полярный, Приполярный и отчасти Северный Урал). Никто из исследователей расти-

тельности Среднего и Южного Урала таких данных не приволил. Напротив, в южной части Северного Урала, на Среднем и Южном Урале не было встречено ни одного участка мелколесий на их верхнем пределе, где на более или менее значительной площади обнаруживалось бы катастрофическое их отмирание, выражавшееся в гибели большого числа деревьев. Отмершие старые деревья на верхней границе леса встречаются лишь единично, причем возраст их приближается к предельному сроку существования этих пород в высокогорьях. Участки отмерших горных мелколесий впервые появляются в северной части Северного Урала, а также на Приполярном и Полярном Урале, причем при движении к северу частота их встречаемость и занимаемая ими площадь возрастают.

В пользу гипотезы об отмирании лесов на верхнем пределе их распространения в связи с ухудшением климата высказывались исследователи, работавшие на Урале в XIX столетии и в течение первых трех десятилетий XX в. С конца тридцатых годов стали поступать прямо противоположные данные об активизации лесной растительности на верхнем пределе ее распространения и о смещении границы леса вверх, что указывает на изменение климата в сторону потепления [5-7, 17, 29].

Наиболее надежными сведениями для суждения о динамике верхнего предела леса являются фактическими материалы, которые характеризуют следующие параметры:

- колебания прироста деревьев, растущих близ верхней границы леса;
- возрастная структура горных мелколесий;
- естественное возобновление в подгольцовых мелколесьях и в прилегающей к ним полосе горнотундрового пояса.

Прогноз смещения границ лесорастительных зон

Анализ ритмов изменения климата [27] показал, что вторая половина XIX и первые три четверти XX вв. представляли, по сути, переходный период от «малой ледниковой эпохи» к современному потеплению. Среднегодовая

температура за это время перешла из холодной области в тёплую, но потеплели пока только зимы. Изменение климата будет благоприятно влиять на восстановление потерянной в начале голоцена площади нетронутых лесов гумидной зоны (с более влажным климатом по сравнению с другими зонами) и крайне неблагоприятно – на леса аридной зоны с засушливым климатом. В гумидной зоне станет ещё влажнее и теплее, в аридной – теплее и суше. В связи с глобальным изменением зональная граница бореальных лесов сместится к северу на 190-250 км. Высотный пояс лесов в горах степной и лесостепной зоны поднимется на 250-330 м. В условиях современного потепления основная ответственность за сохранение бореальных лесов Северного полушария ложится на Россию, Канаду и США, где находятся главные рефугиумы нетронутых хвойных лесов.

Таким образом, при дальнейшем потеплении в XXI в. границы лесорастительных зон, как правило, будут сдвигаться к северу. При этом на ЕТР лесная зона будет расширяться как к северу, так и, возможно, при гумидном потеплении (увеличении температуры и влажности) – к югу. Однако в случае аридного потепления (с уменьшением влажности) к концу XXI в. здесь может возрасти вероятность повышения засушливости в лесостепи, степи, полупустыне. В случае развития такого сценария изменения климата более сухими станут степи Краснодарского края и Ростовской области, что неминуемо приведет к трансформации лесных экосистем на севере региона и увеличению площади лесостепей.

Для засушливых земель степной зоны России характерна цикличность процессов опустынивания, обусловленная меняющейся интенсивностью антропогенной нагрузки и частотой опасных засух. Потенциальные перемены в будущем могут привести к расбалансированию межвидовых взаимодействий в экосистемах, изменению границ разных лесорастительных зон и высотных поясов в горах, а также нарушению структуры лесных экосистем [10].

Практически почти вся территория России расположена в высоких и средних широтах, и большую ее часть занимает область многолетней мерзлоты, поэтому проблема адаптации к климатическим изменениям является особенно актуальной. Для прогноза возможных сценариев была предложена эмпирико-статистическая модель растительности, которая может быть полезна в свете решения задачи адаптации природной среды и общества к происходящим из-

менениям климата [2]. Для проверки адекватности этой модели значения биоклиматических индексов, рассчитанные по данным метеорологического архива CRU-2 (Tyndall Centre for Climate Change Research, UK) за базовый период 1901-1980 гг. были проинтерполированы в сетку с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе, после чего было воспроизведено современное распределение лесорастительных зон для России (рис. 3).

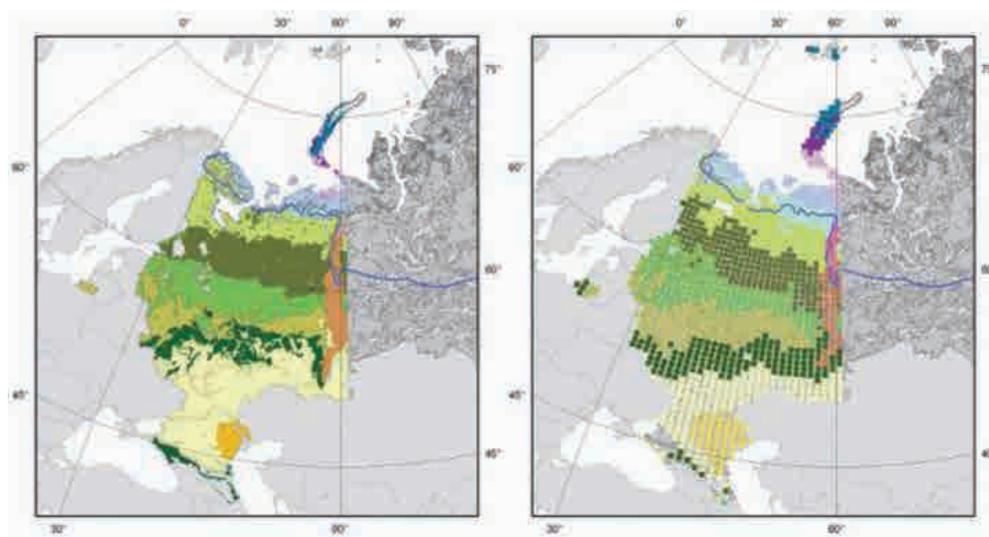


Рис. 3. Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для европейской части России [2]

Применяя эмпирико-статистическую модель растительности были построены прогностические карты растительности России для четырех 30-летних периодов 2001-2030, 2016-2045, 2031-2060 и 2066-2095 гг. при глобальном потеплении на уровне $+2^\circ\text{C}$ по отношению к доиндустриальному периоду. В используемой схеме для одного из наиболее жестких сценариев эмиссии парниковых газов А2 этот уровень потепления будет достигнут в период 2031-2060 г. На рисунке 4 представлены прогностические карты растительности для периодов 2016-2045 и 2031-2060 гг. Слева на карте – прогноз растительной зональности. Справа – территории, попадающие к рассматриваемым периодам в область критического уровня воздей-

ствия, где прогнозируются изменения типа растительности по сравнению с современным периодом. Видно, что к середине столетия изменение климата может полностью охватить огромное пространство от южных границ России до арктического побережья и привести к смене экосистем на большей части бореальной зоны ЕТР и Сибири [2].

Основной целью адаптации является сохранение биосистемной и социально-экономической устойчивости и этнокультурной стабильности [2]. Оценки соответствующих критических уровней целесообразно положить в основу разрабатываемой стратегии адаптации. Расчет этих уровней позволит придать стратегии упреждающий характер.

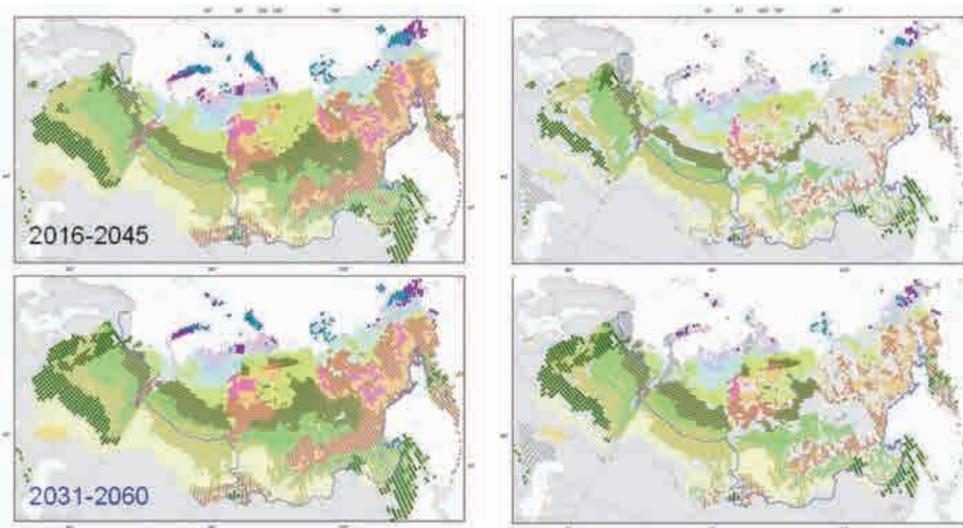


Рис. 4. Прогноз лесорастительной зональности на 2016-2045 и 2031-2060 гг.[2]: слева – общая картина, справа – масштаб изменений

Заключение

Отмечаемые в настоящее время и прогнозируемые на ближайшие десятилетия повышение содержания углекислого газа и метана в атмосфере и потепление приведут к серьезным изменениям в таежных и тундровых экосистемах России – смещению границ лесорастительных зон. В XX в. уже выявлены тенденции динамики границ лесорастительных зон на северной и высотной границах леса. Показано, что изменения климата, имевшие место в последнее столетие, пока не стали в России ведущим фактором трансформации окружающей среды. Изучение динамики границ лесорастительных зон и адаптации лесной растительности за рассматриваемый период необходимо для прогнозирования продуктивности, породного состава и биоразнообразия лесных экосистем.

Для тундровых и лесотундровых фитоценозов больших изменений продуктивности не ожидается, но на северном пределе распространения леса отмечено продвижение древесной растительности в виде редколесий и кустарников в пояс горных тундр Хибин, Урала и других приполярных возвышенностей, а также в зону тундры Западной Сибири. В целом ожидается увеличение первичной биологической продукции в до-

статочно протяженном поясе умеренных широт. Разработан прогноз возможных последствий деградации многолетнемерзлых пород по изменению запаса углекислого газа и метана в верхних горизонтах криолитосферы в Западной Сибири.

На основании прогнозных ландшафтно-экологических сценариев глобального изменения климата для территории ЕТР рассчитаны вероятные зависимости первичной биопродуктивности от изменений климата и уровня антропогенного загрязнения. Для засушливых земель характерна цикличность процессов опустынивания, обусловленная меняющейся интенсивностью антропогенной нагрузки и частотой опасных засух.

Глобальное изменение климата является важным фактором, влияющим на трансформацию лесных экосистем, которая выражается в изменении структуры и породного состава лесов, хода роста, продуктивности, и других характеристик древостоев, а также биоразнообразия лесных экосистем. Наблюдения за динамикой границ лесорастительных зон в условиях потепления климата необходимо для совершенствования системы оценки прогнозного состояния лесов и лесной растительности при ведении лесного хозяйства в изменяющихся климатических условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, В.М. Реакция лесов на изменение климата / В.А. Алексеев, А.В. Константинов, Д.С. Бурцев // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013. Матер. III Межд. науч.-практ. конф., 22-24 мая 2013 г. Санкт-Петербург, ФБУ «СПбНИИЛХ». Ч. 1. СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. – С. 30-39.
2. Анисимов, О.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, С.А. Ренева // Метеорология и гидрология, 2011. – № 11. – С. 31-41.
3. Болотов, И.Н. Изменения древостоев в изолированных лесных островах на востоке Большеземельской тундры за последние 100 лет в условиях меняющегося климата / И.Н. Болотов, М.В. Сурсо, Б.Ю. Филиппов [и др.] // Известия вузов. Лесной журнал. – 2012. – № 5. – С. 30-37.
4. Бочкарев, Ю.Н. Возможности использования дендрохронологического метода для оценки динамики экосистем / Ю.Н. Бочкарев // Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции. – М., 2006. – С. 45-60.
5. Григорьев, А.А. Динамика верхней границы растительности в высокогорьях Приполярного Урала под влиянием климата / А.А. Григорьев, П.А. Моисеев, З.Я. Нагимов // Экология. – 2013. – № 4. – С. 284-295.
6. Дэви, Н.М. Изменение экотона верхней границы леса в горах Полярного Урала в XX веке / Н.М. Дэви, В.С. Мазепа // Новые методы в дендрэкологии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Иркутск, 10-13 сент., 2007. – Иркутск. – 2007. – С. 178-180.
7. Капралов, Д.С. Изменения в составе, структуре и высотном положении мелколесий на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала / Д.С. Капралов, С.Г. Шиятов, П.А. Моисеев, В.В. Фомин // Экология. – 2006. – № 6. – С. 403-409.
8. Карелин, Д.В. Углеродный обмен в криогенных экосистемах / Д.В. Карелин, Д.Г. Замолотчиков // Отв. ред. А.С. Исаев. – М.: Наука. – 2008. – 344 с.
9. Кашкаров, Е.П. Глобальное потепление климата: ритмическая основа прогноза и её практическое значение в охране лесов Северного полушария / Е.П. Кашкаров, О.А. Поморцев // Хвойные борельной зоны. – 2007. – Т. XXIV. – № 2-3. – С. 207-216.
10. Кислов, А.В. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления климата XXI века / А.В. Кислов, В.М. Евстигнеев, С.М. Малхазова [и др.]. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 292 с.
11. Кокорин, А.О. Изменение климата / А.О. Кокорин, Е.В. Смирнова, Д.Г. Замолотчиков – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013. – 220 с.
12. Константинов, А.В. Методология оценки уязвимого лесного сектора экономики в условиях изменения климата / А.В. Константинов // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. – СПб. – 2014. – № 3. – С. 73-77.
13. Кравцова, В.И. Динамика растительности экотона тундра – тайга на Кольском полуострове в связи с климатическими колебаниями / В.И. Кравцова, А.Р. Лошкарева // Экология. – 2013. – № 4. – С. 275-283.
14. Миронов, А.Г. Динамика лесных экосистем юга Средней Сибири в условиях изменяющегося климата и активации биотического воздействия / А.Г. Миронов. Автореф. дис. ...канд. с.-х. наук. – Красноярск, 2007. – 23 с.
15. Михеев, А.И. Исследование верхней границы леса по аэрокосмическим фотоснимкам / А.И. Михеев // Геодезия и картография. – 2011. – № 1. – С. 31-36.
16. Моисеев, П.А. Влияние изменения климата на формирование поколений ели сибирской в подгольцовых древостоях Южного Урала / П.А. Моисеев, М. Ван дер Мейер, А. Риглинг, И.Г. Шевченко // Экология. – 2004. – № 3. – С. 1-9.

17. Моисеев, П.А. Изменение климата и динамика древостоев на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала / П.А. Моисеев, А.А. Бартыш, З.Я. Нагимов // *Экология*. – 2010. – № 6. – С. 432-443.
18. Русанова, Г.В. Почвы реликтовых островков ели на северо-западе Большеземельской тундры / Г.В. Русанова, С.В. Денева // *Лесоведение*. – 2006. – № 2, – С. 21-25.
19. Семенов, С.М. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Изменения климата / С.М. Семенов. – М., 2008. – 288 с.
20. Сурсо, М.В. Особенности роста и развития хвойных в Большеземельской тундре. Ель в урочище Пымвашор / М.В. Сурсо, О.С. Барзут // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. – 2010. – № 5.– С. 42-48.
21. Хантемиров, Р.М. Изменения климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале / Р.М. Хантемиров, А.Ю. Сурков, Л.А. Горланова // *Экология*. – 2008. – № 5 – С. 323-328.
22. Харук, В.И. Проникновение вечнозеленых хвойных деревьев в зону доминирования лиственницы и климатические тренды / В.И. Харук, М.Л. Двинская, К.Дж. Рэнсон, С.Т. Им // *Экология*. – 2005. – № 3. – С. 186-192.
23. Харук, В.И. Древесная растительность экотона лесотундры Западного Саяна и климатические тренды / В.И. Харук, М.Л. Двинская, С.Т. Им, К.Д. Рэнсон // *Экология*. – 2008. – № 1. – С. 10-15.
24. Чебакова, Н.М. Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата / Н.М. Чебакова, Дж. Рейфельдт, Е.И. Парфенова // *Сибирский экологический журнал*. – 2003. – № 6. – С. 677-686.
25. Чебакова, Н.М. Возможности трансформации растительного покрова Сибири при различных сценариях изменения климата / Н.М. Чебакова. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Красноярск, 2006. – 60 с.
26. Шварцман, Ю.Г. Изменения климата и их влияние на окружающую природную среду Европейского Севера России / Ю.Г. Шварцман, И.Н. Болотов, С.А. Игловский // *Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. VI. Изменение климата: влияние наземных и земных факторов*. М.: ИФА РАН. – 2008. – С. 80-98.
27. Шестое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола / Под общ. ред. А.В. Фролова. – М.: Росгидромет, 2013. – 281 с.
28. Шиятов, С.Г. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале / С.Г. Шиятов, М.М. Терентьев, В.В. Фомин, Н.Е. Циммерман // *Экология*. – 2007. – № 4. – С. 243-248.
29. Шиятов, С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата / С.Г. Шиятов – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 216 с.
30. Adams, J.M. Global land environments since the last interglacial. Oak Ridge National Laboratory, TN, USA. / J.M. Adams. 1997. Режим доступа: <http://www.esd.ornl.gov/ern/gen/nerc.html> (Дата обращения: 15.12.2014).
31. Arctic Research Consortium of the United States. 2005. – Режим доступа: www.arcus.org (Дата обращения: 10.02.2014).
32. Batlori, Enric. Regional tree line dynamics in response to global change in the Pyrenees / Enric Batlori, Emilia Gutierrez // *J. Ecol.* – 2008. – Vol. 96. – № 6. – P. 1275-1288.
33. Harsch, M.A. Are treelines advancing? F global meta-analysis of treeline response to climate warming / M.A. Harsch, P.E. Hulme, M.S. McGlone, R.P. Dunca // *Ecology Letters*. – 2009. – № 12. – P. 1040–1049.
34. Kullman, L. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes / L. Kullman // *J. of Ecology*. – 2002. – Vol. 90. – P. 68-77.

35. Kullman, L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology / L. Kullman // *J. of Ecology*. – 2007. – Vol. 95. – P. 41-52.

REFERENCES

1. Alekseyev, V.M. Reaktsiya lesov na izmeneniye klimata / V.A. Alekseyev, A.V. Konstantinov, D.S. Burtsev // *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaystve* – 2013. Mater. III Mezhd. nauch.-prakt. konf., 22-24 maya 2013 g. Sankt-Peterburg, FBU «SPbNIILKh». Ch. 1. SPb.: SPbNIILKh, 2013. – S. 30-39.
2. Anisimov, O.A. Otsenka kriticheskikh urovney vozdeystviya izmeneniya klimata na prirodnye ekosistemy sushy na territorii Rossii / O.A. Anisimov, Ye.L. Zhiltsova, S.A. Reneva // *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011. – № 11. – S. 31-41.
3. Bolotov, I.N. Izmeneniya drevostoyev v izolirovannykh lesnykh ostrovakh na vostoche Bolshezemelskoy tundry za posledniye 100 let v usloviyakh menyayushchegosya klimata / I.N. Bolotov, M.V. Surso, B.Yu. Filippov [i dr.] // *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*. – 2012. – № 5. – S. 30-37.
4. Bochkarev, Yu.N. Vozmozhnosti ispolzovaniya dendrokronologicheskogo metoda dlya otsenki dinamiki ekosistem / Yu.N. Bochkarev // *Antropogennyye izmeneniya ekosistem Zapadno-Sibirskoy gazonosnoy provintsii*. – M., 2006. – S. 45-60.
5. Grigoryev, A.A. Dinamika verkhney granitsy rastitelnosti v vysokogoryakh Pripolyarnogo Urala pod vliyaniem klimata / A.A. Grigoryev, P.A. Moiseyev, Z.Ya. Nagimov // *Ekologiya*. – 2013. – № 4. – S. 284-295.
6. Devi, N.M. Izmeneniye ekotona verkhney granitsy lesa v gorakh Polyarnogo Urala v XX veke / N.M. Devi, V.S. Mazepa // *Novyye metody v dendroekologii: Materialy Vserossyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Irkutsk, 10-13 sent., 2007*. – Irkutsk. – 2007. – S. 178-180.
7. Kapralov, D.S. Izmeneniya v sostave, strukture i vysotnom polozhenii melkolesy na verkhnem predele ikh proizrastaniya v gorakh Severnogo Urala / D.S. Kapralov, S.G. Shiyatov, P.A. Moiseyev, V.V. Fomin // *Ekologiya*. – 2006. – № 6. – S. 403-409.
8. Karelin, D.V. Uglerny obmen v kriogennykh ekosistemakh / D.V. Karelin, D.G. Zamolodchikov // *Otv. red. A.S. Isayev*. – M.: Nauka. – 2008. – 344 s.
9. Kashkarov, Ye.P. Globalnoye potepleniye klimata: ritmicheskaya osnova prognoza i eyo prakticheskoye znachenie v okhrane lesov Severnogo polushariya / Ye.P. Kashkarov, O.A. Pomortsev // *Khvoynyye borealnoy zony*. – 2007. – T. XXIV. – № 2-3. – S. 207-216. 10. Kislov, A.V. Prognoz klimaticheskoy resursoobespechennosti Vostochno-Evropeyskoy ravniny v usloviyakh potepleniya klimata XXI veka / A.V. Kislov, V.M. Yevstigneyev, S.M. Malkhazova [i dr.]. – M.: MAKS Press, 2008. – 292 s.
11. Kokorin, A.O. *Izmeneniye klimata* / A.O. Kokorin, Ye.V. Smirnova, D.G. Zamolodchikov – M.: Vsemirny fond dikoy prirody (WWF), 2013. – 220 s.
12. Konstantinov, A.V. Metodologiya otsenki uyazvimogo lesnogo sektora ekonomiki v usloviyakh izmeneniya klimata / A.V. Konstantinov // *Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaystva*. – SPb. – 2014. – № 3. – S. 73-77.
13. Kravtsova, V.I. Dinamika rastitelnosti zkotona tundra – tayga na Kolskom poluostrove v svyazi s klimaticheskimi kolebaniyami / V.I. Kravtsova, A.R. Loshkareva // *Ekologiya*. – 2013. – № 4. – S. 275-283.
14. Mironov, A.G. Dinamika lesnykh ekosistem yuga Sredney Sibiri v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata i aktivatsii bioticheskogo vozdeystviya / A.G. Mironov. Avtoref. dis. ...kand. s.-kh. nauk. – Krasnoyarsk, 2007. – 23 s.
15. Mikheyev, A.I. Issledovaniye verkhney granitsy lesa po aerokosmicheskim fotosnimkam / A.I. Mikheyev // *Geodeziya i kartografiya*. – 2011. – № 1. – S. 31-36.
16. Moiseyev, P.A. Vliyaniye izmeneniya klimata na formirovaniye pokoleny eli sibirskoy v podgoltsovykh drevostoyakh Yuzhnogo Urala / P.A. Moiseyev, M. Van der Meyer, A. Rigling, I.G. Shevchenko // *Ekologiya*. – 2004. – № 3. – S. 1-9.

17. Moiseyev, P.A. *Izmeneniye klimata i dinamika drevostoyev na verkhnem predele ikh proizrastaniya v gorakh Severnogo Urala* / P.A. Moiseyev, A.A. Bartysh, Z.Ya. Nagimov // *Ekologiya*. – 2010. – № 6. – S. 432-443.
18. Rusanova, G.V. *Pochvy reliktovykh ostrovkov eli na severo-zapade Bolshezemelskoy tundry* / G.V. Rusanova, S.V. Deneva // *Lesovedeniye*. – 2006. – № 2, – S. 21-25.
19. Semenov, S.M. *Otsenochny doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossyskoy Federatsii. T. II. Izmeneniya klimata* / S.M. Semenov. – M., 2008. – 288 s.
20. Surso, M.V. *Osobennosti rosta i razvitiya khvoynykh v Bolshezemelskoy tundre. Yel v urochishche Pymvashor* / M.V. Surso, O.S. Barzut // *Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik*. – 2010. – № 5.– S. 42-48.
21. Khantemirov, R.M. *Izmeneniya klimata i formirovaniye vozrastnykh pokoleny listvennitsy na polyarnoy granitse lesa na Yamale* / R.M. Khantemirov, A.Yu. Surkov, L.A. Gorlanova // *Ekologiya*. – 2008. – № 5 – S. 323-328.
22. Kharuk, V.I. *Proniknoveniye vechnozelenykh khvoynykh derevyev v zonu dominirovaniya listvennitsy i klimaticheskiye trendy* / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, K.Dzh. Renson, S.T. Im // *Ekologiya*. – 2005. – № 3. – S. 186-192.
23. Kharuk, V.I. *Drevesnaya rastitelnost ekotona lesotundry Zapadnogo Sayana i klimaticheskiye trendy* / V.I. Kharuk, M.L. Dvinskaya, S.T. Im, K.D. Renson // *Ekologiya*. – 2008. – № 1. – S. 10-15.
24. Chebakova, N.M. *Pereraspredeleniye rastitelnykh zon i populyatsy listvennitsy sibirskoy i sosny obyknovnoy v Sredney Sibiri pri poteplenii klimata* / N.M. Chebakova, Dzh. Reyfeldt, Ye.I. Parfenova // *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. – 2003. – № 6. – S. 677-686.
25. Chebakova, N.M. *Vozmozhnosti transformatsii rastitelnogo pokrova Sibiri pri razlichnykh stsenariyakh izmeneniya klimata* / N.M. Chebakova. Avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk. – Krasnoyarsk, 2006. – 60 s.
26. Shvartsman, Yu.G. *Izmeneniya klimata i ikh vliyaniye na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu Yevropeyskogo Severa Rossii* / Yu.G. Shvartsman, I.N. Bolotov, S.A. Iglovsky // *Izmeneniye okruzhayushchey sredy i klimata. Prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy. T. VI. Izmeneniye klimata: vliyaniye nazemnykh i zemnykh faktorov. M.: IFA RAN*. – 2008. – S. 80-98.
27. *Shestoye natsionalnoye soobshcheniye Rossyskoy Federatsii, predstavlennoye v sootvetstviy so statyami 4 i 12 Ramochnoy Konventsii Organizatsii Obedinennykh Natsy ob izmenenii klimata i statyey 7 Kiotskogo protokola* / Pod obshch. red. A.V. Frolova. – M.: Rosgidromet, 2013. – 281 s.
28. Shiyatov, S.G. *Vertikalny i gorizontalny sdvigi verkhney granitsy redkolesy i somknutykh lesov v XX stoletii na Polyarnom Urale* / S.G. Shiyatov, M.M. Terentyev, V.V. Fomin, N.E. Tsimmerman // *Ekologiya*. – 2007. – № 4. – S. 243-248.
29. Shiyatov, S.G. *Dinamika drevesnoy i kustarnikovoy rastitelnosti v gorakh Polyarnogo Urala pod vliyaniem sovremennykh izmeneniy klimata* / S.G. Shiyatov – Yekaterinburg: UrO RAN, 2009. – 216 s.
30. Adams, J.M. *Global land environments since the last interglacial*. Oak Ridge National Laboratory, TN, USA / J.M. Adams. 1997. *Rezhim dostupa: <http://www.esd.ornl.gov/ern/qen/nerc.html>* (Data obrashcheniya: 15.12.2014).
31. Arctic Research Consortium of the United States. 2005. – *Rezhim dostupa: www.arcus.org* (Data obrashcheniya: 10.02.2014).
32. Batlori, Enric. *Regional tree line dynamics in response to global change in the Pyrenees* / Enric Batlori, Emilia Gutierrez // *J. Ecol.* – 2008. – Vol. 96. – №6. – P. 1275-1288.
33. Harsch, M.A. *Are treelines advancing? F global meta-analysis of treeline response to climate warming* / M.A. Harsch, P.E. Hulme, M.S. McGlone, R.P. Dunca // *Ecology Letters*. – 2009. – № 12. – P. 1040–1049.
34. Kullman, L. *Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes* / L. Kullman // *J. of Ecology*. – 2002. – Vol. 90. – P. 68-77.
35. Kullman, L. *Tree line population monitoring of Pinus sylvestris in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology* / L. Kullman // *J. of Ecology*. – 2007. – Vol. 95. – P. 41-52.