

УДК 630\*174.754

## КЛИМАТОГЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛИСТВЕННИЧНЫХ РЕДКОЛЕСИЙ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ПОЛТОРЫ ТЫСЯЧИ ЛЕТ

В.С. МАЗЕПА,  
доктор биологических наук,  
доцент, заведующий лабораторией дендрохронологии  
ФГБУН «Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН»  
e-mail: mazepa@ipae.uran.ru  
(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202)

С.Г. ШИЯТОВ,  
доктор биологических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник  
ФГБУН «Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН»  
e-mail: stepan@ipae.uran.ru  
(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202)

*Ключевые слова:* верхняя граница леса, лесотундровые растительные сообщества, Полярный Урал, изменения климата.

За последнее тысячелетие в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР) в высокогорьях Полярного Урала происходили значительные пространственно-временные изменения в процессах лесовозобновления, гибели и продуктивности древостоев. До сих пор эти леса развивались главным образом под влиянием естественных природных факторов. Огромное количество остатков давно погибших деревьев сохранилось на дневной поверхности, которая расположена на 60-80 м выше современной границы древесной растительности. Некоторые образцы датируются своим появлением 1500 лет назад. Данное исследование продолжает работу, начатую С.Г.Шиятовым, который изучал динамику роста древостоев вдоль высотных поперечных трансект на восточном макросклоне Полярного Урала в 1960-х. Для этого исследования были собраны приблизительно 2000 поперечных дисков от сухостоя и валежа и 567 буровых образцов у ныне живущих деревьев, произрастающих на трансектах. Положения всех живых деревьев, упавшего сухостоя и древесных остатков были нанесены на карту. Размеры каждого живущего дерева, включая подрост и растения нижнего яруса насаждения, были измерены: диаметр у основания, диаметр на высоте 1,3 м, диаметр кроны и высота деревьев. Используя дендрохронологические методы, определили календарные даты времени жизни давно погибших деревьев и возраст живых. В результате получено, что самый ранний значимый максимум в плотности древостоев наблюдался с XI по XIII столетия и совпадал со средневековым потеплением климата. Потепление климата в XVIII столетии привело ко второму незначительному максимуму плотности древостоев. Современное увеличение термического режима, наблюдаемое в XX столетии, отражено в высокой численности появления молодых деревьев. Анализ вертикальных и горизонтальных сдвигов верхней границы редин, редколесий и сомкнутых лесов в высокогорьях Полярного Урала показывает убедительное свидетельство активной экспансии древесной растительности в тундру, к более высоким гипсометрическим уровням. За последние 90 лет это может быть объяснено благоприятными изменениями в климатических условиях.

## CLIMATIC DRIVEN DYNAMICS OF THE UPPER TREE-LINE ECOTONE OF LIGHT LARCH FORESTS IN THE POLAR URAL MOUNTAINS FOR THE LAST ONE AND A HALF THOUSAND YEARS

V.S. MAZEPA,

Doctor of Biological Science, associate professor,  
head of a laboratory of Dendrochronology

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch Russian Academy of Sciences

e-mail: mazepa@ipae.uran.ru

(620144, Ekaterinburg, 8 Marta Street, 202)

S.G. SHIYATOV,

Doctor of Biological Science, professor,  
leading researcher

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch Russian Academy of Sciences

e-mail: stepan@ipae.uran.ru

(620144, Ekaterinburg, 8 Marta Street, 202)

**Keywords:** *upper tree-line ecotone, forest-tundra vegetative communities, Polar Urals, climate change.*

Significant spatiotemporal changes in the establishment, mortality, and abundance of trees have taken place in the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains over the last millennium. Until now, these forests have developed mainly under the influence of natural factors. A large number of well-preserved tree remains can be found up to 60-80 m above the current tree line, some dating to as early as a maximum of 1500 years ago. The research reported here extends the work begun by S.G. Shiyatov, who examined evidence of tree growth dynamics along altitudinal transects on the eastern slope of the Polar Ural Mountains in the 1960s. For this study, about 2000 discs from dead trees and 567 increment cores from living trees were collected along altitudinal transects. The positions of all living trees, fallen dead trees, and wood remains were mapped. Dimensions of each living tree, including saplings and understory plants, were measured: basal diameter, diameter at breast height, crown diameter, and height of stems. Calendar years of tree germination and death were estimated using dendrochronological techniques. The earliest distinct maximum in stand density occurred in the 11th to 13th centuries, coincident with Medieval climate warming. Climate warming in the 18th century appears to have resulted in a second stand-density maximum. The recent temperature increase observed in the 20th century is reflected in the high number of young trees observed. The analysis of vertical and horizontal shifts in the upper boundaries of open and closed forests on the eastern macroslope of the Polar Urals provides evidence for widespread and active expansion of tree vegetation to higher elevations over the past 90 years, which is apparently explained by favorable changes in climatic conditions.

### Введение

В последние десятилетия существенно возрос интерес мировой научной общественности к изучению реакции наземных экосистем и их отдельных компонентов на изменения климата в связи с необходимостью оценки экологических и социальных последствий современного потепления, которое началось в конце XIX столетия и продолжается до настоящего времени во многих районах нашей планеты. Глобальная температура воздуха за последнее столетие повысилась в среднем на 0.6 °C, причем наиболее значимые изменения произошли на Урале и в Сибири [1, 2].

Скорость потепления имеет тенденцию нарастать. Для решения этой проблемы важно исследовать северные экосистемы [3, 4]. Все биологические явления и процессы в высоких широтах обострены и проявляются более рельефно, чем в иных типах зональных ландшафтов. Основным климатическим фактором, лимитирующим продуктивность видов

денцию нарастать. Для решения этой проблемы важно исследовать северные экосистемы [3, 4]. Все биологические явления и процессы в высоких широтах обострены и проявляются более рельефно, чем в иных типах зональных ландшафтов. Основным климатическим фактором, лимитирующим продуктивность видов

и сообществ, является низкая температура воздуха, приводящая к сокращению вегетационного периода.

Исследованиям лесотундровых и лесолуговых растительных сообществ в высокогорьях уделяется значительное и заслуженное внимание. Накапливается все больше свидетельств о том, что потепление климата приводит к увеличению продуктивности, густоты и сомкнутости древостоев, а также к заселению древесной растительностью ранее безлесных территорий. Отчетливо эти процессы прослеживаются в районах, экстремальных для произрастания древесной растительности (полярная и верхняя граница леса), где климатические факторы оказывают решающее влияние на рост и развитие древесных растений.

Важнейшей задачей в настоящее время является количественная оценка реакции различных компонентов лесных и лесотундровых экосистем на изменения климата. Объем накопленного материала, уровень обобщений, новые методы и технологии обработки и анализа данных позволяют перейти от описания процессов, происходящих в древостоях, к их математическому моделированию и разработке более надежных и обоснованных прогнозов при различных сценариях изменений климата. При этом важно учитывать региональные особенности растительного покрова и климатических изменений.

Поскольку лесные сообщества играют исключительно большую роль в круговороте биогенного

вещества и стабилизации условий внешней среды, проблема изучения динамики древесной растительности под влиянием изменений климата приобрела фундаментальное научное и важнейшее социально-экономическое значение.

Надежным методом, позволяющим оценивать изменения древостоев во времени и в пространстве, является изучение возрастной структуры как ныне живущих, так и усохших древостоев, остатки которых сохранились до настоящего времени на дневной поверхности (сухостой, валеж), а также в молодых голоценовых отложениях (торфяниках, озерных и речных отложениях). Методика проведения таких работ опробована на Полярном Урале [5]. Важно, чтобы было зафиксировано точное место произрастания каждого дерева, а абсолютное время его жизни определено при помощи дендрохронологических методов. Обычно такая работа проводится на постоянных высотных профилях и пробных площадях.

Полярный Урал (66–67° с.ш., 65–66° в.д.) является одним из наиболее перспективных районов для проведения таких работ. Выбранная территория исследования практически не была подвержена воздействию интенсивной хозяйственной деятельности человека. В течение последнего тысячелетия здесь происходили значительные естественные пространственно-временные изменения в экотоне верхней границы древесной растительности в связи с долговременными изменения-

ми климатических условий [6, 7]. Свидетельство тому – огромное количество хорошо сохранившихся остатков погибших деревьев лиственницы сибирской на дневной поверхности даже на 60–80 м выше современной границы редколесий, т.е. в настоящее время на безлесных участках. Основное количество остатков сосредоточено в экотоне верхней границы древесной растительности (от 100 до 450 м н.у.м.), а сохранились эти остатки благодаря низкой скорости разложения древесины в суровых климатических условиях. Многочисленные исследователи [8–11] наблюдали огромное количество погибших деревьев вблизи верхней границы леса на восточном макросклоне Полярного Урала, древесина которых находилась в различной степени разложения. Особенно много такой древесины обнаруживается в бассейне р. Соби. Погибшие деревья, расположенные выше современного экотона верхней границы древесной растительности, являются свидетелями положения ее верхней границы в прошлом [12]. Палеоэкологическая информация в годичных кольцах давно погибших деревьев обладает высоким разрешением как в пространстве, так и во времени, обеспечивая уникальную возможность восстановить историю фактических изменений в структуре и продуктивности древостоев в экотоне верхней границы древесной растительности. Объектами исследования послужили давно погибшие древостои, расположенные выше современной границы редколесий.

### Материал и методы

Для изучения климатогенной динамики лесотундровой растительности за длительные интервалы времени в пределах экотона верхней границы редколесий (ЭВГ) было заложено два постоянных высотных профиля.

Профиль I был заложен в 1960 г. на восточном склоне сопки 312,8 м, вершина которой находится в 4 км к востоку от горы Черная, в междуречье рек Енгаю и Кердоманшор. Он расположен на древних моренных отложениях и ориентирован в направлении преобладающих ветров. Профиль пересекает среднюю и нижнюю часть ЭВГ, от верхней границы распространения лиственничной редины до верхней границы сомкнутого лиственничного леса с примесью ели. Он начинается на высоте 265 м и заканчивается на высоте 190 м, пересекая три лесные и две безлесные полосы шириной 60–100 м. Безлесье этих полос обусловлено отложением мощных сугробов снега (до 5–6 м), которые стаивают лишь к середине июля и тем самым сильно сокращают длительность вегетационного периода. Длина профиля составляет 860 м, ширина в верхней части – 80 м, в нижней – 40 м, общая площадь равна 5,6 га. Координаты его верхнего левого угла составляют  $66^{\circ}48'57''$  с.ш. и  $65^{\circ}34'09''$  в.д. Профиль был разбит на пронумерованные квадраты со стороной 20 м, в углах которых были установлены каменные столбы. Был составлен план профиля масштаба 1:100. На этот план

были нанесены границы 25 фитоценозов и расположение более 4500 живых (включая подрост) и 769 отмерших деревьев (сухостоя и валежа). Все живые деревья и подрост были пронумерованы и измерены их морфометрические характеристики. В 1999–2000 гг. на профиле были проведены повторные перечеты и измерения морфометрических показателей у всех живых деревьев и крупного подраста. С имеющегося сухостоя и валежа были взяты поперечные спилы для определения календарного времени их жизни.

Высотный профиль II был заложен в 1983 г. на пологом юго-восточном склоне массива Рай-Из в пределах полностью отмершего к концу XIX в. лиственничного редколесья площадью около 40 га. На этом склоне выражен термический тип верхней границы леса, а усыхание древостоя могло произойти лишь в результате ухудшения климатических условий [13]. Профиль пересекает верхнюю часть ЭВГ, где в настоящее время произрастают молодое лиственничное редколесье и одиночные деревья в тундре. Кроме того, самая верхняя часть профиля заходит в нижнюю часть пояса горных тундр, где сохранились остатки деревьев. Протяженность профиля составляет 430 м, ширина 20 м, он начинается на высоте 340 м н.у.м. и заканчивается на высоте 280 м. Координаты его верхнего левого угла составляют  $66^{\circ}51'19''$  с.ш. и  $65^{\circ}38'57''$  в.д. Профиль был разбит на квадраты размером 10 x 10 м, в его пределах было

закартировано 252 древесных остатка различной степени перегнивания. С каждого остатка, принадлежащего отдельному дереву, были взяты поперечные спилы для определения календарного времени жизни. Кроме того, были закартированы и описаны встретившиеся на профиле подрост и молодые деревца. В 2004 г. на профиле был проведен повторный пересчет появившихся молодых лиственниц.

Таким образом, профили I и II, расположенные на расстоянии 5,5 км друг от друга, охватывают всю ширину ЭВГ и разнообразные типы лесотундровых сообществ (от отдельных деревьев в тундре до сомкнутого леса).

Датировка календарного времени жизни отмерших деревьев производилась путем перекрестной датировки индивидуальных древесно-кольцевых хронологий на основе полученной по этому району обобщенной хронологии по лиственнице длительностью 1250 лет [14]. Благодаря высокой чувствительности древесно-кольцевых хронологий около 90 % древесных остатков были абсолютно датированы (на профиле I – 667 из 769 шт., на профиле II – 221 из 252 шт.).

### Результаты

На рис. 1 показано календарное время жизни каждой погибшей лиственницы, произраставшей в пределах профилей. Наиболее древняя древесина, сохранившаяся до настоящего времени, принадлежит деревьям, которые появились в начале и середине VIII в. Таких остатков

немного, так как большая часть их сгнила, или сохранились небольшие кусочки древесины, которые невозможно датировать дендрохронологическим методом. Отсутствие остатков древней древесины в нижней части профилей связано с тем, что она здесь перегнивает быстрее в связи с более благоприятными

микrokлиматическими условиями и обрастанием валежа растительной дерниной.

Используя самые верхние остатки деревьев, получили реконструкцию динамики верхней границы лиственничных редколесий (рис. 2). С начала VIII и до конца XII вв. происходило непрерывное поднятие верхней

границы редколесий с 310 до 340 м н.у.м. Наиболее высокое положение эта граница занимала в течение всего XIII и в начале XIV вв. После этого началось массовое отмирание деревьев и снижение верхней границы редколесий вплоть до начала XX в. Наиболее интенсивное снижение этой границы наблюдалось

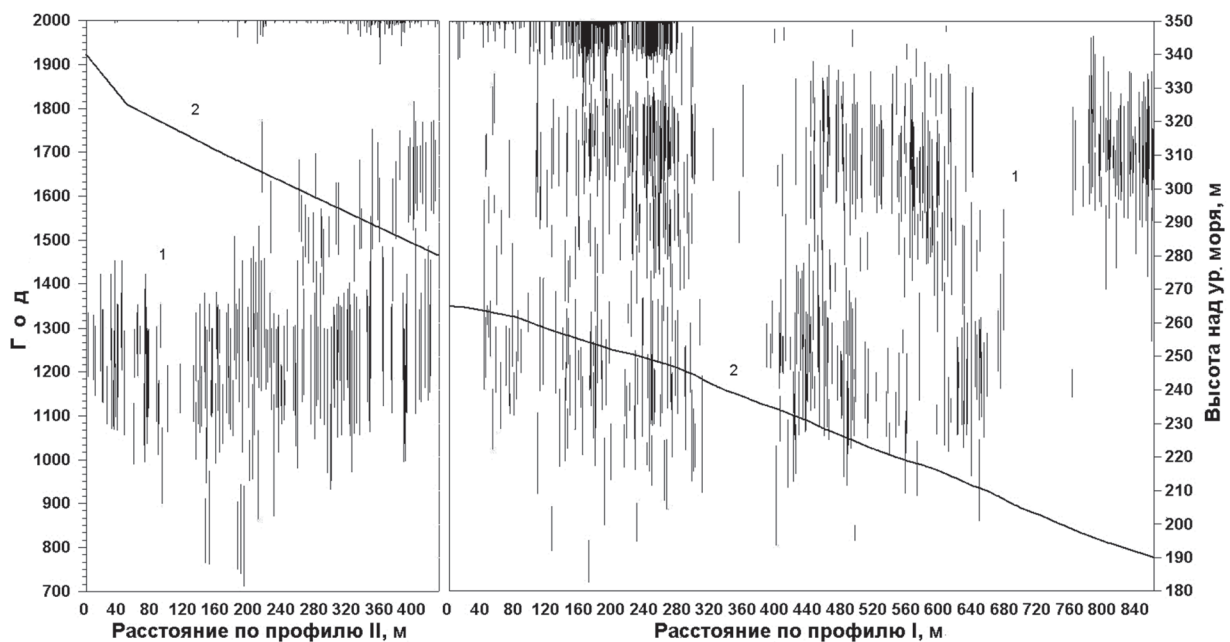


Рис. 1. Распределение по календарному времени отмерших и живых деревьев на профилях за последние 1300 лет: 1 – продолжительность жизни дерева, 2 – высота над уровнем моря

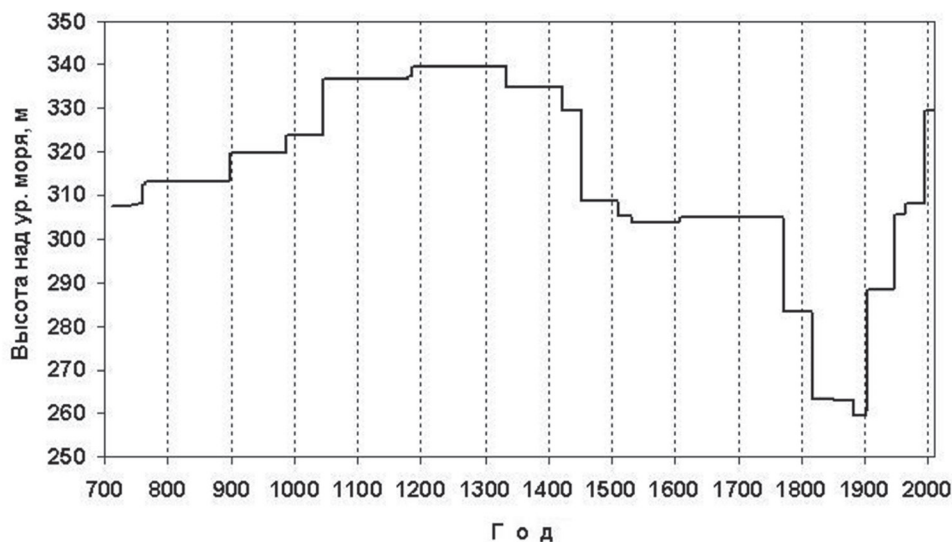


Рис. 2. Динамика верхней границы распространения лиственничных редколесий за последние 1300 лет

в XV и XIX вв. Ситуация изменилась на противоположную в 1920-х годах, когда на профилях стал появляться жизнеспособный подрост.

Синхронно с высотными изменениями верхней границы редколесий происходили изменения в структуре и продуктивности древостоев лесотундровых сообществ. На основе данных о накапливающихся диаметрах у живых и отмерших деревьев и аллометрических соотношениях между диаметром модельных деревьев и фитомассой абсолютно сухого вещества была получена оценка продукционного процесса. Результаты изменения фитомассы древесного яруса в целом для профилей за последние 800 лет приведены на рис. 3.

Важнейшим результатом этой работы является выявление длительных трендов в изменении продуктивности древостоев в связи с изменением климатиче-

ских условий. На рис. 3 показаны годовичные, внутривековые и вековые изменения индексов прироста лиственницы в районе исследований (верхние кривые), которые отражают динамику термического режима летних месяцев. На рис. 3 отчетливо видно, что тренды изменения фитомассы и индексов прироста синхронны, что свидетельствует об однонаправленности этих процессов. Синхронно изменялось высотное положение верхней границы редколесий и густота древостоев. Это свидетельствует о том, что все эти процессы взаимосвязаны и определяются изменением общего фактора независимо от местоположения древостоев в пределах экотона верхней границы древесной растительности и почвенно-грунтовых условий. Такими факторами могут быть только климатические, в частности термический режим летних месяцев.

### Заключение

Анализ полученных материалов показывает, что Полярный Урал, особенно его восточный макросклон, является перспективным районом для изучения климатогенной динамики лесотундровой растительности. Здесь постоянно происходит трансформация одних типов лесотундровых сообществ в другие и изменение границ их распространения в связи с изменением климатических условий. Следует отметить, что эти процессы протекают довольно медленно, с характерным запаздыванием, и это необходимо учитывать при разработке разного рода моделей динамики лесных экосистем при изменении климата. Приведенные в статье количественные данные о реакции различных компонентов лесотундровых сообществ на изменение климатических факторов могут быть использованы для этих целей.

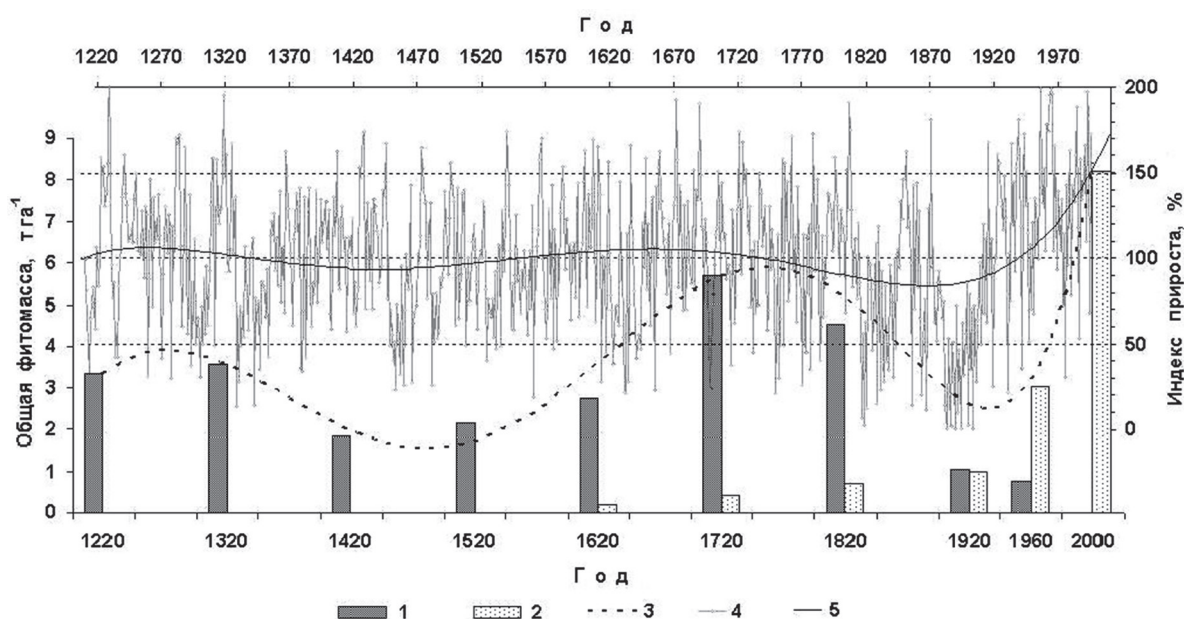


Рис. 3. Динамика фитомассы древесного яруса на профиле I за последние 800 лет: 1 – оценка фитомассы по отмершим деревьям, 2 – оценка фитомассы по живым деревьям, 3 – тренд изменения фитомассы, 4 – годовичные колебания индексов радиального прироста лиственницы, 5 – тренд изменения индексов прироста

Имеется много данных по изменению климата, полученных с использованием прямых и косвенных источников информации, свидетельствующих о том, что в Северной Евразии происходили сходные длительные изменения климатических условий [15]. В средние века (VIII–XIII вв.) наблюдалось повсеместное потепление климата, которое сменилось похолоданием – так называемым малым ледниковым периодом. Наши

данные свидетельствуют о том, что на Полярном Урале оно началось в самом конце XIII в. и продолжалось вплоть до начала XX в. При этом самым холодным был XIX в.

Современное потепление климата, начавшееся в 1920-х годах и продолжающееся до настоящего времени, привело к интенсивной экспансии древесной растительности в горные тундры, значительному повышению продуктивности древостоев, про-

движению верхней границы леса выше в горы на 40–60 м, увеличению степени облесенности экотона верхней границы древесной растительности в 2 раза.

Отсутствие свидетельств лесных пожаров, антропогенного и техногенного влияния на древостои лиственницы, признаков других катастрофических явлений в районе исследования указывает на то, что динамика лесов – в основном результат изменений климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-04-00961), Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект №15-02-14-22).

#### *Библиографический список*

1. IPCC, 2013. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., 2014.
3. Kullman L. Dynamics of altitudinal tree-limits in Swiden: a review // Nor. Geogr. Tidsskr. 1990. V. 44. p. 103–116.
4. Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2003. 369 p.
5. Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. 2007. № 6. С. 11–22.
6. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
7. Mazepa V.S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains // Can. J. For. Res. 2005. V. 35. P. 2082–2091.
8. Сукачев В.К. К вопросу об изменении климата и растительности на севере Сибири в послетретичное время // Метеоролог. вестник. 1922. Т. 22. № 1–4. С. 25–43.
9. Городков Б.Н. Полярный Урал в верхнем течении р. Соби // Тр. / Ботан. музей АН СССР. М., 1926. Вып. 19. С. 1–74.
10. Сочава В.Б. Ботанический очерк лесов Полярного Урала от р. Нельхи до р. Хулги // Тр. / Ботан. музей АН СССР. М., 1927. Вып. 21. С. 1–71.
11. Андреев В.Н. Растительность и природные районы восточной части Большеземельской тундры // Тр. / Полярная комис. АН СССР. М., 1935. Вып. 22. С. 3–97.
12. Shiyatov S.G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // PAGES News. V. 11. No 1. April 2003. P. 8–10.
13. Шиятов С.Г. О типах верхней границы леса и ее динамике на Полярном Урале // Биологические основы использования природы Севера. Сыктывкар, 1970. С. 73–81.

14. Shiyatov S.G. Reconstruction of climate and the upper timberline dynamics since AD 745 by tree-ring data in the Polar Ural Mountains // International Conference on Past, Present and Future Climate / Ed. Henkinheimo Pirkko. Painatuskeskus: Publication of the Academy of Finland. 6/95, 1995. P. 144–147.

15. ACIA. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press: Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, San Paulo, 2005. 1042 p.

### *Bibliography*

1. IPCC, 2013. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

2. The second evaluative report of Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service on changes of a climate and their consequences in territory of the Russian Federation. The general resume. Moscow. 2014. [in Russian].

3. Kullman L. Dynamics of altitudinal tree-limits in Swiden: a review // Nor. Geogr. Tidsskr. 1990. V. 44. PP. 103–116.

4. Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers. 2003. 369 p.

5. Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Climate driven dynamics of forest-tundra vegetation in Polar Urals Mountains // Lesovedenie. 2007. № 6. PP. 11-22. [in Russian].

6. Shiyatov S.G. Dendrochronology of the upper tree-line in the Ural Mountains. Moscow: Nauka. 1986. 136 p. [in Russian].

7. Mazepa V.S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains // Can. J. For. Res. 2005. V. 35. PP. 2082–2091.

8. Sukachev V.K. To a question on change of a climate and vegetation in the north of Siberia in after tertiary time // Meteorological Vestnik. 1922. Vol. 22. No. 1-4. PP. 25-43. [in Russian].

9. Gorodkov B.N. The Polar Urals in the watershed of the Sob River // Proceedings. / The Botanical Museum. Academy of Sciences of the USSR. 1926. Issue. 19. PP.1-74. [in Russian].

10. Sochava V.B. Botanical essay of the Polar Ural forests from the Nelkja River to Kulga River // Proceedings. / The Botanical Museum. Academy of Sciences of the USSR. 1927. Issue. 21. PP.1-71. [in Russian].

11. Andreev V.N. Vegetation and natural areas of the eastern part of Bolshezemelsky tundra // Proceedings. / The Polar Commission. Academy of Sciences of the USSR. 1935. Issue. 22. PP. 3-97. [in Russian].

12. Shiyatov S.G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // PAGES News. V. 11. No 1. April 2003. PP. 8–10.

13. Shiyatov S.G. On types of the upper tree-line and its dynamics in the Polar Ural Mountains // Biological bases of use of the North nature. Syktyvkar. 1970. PP. 73-81. [in Russian].

14. Shiyatov S.G. Reconstruction of climate and the upper timberline dynamics since AD 745 by tree-ring data in the Polar Ural Mountains // International Conference on Past, Present and Future Climate / Ed. Henkinheimo Pirkko. Painatuskeskus: Publication of the Academy of Finland. 6/95, 1995. PP. 144-147.

15. ACIA. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press: Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, San Paulo, 2005. 1042 p.