

## КЛИМАТОГЕННАЯ ДИНАМИКА ЛЕСОТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ\*

© 2007 г. С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа

*Институт экологии растений и животных УрО РАН  
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202  
e-mail: stepan@ipae.uran.ru*

Поступила в редакцию 27.03.2007 г.

В статье представлены результаты многолетних исследований влияния изменений климата на состав, структуру, продуктивность и пространственное распределение лесотундровых сообществ, произрастающих в экотоне верхней границы древесной растительности на восточном макросклоне Полярного Урала (бассейн р. Соби). Показаны пределы изменения лесотундровой растительности за последнее тысячелетие по таким параметрам, как возрастная структура, густота и продуктивность древостоев и высотное положение верхней границы лиственных редколесий и сомкнутых лесов. Произведено сравнение этих характеристик с вековыми изменениями температуры летних месяцев, реконструированной при помощи древесно-кольцевого анализа. Детально проанализирована пространственно-временная динамика древостоев лесотундровых сообществ в течение XX в. в связи с современным потеплением климата.

*Экотон верхней границы древесной растительности, климатогенная динамика лесотундровой растительности, древесно-кольцевой анализ, возрастная структура и продуктивность древостоев, Larix sibirica, Полярный Урал.*

Изучению климатогенной динамики лесной растительности уделяется большое внимание в связи с необходимостью оценки изменений в составе, структуре и пространственном распределении лесов, которые могут произойти в ближайшем будущем под влиянием современного потепления климата [17, 19]. При этом в основном изучаются лесные, лесотундровые, лесоболотные и лесостепные сообщества, произрастающие в экстремальных климатических и почвенно-грунтовых условиях, у которых климатические обусловленные изменения выражены наиболее четко [8, 18, 20–23]. Это направление в настоящее время интенсивно развивается, о чем свидетельствуют материалы международной конференции “Влияние изменений климата на бореальные и умеренные леса”, которая состоялась в июне 2006 г. в Екатеринбурге [16].

А.И. Уткин проявлял постоянный интерес к изучению динамики лесной растительности под воздействием изменений климата и внес существенный вклад в разработку этой проблемы. В начале своей научной карьеры он уделил большое внимание изучению повторяемости лесных пожаров в связи с изменением увлажненности климата и влиянию пожаров на строение и дина-

мику светлохвойных лесов Центральной Якутии. На большом материале было показано, что “оборот огня” в лиственных лесах свежих местообитаний составляет не более 40–50 лет, сухих местообитаний – не более 20–25 лет. А.И. Уткин высказал интересную гипотезу о том, что наблюдаемое в настоящее время потепление и усиление сухости климата приводит к обсыханию территории, ксерофитизации положительных элементов рельефа и к дополнительному увлажнению и охлаждению почв депрессий. Это приводит к остепнению лесов на выпуклых элементах рельефа и наступлению леса на открытые ландшафты депрессий. В боровых экотопах сосна вытесняет лиственницу, возвращая утраченные после фазы голоценового термического оптимума местообитания [2].

С начала 1970-х годов А.И. Уткин начал интенсивно заниматься изучением продуктивности лесных сообществ, а несколько позднее – оценкой вклада лесной растительности в углеродный цикл биосферы. Он указывал на необходимость переоценки биосферной роли леса в связи с происходящими в настоящее время увеличением содержания углекислого газа в атмосфере и глобальным потеплением климата. Крайне важно знать региональные закономерности углеродного цикла, обусловленные климатическими особенностями микрорегионов и подзон, что позволит прогнозировать его изменения при различных сцена-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (04-04-48687, 05-04-48466, 07-04-00847) и ИНТАС (01-0052).

риях изменения климата. Нежелательные последствия потепления можно смягчить путем интенсивного “связывания” углерода на длительное время в древесной фитомассе при помощи увеличения площадей, покрытых лесом, и повышения продуктивности молодых и средневозрастных лесов [3, 6].

В последние годы А.И. Уткин проявлял большой интерес к изучению пространственной динамики лесной растительности на фоне происходящего в настоящее время потепления климата и изменения гидрологических условий. Он отмечал слабую изученность реакции отдельных компонентов лесных экосистем на климатические изменения и недостаточный учет при этом эколого-физиологических особенностей продуцентов и редуцентов. Свои соображения о возможной динамике лесной растительности в экотонах Северной Евразии различного ранга (лес–тундра, лес–степь, лес–болото, лес–сельскохозяйственные угодья) он изложил в специальной работе [5]. В случае повышения средней годовой температуры на 2–4°C лесная и кустарниковая растительность в подзоне южной тундры будет выходить из речных долин на плакорные местообитания. Наиболее существенные изменения должны произойти в зоне лесотундры и северной тайги: повышение густоты и продуктивности древостоев, расселение ели, сосны и березы дальше на север и выше в горы. В экотоне лес–степь повышение температуры и снижение количества осадков приведут к вытеснению лесных сообществ степными, а также к усилению деструктивной роли пожаров. Он подчеркивал, что при анализе климатогенных причин изменения лесной растительности необходимо знание процессов семеношения, дальности разлета семян, характера взаимоотношений между древесными и другими видами растений в конкретных физико-географических условиях.

А.И. Уткин понимал важность и перспективность работ с использованием дендрохронологических методов для реконструкции природных условий, в частности климатических, и использование этой информации для изучения динамики лесных сообществ. По его инициативе был выпущен специальный номер журнала “Лесоведение” (№ 2 за 1990 г.), посвященный проводимым в нашей стране дендрохронологическим исследованиям. Кроме того, он, будучи заместителем главного редактора журнала “Лесоведение”, постоянно обращался к специалистам-дендрохронологам с просьбой присылать рукописи статей для публикации в журнале. Статьи с использованием дендрохронологических методов регулярно печатались в журнале “Лесоведение”, что, несомненно, способствовало развитию этого направления исследований в нашей стране. В одной из рецензий А.И. Уткин [4] дал высокую оценку книге, посвященной дендроклиматическим исследованиям в

Урало-Сибирской Субарктике, и высказал ряд интересных соображений по перспективам развития и использования дендрохронологической информации для изучения изменчивости природной среды и динамики лесных экосистем.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В настоящей работе приведены результаты многолетних исследований климатогенной динамики различных типов лесотундровых сообществ, произрастающих в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГ) на восточном макросклоне Полярного Урала (бассейн р. Соби). Под термином ЭВГ мы понимаем переходный пояс растительности в горах между верхней границей распространения сомкнутых лесов и верхней границей распространения одиночных деревьев в тундре. Нижняя граница экотона в этом районе расположена на высотах от 140 до 230 м над ур. моря, а верхняя граница – от 270 до 560 м. В пределах экотона произрастают в основном чистые лиственничные (из *Larix sibirica* Ldb.) сообщества различной густоты. В нижней части экотона встречаются лиственничные редколесья и сомкнутые леса с примесью ели сибирской (*Picea obovata* Ldb.) и березы извилистой (*Betula tortuosa* Ldb.).

Исследования были начаты в 1960-х годах [7–9, 11] и продолжаются до настоящего времени [12–14, 22–24]. Этот район является весьма перспективным для изучения климатогенной динамики лесотундровой растительности. Он расположен на широте полярного круга и характеризуется сильной изменчивостью климатических условий различной длительности [11]. Лесотундровая растительность, произрастающая в пределах ЭВГ, не подвергалась воздействию лесных пожаров и не испытывала существенных антропогенных воздействий. Пожаров здесь не было по крайней мере в течение последних 1500 лет, когда сменилось не менее 4–5 возрастных поколений лиственницы. Об этом свидетельствует отсутствие обуглившихся остатков деревьев и углей на поверхности почвы. Однако на одной из пробных площадей, расположенной в пределах современного экотона, мы обнаружили древесные угли в почве на глубине 25–30 см. Их наличие свидетельствует о том, что, вероятнее всего, во время термического максимума голоцена, когда верхняя граница древесной растительности поднималась выше в горы, лесные пожары случались в пределах современного экотона. В настоящее время пожары случаются лишь на более низких гипсометрических уровнях, в пределах горно-таежного пояса, не достигая подгольцового.

В ЭВГ произрастают простые по составу древостои, состоящие в основном из лиственницы сибирской, что намного облегчает изучение их динамики. Кроме того, в течение последних 40–50 лет



**Рис. 1.** Фотоснимки, сделанные в средней части профиля II с одной и той же точки в 1962 и 2004 гг., показывающие наличие большого количества остатков древней древесины и современное расселение лиственницы выше в горы.

по этому району накоплен большой материал, характеризующий состав и структуру лесной растительности, что дает возможность широко использовать прямые свидетельства для оценки происшедших изменений.

Район исследований расположен на восточном макросклоне Полярного Урала, в бассейне р. Соби ( $66^{\circ}46'–66^{\circ}55'$  с.ш.,  $65^{\circ}22'–65^{\circ}49'$  в.д.). Господствующее положение по площади и высоте занимает перидотитовый массив Рай-Из, который простирается почти в широтном направлении от р. Соби на востоке до р. Макару-Рузь на западе. В его северной части имеется несколько острых пиков, достигающих высоты 1260–1290 м над ур. моря. Вдоль южной оконечности Рай-Иза тянется полоса горных образований различной высоты, сложенных габбро. Наиболее высокими из них являются горы Черная (1030 м) и Малая Черная (594 м). Вдоль юго-восточных склонов массива Рай-Из и горы Черная тянется цепь пологих сопкок высотой 300–460 м. Северные и восточные склоны массива Рай-Из окружают горы высотой 400–880 м, сложенные кристаллическими сланцами (Сланцевая, Яр-Кеу, Поур-Кеу).

Характерной особенностью района исследований является наличие большого количества хоро-

шо сохранившегося сухостоя и валежа как в пределах ныне существующих древостоев, так и в нижней части пояса горных тундр (рис. 1). Это свидетельствует о том, что древесная растительность в прошлом произрастала на более высоких гипсометрических уровнях. Датировка времени появления и отмирания этих деревьев при помощи дендрохронологических методов дает возможность изучить возрастную структуру и продуктивность древостоев за интервалы времени, превышающие максимальный биологический возраст лиственницы (400–450 лет). Поскольку остатки деревьев находятся на месте их произрастания, то можно также реконструировать вертикальное и горизонтальное смещение верхних границ распространения лесотундровых сообществ с высокой степенью точности.

Для изучения климатогенной динамики лесотундровой растительности за длительные интервалы времени в пределах 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. Верхняя часть профиля подвергается воздействию сильных ветров, поэтому большинство деревьев имеют многоствольную форму роста. Профиль пересекает среднюю и нижнюю часть ЭВГ, от верхней границы распространения листовенничной редины до верхней границы сомкнутого листовенничного 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 860 м, ширина в верхней части 80 м, в нижней 40 м, общая площадь 5.6 га (рис. 2). Координаты его верхнего левого угла составляют 66°48'57" с.ш. и 65°34'09" в.д. Профиль I 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, измерены их морфометрические характеристики (диаметр ствола в основании и на высоте груди, высота ствола у одноствольных и всех стволов у многоствольных деревьев, высота начала кроны и ее диаметр).

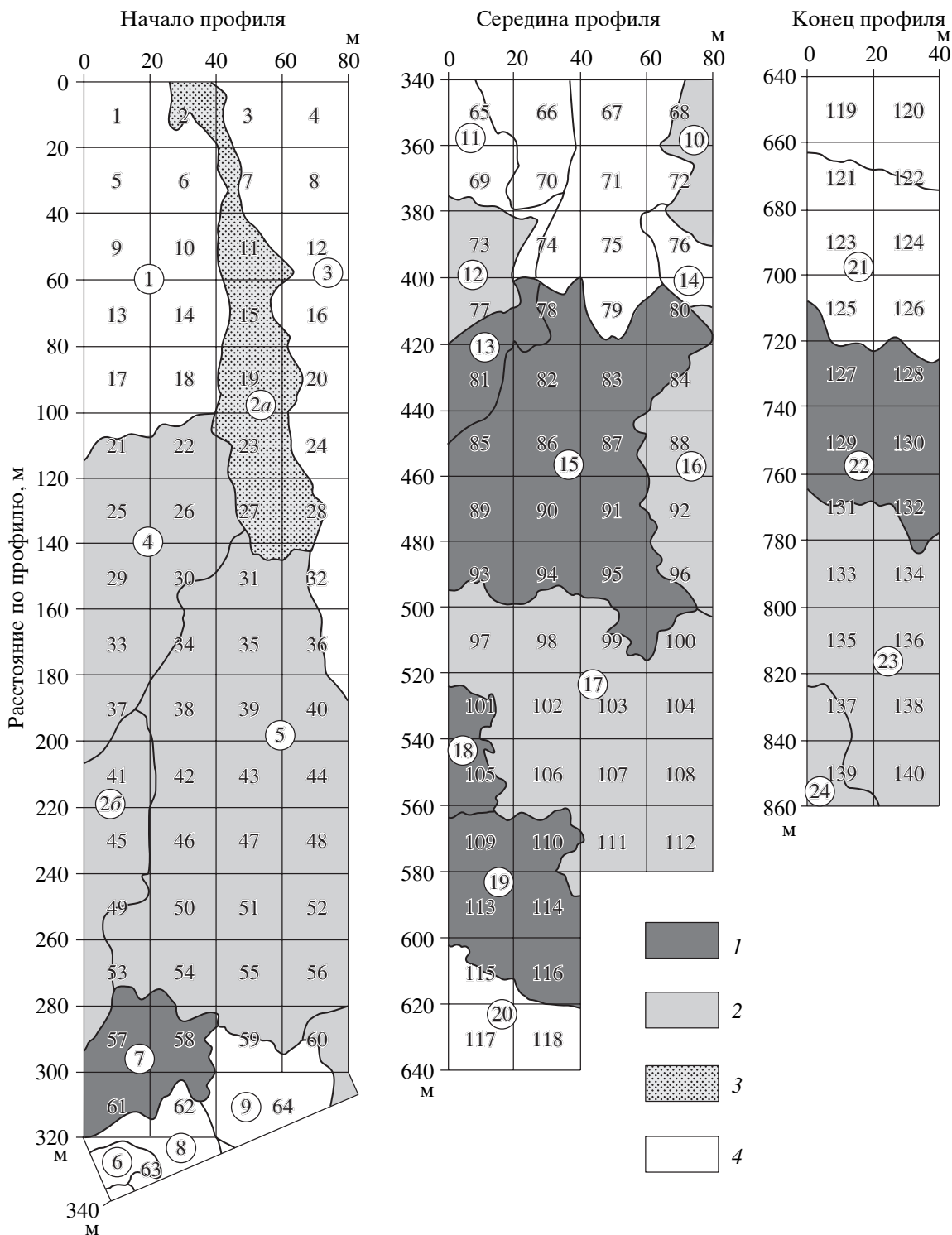
Для углубленного понимания динамических процессов, происходивших в лесотундровой растительности в XX в., в 1999–2000 гг. на профиле I были проведены повторные перечеты и измерения морфометрических показателей у всех живых деревьев и крупного подроста. С имеющегося сухостоя и валежа были взяты поперечные спилы для определения календарного времени их жизни. В верхней части профиля у более чем 500 живых деревьев были взяты буровые образцы древесины на высоте груди и в основании стволов.

Высотный профиль II был заложен в 1983 г. на пологом юго-восточном склоне массива Рай-Из, в пределах полностью отмершего к концу XIX в. листовенничного редколесья площадью около 40 га (рис. 1). На этом склоне выражен термический тип верхней границы леса, а усыхание древостоя могло произойти лишь в результате ухудшения климатических условий [10]. Профиль II пересекает верхнюю часть ЭВГ, где в настоящее время произрастают молодое листовенничное 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 над ур. моря и заканчивается на высоте 280 м. Координаты его верхнего левого угла составляют 66°51'19" с.ш. и 65°38'57" в.д. Профиль II был раз-

бит на квадраты размером 10 × 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 связи с тем, что почвенно-грунтовые условия в пределах профиля являются более или менее однородными (с высотой увеличивается лишь каменистость поверхности), он не был разделен на выделы. В 2004 г. на профиле II был проведен повторный пересчет появившихся молодых листовенниц.

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 листовеннице длительностью 1250 лет [23]. В суровых климатических условиях сильно просмоленные древесные остатки (основания стволов и крупные корни) сохраняются длительное время (до 800–1300 лет). Поскольку у большей части древесных остатков подкоровое кольцо и заболонь не сохранились, то для определения более точной даты отмирания дерева прибавлялось до 15–20 колец. Сердцевинное кольцо было в наличии у большинства спилов. Тем не менее приходилось делать поправки на высоту взятия спила, а у некоторых образцов рассчитывать число сгнивших центральных колец. 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.). Несдатированными оказались в основном небольшие остатки древесины, которые содержали менее 30–40 годичных колец.

Для изучения закономерностей накопления и распределения фитомассы деревьев листовенницы по фракциям (древесина стволов, ветвей и корней до 1 см в диаметре, кора, хвоя) были выкорчеваны и проанализированы 33 модельных дерева (20 одноствольных, 10 многоствольных и 3 стланика) различного возраста и диаметра, произраставшие в непосредственной близости от профиля I. В полевых условиях эти деревья были разделены на фракции. Все фракции были взвешены, а с них взяты навески. В лабораторных условиях все навески высушивались до абсолютно сухого состояния и повторно взвешивались. В результате были получены аллометрические соотношения между диаметром дерева и фитомассой абсолютно сухого вещества каждой фракции. Для многостволь-



**Рис. 2.** Картограмма профиля I, на которой показаны квадраты размером 20 × 20 м (140 шт.) и 25 выделов (номера выделов указаны в кружках): 1 – сомкнутый лес, 2 – редколесье, 3 – редина, 4 – тундра с одиночными деревьями.

ных и стланиковых форм роста лиственницы в качестве диаметра выбрали приведенный диаметр, который соответствует длине окружности, равной сумме периметров всех стволов и ветвей у основания особи.

Для оценки вековых изменений продукционного процесса древесного яруса на профиле I использовались данные о радиальном приросте более 500 живых и 667 отмерших деревьев. На основе этих данных для каждого такого дерева был

рассчитан накапливающийся диаметр в каждом календарном году. Если в образцах древесины имелись сгнившие участки, то для оценки среднего прироста такого участка использовали палетку с концентрическими окружностями. Поправки делались и в тех случаях, когда имелись эксцентричные или сгнившие периферийные годовичные кольца.

У подножия гор Черной и Малой Черной, на южном склоне массива Рай-Из и горе Сланцевой в 2000–2004 гг. было проведено картирование в М 1 : 25 000 и описание лесотундровых сообществ в пределах ЭВГ. Всего было закартировано и описано свыше 900 выделов на площади 5407 га. Для каждого выдела определялся тип сообщества. В качестве основных фитоценологических типов были приняты следующие: тундра с одиночными деревьями, редины, редколесья и сомкнутые леса. Для отнесения конкретного фитоценоза к тому или другому фитоценологическому типу использовали густоту древостоя, которую оценивали через среднее расстояние между деревьями. Применительно к лиственничным сообществам были разработаны следующие критерии отнесения лесотундровых сообществ к тому или другому типу: сомкнутый лес – сообщество со средним расстоянием между деревьями <7–10 м; редколесье – от 7–10 до 20–30 м; редина – от 20–30 до 50–60 м; тундра с одиночными деревьями – >50–60 м. В каждом выделе глазомерно определяли состав и структуру современной растительности, а также основные микроклиматические и почвенно-грунтовые условия. Особое внимание уделяли оценке возрастной структуры древостоя. Кроме того, в пределах каждого выдела реконструировали состав и структуру древостоя в начале 1910-х и 1960-х годов. Реконструкцию осуществляли, анализируя морфологическую и возрастную структуру древостоев и используя описания и перечеты на постоянных пробных площадях и профилях, заложенных в 1960–1962 гг. Особенно большую помощь оказал анализ изображений древесной растительности на ландшафтных фотоснимках, сделанных 40–45 лет тому назад. С помощью геоинформационной системы ARC/INFO (ESRI Inc., США) и пакета по обработке аэрокосмической информации ERDAS Imagine (ERDAS Inc., США) были созданы карты распространения различных типов лесотундровых сообществ для начала и середины XX в. и начала XXI в. Более детальная информация о методике проведения картографических работ изложена ранее [13]. По специально разработанной методике был также выполнен расчет вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы редколесий и сомкнутых лесов [14].

Анализ изменчивости климатических условий производился с использованием 120-летних инструментальных наблюдений по метеостанции

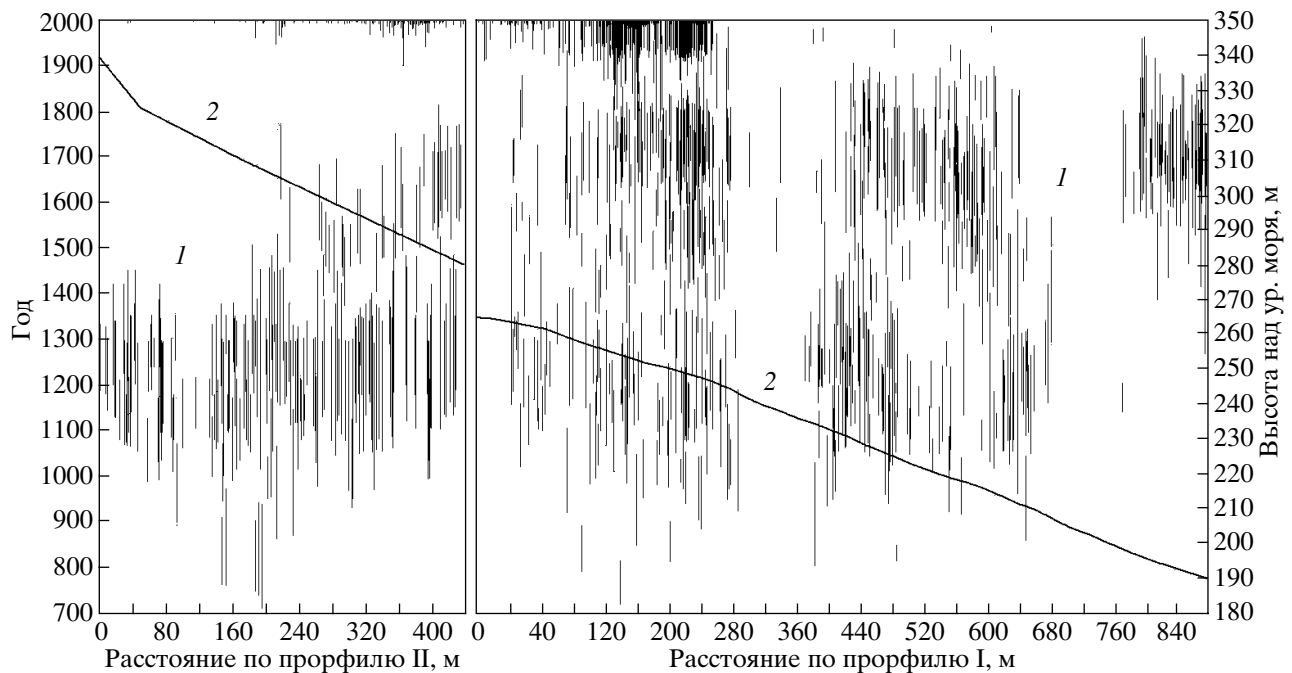
Салехард, расположенной в 55 км к востоку от района исследований, а также при помощи дендроклиматического ряда по лиственнице длительностью 1252 года [1].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Динамика лесотундровой растительности за последнее тысячелетие.** На рис. 3 вертикальными отрезками показано календарное время жизни погибших лиственниц, произраставших в пределах профилей I и II. Наклонные кривые обозначают высоту над уровнем моря в различных частях профилей. Местонахождение и возраст живых деревьев изображены спускающимися вниз от верхней границы рисунка отрезками. На профиле II в течение длительного интервала времени (с начала XIX до начала XX в.) отсутствовали живые деревья. На профиле I такого не наблюдалось, поскольку он расположен в более благоприятных мезоклиматических условиях (средняя и нижняя части ЭВГ). Живые деревья произрастали на нем в течение всего рассматриваемого периода, но на рисунке показаны лишь те из них, которые находятся в верхней лесной полосе (рис. 2, квадраты 1–62).

Как видно из рис. 3, наиболее древняя древесина, сохранившаяся до настоящего времени, принадлежит деревьям, которые появились в начале и середине VIII в. Таких остатков сохранилось немного, так как большая часть их сгнила или сохранились небольшие кусочки древесины, которые невозможно датировать дендрохронологическим методом. Отсутствие древней древесины в нижней части профилей связано с тем, что она здесь перегнивает быстрее в связи с более благоприятными микроклиматическими условиями и обрастанием валежа растительной дерниной.

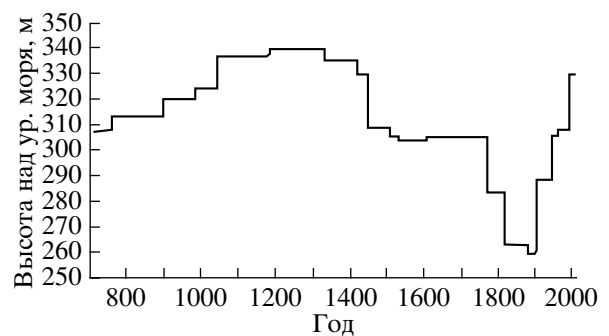
Благодаря длительной сохранности древесины на профиле II и в верхней части профиля I нам удалось реконструировать динамику верхней границы лиственничных редколесий за последние 1300 лет, используя для этих целей самые верхние остатки деревьев (рис. 4). С начала VIII и до конца XII в. происходило непрерывное поднятие верхней границы редколесий с 310 до 340 м над ур. моря. 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 в XV и XIX вв. К началу XIX в. на профиле II не осталось ни одного живого дерева, а верхняя граница редколесий снизилась до 280 м над ур. моря. На профиле I на высоте 250–265 м сохранилось лишь несколько лиственниц и одна ель стланиковой формы роста. Снижение верхней границы редколесий было неравномерным во времени. Более того, во второй



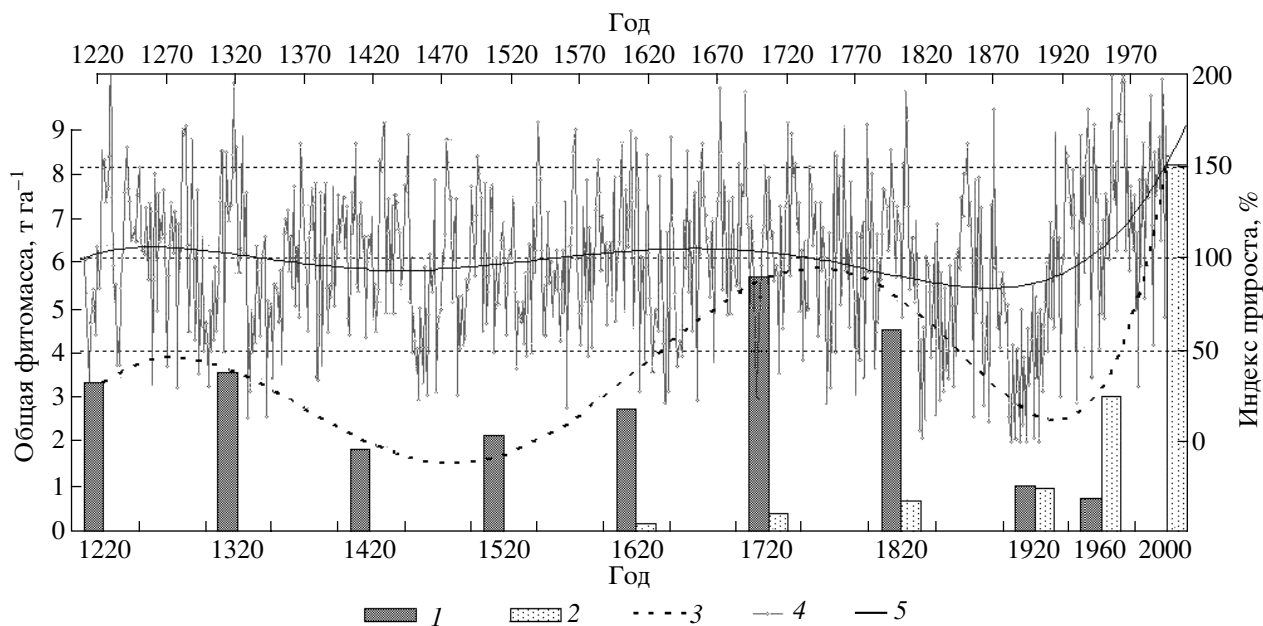
**Рис. 3.** Распределение по календарному времени отмерших и живых деревьев на профилях I и II за последние 1300 лет: 1 – продолжительность жизни дерева, 2 – высота над ур. моря.

половине XVII и большей части XVIII в. произошло небольшое ее поднятие за счет формирования ныне перестойного поколения лиственницы. Ситуация изменилась на противоположную в 1920-х годах, когда на профиле II стал появляться жизнеспособный подрост, а на профиле I стланиковые формы роста деревьев стали превращаться в многоствольные формы. По данным перечетов 1983 г., в нижней половине профиля II было обнаружено всего 16 молодых лиственниц, самая старая из которых появилась в начале XX в. Повторный пересчет, проведенный в 2004 г., показал, что в течение последних 20 лет на этом склоне происходило интенсивное расселение лиственницы. Численность лиственницы, включая молодые деревья и подрост, увеличилась с 16 до 145 шт. (рис. 3). При этом две самые верхние лиственницы возрастом 10 лет появились уже на высоте 330 м над ур. моря, т.е. почти достигли того же высотного уровня, до которого поднималась древесная растительность в XIII в. Верхняя граница редколесий в XX в. на профиле II поднялась с 280 до 310 м, выше встречаются лишь одиночные молодые деревья и подрост. На фотографиях, сделанных с одной и той же точки в 1962 и 2004 гг. в средней части профиля, хорошо видно, что 40 лет назад молодые деревья отсутствовали, а в настоящее время уже сформировалась типичная лиственничная редина. Более подробные сведения о величине и скорости смещения верхней границы редколесий на этом склоне можно найти в работе [24].

Синхронно с высотными изменениями верхней границы редколесий происходили изменения в структуре и продуктивности древостоев лесотундровых сообществ. Анализ рис. 3 показывает, что в XII–XIII вв., когда верхняя граница редколесий поднималась наиболее высоко за последнее тысячелетие, в пределах ЭВГ произрастали наиболее густые древостои, несмотря на то, что не вся древесина отмерших деревьев сохранилась до настоящего времени. Об этом свидетельствует сравнение густоты древостоев на изученных профилях. На профиле II, где условия для перегнивания древесины менее благоприятные, рисунок показывает наличие более густых древостоев по сравнению с профилем I. Впоследствии подобной густоты древостои достигали на профиле I лишь



**Рис. 4.** Динамика верхней границы распространения лиственничных редколесий за последние 1300 лет.



**Рис. 5.** 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 – погодичные колебания индексов радиального прироста лиственницы, 5 – тренд изменения индексов прироста.

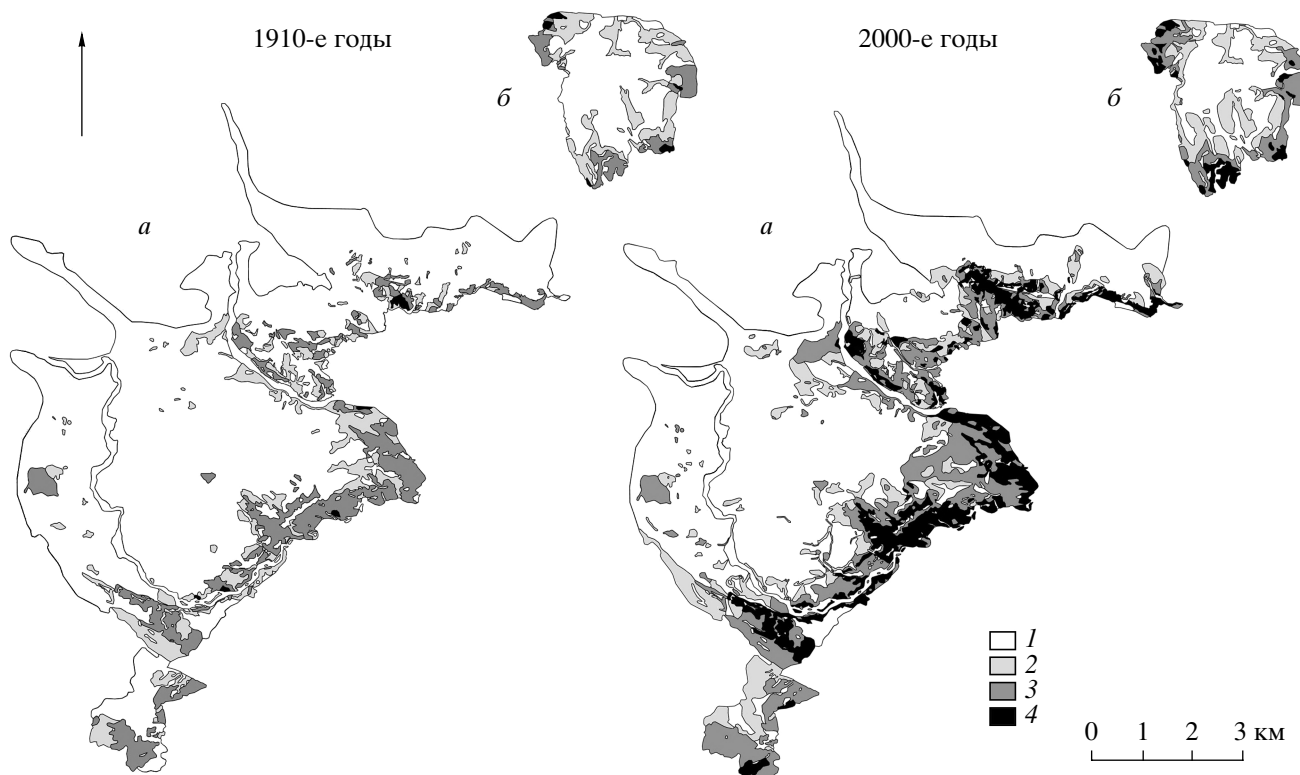
в XVII–XVIII вв. В настоящее время за счет появления молодого поколения лиственницы происходит формирование густых и продуктивных древостоев. Сильное изреживание древостоев происходило в XV–XVI вв. и особенно в XIX в. (рис. 3).

На основе данных о накапливающихся диаметрах у живых и отмерших деревьев на профиле I 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 профиля I за последние 800 лет приведены на рис. 5. Для лучшего восприятия и выявления длительных трендов в изменении фитомассы древостоев фактические данные до начала XX в. представлены через каждые 100 лет, а для современного периода – через 40–60 лет. Фактическая фитомасса для каждого оцениваемого периода являлась суммой фитомассы ныне живых и отмерших деревьев. Хорошо видно, что за рассматриваемый промежуток времени наблюдалось три максимума и два минимума в изменении фитомассы. Первый максимум наблюдался в XIII в., второй – в XVII–XVIII вв., а третий – в XX в. Минимальные запасы фитомассы древостоев на профиле I были в XV–XVI и XIX вв. Необходимо отметить, что на самом деле оценка запасов фитомассы для наиболее древних отрезков времени, по крайней мере до XIX в., является несколько заниженной, так как не была учтена фитомасса деревьев, полностью сгнивших, а также деревьев, от которых остались не-

большие и сильно перегнившие остатки. Как указывалось выше, мелкие остатки древесины, содержащие небольшое число годичных колец, трудно или невозможно датировать при помощи дендрохронологического метода. Для наших целей не так важно точное определение запасов фитомассы за столь длительный интервал времени.

Важнейшим результатом этой работы является выявление длительных трендов в изменении продуктивности древостоев в связи с изменением климатических условий. Для подтверждения этого на рис. 5 показаны погодичные и вековые изменения индексов прироста лиственницы в районе исследований (верхние кривые), которые отражают динамику термического режима летних месяцев (июня-июля) [1]. Индексы прироста были сглажены тем же способом, что и фитомасса древостоев. Следует отметить, что в индексах прироста слабо выражены вековые колебания в результате использования образцов древесины с относительно небольшим числом годичных колец (150–350 шт.), а также применения процедуры стандартизации. Однако на рис. 5 отчетливо видно, что тренды изменения фитомассы и индексов прироста синхронны, что свидетельствует об однонаправленности этих процессов. Как было показано выше, 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 ЭВГ и почвен-





**Рис. 6.** Распределение различных типов лесотундровых сообществ в экотоне верхней границы древесной растительности в начале 1910- и 2000-х годов: *а* – район массива Рай-Из и гор Черной и Малой Черной, *б* – район горы Сланцевой: 1 – тундра с одиночными деревьями, 2 – редина, 3 – редколесье, 4 – сомкнутый лес.

но-грунтовых условий. Такими факторами могут быть только климатические, в частности термический режим летних месяцев. 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 [1, 15]. В среднем века (VIII–XIII вв.) наблюдалось повсеместное потепление климата, которое сменилось похолоданием – так называемым малым ледниковым периодом. Имеются разные точки зрения на то, когда началось и закончилось это похолодание. 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., судя по данным о приросте, структуре, продуктивности и пространственном распространении древостоев лесотундровых сообществ.

**Динамика лесотундровой растительности в XX в.** Чтобы лучше понять и количественно оценить влияние изменений климата на лесотундровую растительность, мы уделили особое внимание изучению изменений, которые произошли в XX в. в связи с современным потеплением клима-

та, начавшимся в 1920-х годах и продолжающимся до настоящего времени.

На рис. 6 приведены картосхемы распределения различных типов лесотундровых сообществ на начало 1910-х и 2000-х годов, а в таблице показаны изменения абсолютных и относительных величин их площадей на начало 1910-х, 1960-х и 2000-х годов. Эти данные свидетельствуют о существенной трансформации и пространственном перераспределении различных типов сообществ в пределах ЭВГ. Происходила интенсивная экспансия древесной растительности, которая выразилась в существенном увеличении площадей редколесий и сомкнутых лесов и сокращении площади тундр с одиночными деревьями (почти на 1 тыс. га). Площадь, занятая рединой, изменялась своеобразно: в первой половине XX в. произошел скачкообразный рост (с 642 до 950 га), а во второй половине этого столетия площадь редины сократилась и в настоящее время лишь на 91 га превышает площадь, которую они занимали в начале рассматриваемого периода. Это связано с тем, что лиственные редины перешли в категорию редколесий и сомкнутых лесов. Площадь редколесий увеличивалась более или менее равномерно – с 618 га в начале прошлого столетия до 951 га в настоящее время. Наиболее сильно изме-

## Распределение и соотношение площадей, занятых различными типами лесотундровых сообществ

Тип лесотундрового сообщества	Начало 1910-х годов		Начало 1960-х годов		Начало 2000-х годов	
	га	%	га	%	га	%
Тундра с одиночными деревьями	4125	76	3464	64	3189	59
Редина	642	12	950	18	733	13
Редколесье	618	11	755	14	951	18
Сомкнутый лес	22	1	238	4	534	10
Итого	5407	100	5407	100	5407	100

нилась площадь, занимаемая сомкнутыми лесами. Если в начале 1910-х годов на рассматриваемой территории было 12 небольших участков сомкнутых лесов, общая площадь которых составляла 22 га, то в настоящее время они занимают 534 га площади экотона. Произошло значительное увеличение степени облесенности территории. Если в 1910-х годах площадь редин, редколесий и сомкнутых лесов составляла 1282 га, или 24% от зартированной площади, то в 1960-х годах она увеличилась до 1944 га (36%), а в настоящее время составляет 2218 га (41%). Другими словами, облесенность экотона возросла почти в 2 раза.

На многих склонах произошло продвижение верхней границы распространения редин, редколесий и сомкнутых лесов выше в горы. Верхняя граница редколесий поднялась в среднем на 26 м, а сомкнутых лесов – на 35 м. Горизонтальный сдвиг этих границ составил в среднем 290 и 520 м соответственно [14].

Одновременно с увеличением площадей, занятых редколесьями и сомкнутыми лесами, значительно увеличился прирост деревьев в высоту и по диаметру. Средняя величина годичного радиального прироста за последние 70–90 лет составила 0.83 мм, которая в предшествующие 60–80 лет была примерно в 4 раза меньше (0.21 мм). Заметно увеличился средний прирост в высоту у лиственницы одноствольной формы роста после 1920-х годов (почти в 2 раза, с 3.2 до 6 см). У стланиковых и многоствольных форм роста лиственницы прирост в высоту за этот период увеличился еще больше (в 4–5 раз, с 0.4–1.2 до 1.9–5.2 см соответственно). Уменьшилась межгодовая изменчивость радиального прироста, обусловленная в основном колебаниями термических условий летнего периода (коэффициент чувствительности снизился с 0.6 до 0.4), что свидетельствует об улучшении условий для роста деревьев.

Во второй половине XX в. возросла также и продуктивность древостоев. На основе данных повторных переучетов на профиле I были получены оценки изменения фитомассы, числа деревьев, запаса и полноты древостоев за последние 40 лет. На рис. 7 представлены оценки этих изменений для каждого из 25 выделов. Как видно из

рис. 7, произошло увеличение фитомассы, густоты и полноты древостоев в 2–5 раз на большинстве выделов за столь короткий промежуток времени. На отдельных выделах, почти безлесных в 1960-х годах, эти показатели увеличились еще больше.

По высотному градиенту профиля I распределение фитомассы древесного яруса лежит в пределах от 7 т га<sup>-1</sup> до 30 т га<sup>-1</sup>. При этом соотношение надземной и подземной фитомассы в верхней части профиля равно 3.4 : 1, в средней части – 1.9 : 1, а в нижней части – 1.7 : 1.

В нижней части экотона под пологом лиственничных древостоев наблюдается успешное возобновление ели сибирской. Данные об экспансии ели под полог лиственничных древостоев и смещении верхней границы распространения ели выше в горы получены нами лишь в 2006 г. на специально заложенном профиле и в этой статье не рассматриваются.

Мы считаем, что интенсивная экспансия древесной растительности в XX в. обусловлена повышением температуры в летний и зимний периоды. Подтверждением этому является анализ инструментальных данных по метеостанции Салехард за последние 120 лет. Согласно этим данным, в 1920-х годах произошло существенное потепление и увлажнение климата, которое продолжается до настоящего времени. Температура летних месяцев (июня–августа) в 1883–1920 гг. составляла 10.7°C, в 1920–2004 гг. – 11.4°C, т.е. возросла на 0.7°C, а зимних месяцев (ноябрь–март) – на 1.1°C (с –20.8° до –19.7°C). Количество выпавших осадков в летние месяцы увеличилось на 32 мм (с 147 до 179 мм), а зимних – на 46 мм (с 67 до 113 мм). Как показало сравнение реконструированных летних температур по ширине годичных колец лиственницы в разных районах Сибирской Субарктики [1], на Полярном Урале в XX в. происходило наиболее значительное потепление климата по сравнению с севером Западной Сибири и Таймыром. Существенное значение для интенсивной экспансии древесной растительности имел более ранний срок начала вегетационного периода, о чем свидетельствует значительное повышение температуры мая. Если в 1883–1920 гг. она со-

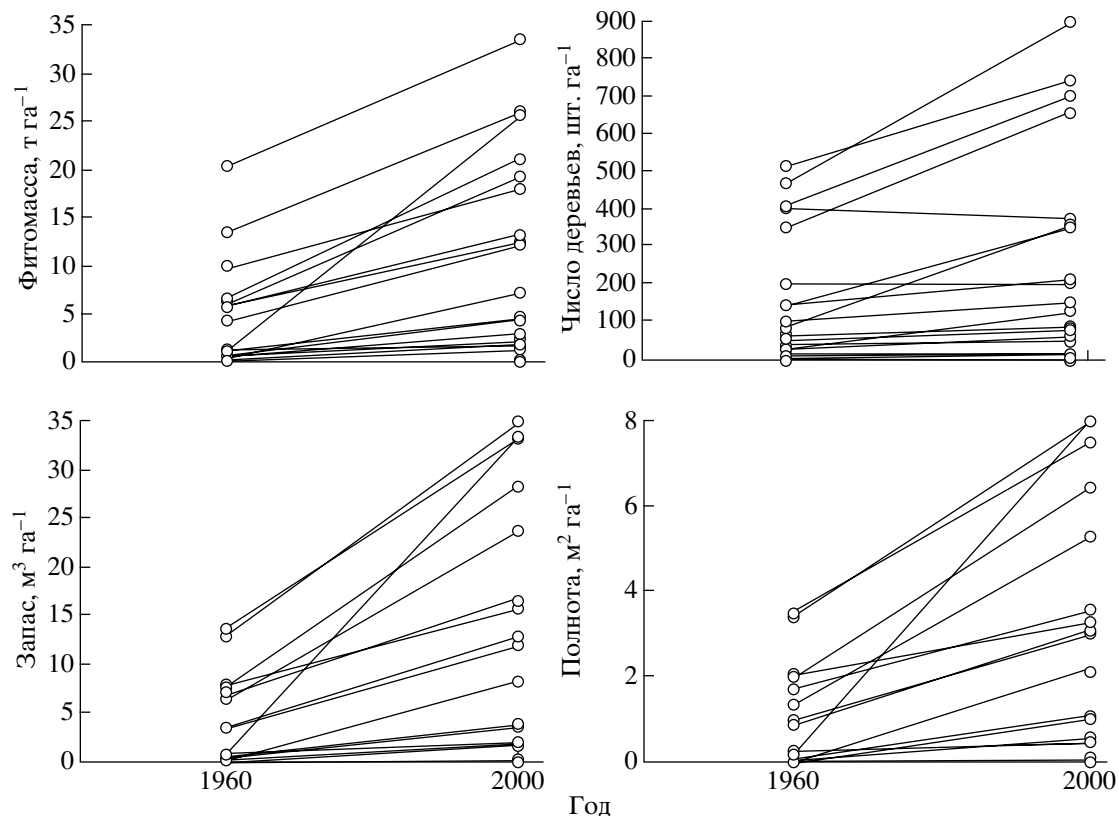


Рис. 7. Изменение таксационных характеристик на 25 выделах профиля I с 1960 по 2000 г.

ставляла  $-2.4^{\circ}\text{C}$ , то в 1920–2004 гг. повысилась до  $-1.1^{\circ}\text{C}$ , т.е. возросла на  $1.3^{\circ}\text{C}$ . Учитывая, что высотный градиент температуры летних месяцев на Полярном Урале составляет  $0.7^{\circ}\text{C}$ , температурная граница, при которой возможно существование древесной растительности, поднялась выше в горы примерно на 100 м.

По интенсивности современное потепление, видимо, сравнимо с потеплением, наблюдавшимся в XII–XIII в. Однако на большинстве склонов древесная растительность еще не достигла своего климатически обусловленного предела и тех высотных уровней, на которых она произрастала в XIII в. Основной причиной этого является слабая обеспеченность семенами тундровых участков, расположенных в верхней части ЭВГ. Ранее было показано [9], что в этом районе вылет семян лиственницы из шишек происходит на следующий год после их формирования. Весь зимний период семена находятся в шишках, и лишь с наступлением теплой и солнечной погоды шишки раскрываются и начинается их массовый вылет. Обычно это происходит в июне-июле, когда снеговой покров отсутствует. Тяжелые семена лиственницы разносятся ветром не далее чем на 40–60 м от плодоносящего дерева, и дальнейшее их распространение вверх по склону происходит в незначительных количествах. Поэтому многие пригодные для

произрастания древесной растительности местообитания до сих пор остаются безлесными или слабооблесенными. С этой точки зрения можно объяснить, почему наиболее существенное облесение тундровых территорий и более интенсивная трансформация редкостойных древостоев в более густые происходили в нижней части ЭВГ, где, кроме более благоприятных микроклиматических и почвенно-грунтовых условий, лучше обеспеченность семенами.

**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 этой статье количественные данные о реакции различных компонентов лесотундровых сообществ на изменение климатических факторов могут быть использованы для этих целей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурызбаев М.М. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1.5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов // Докл. РАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 681–684.
2. Уткин А.И. Леса Центральной Якутии. М: Наука, 1965. 208 с.
3. Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. 1995. № 5. С. 3–20.
4. Уткин А.И. Рецензия на кн.: Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике: Наука, 1996. 204 с. // Лесоведение. 1997. № 6. С. 64–65.
5. Уткин И.А. О возможной динамике лесной растительности в экотонах Северной Евразии при глобальном потеплении // Классификация и динамика лесов Дальнего Востока. Матер. Междунар. конф. Владивосток, 5–7 сентября 2001 г. Владивосток, 2001. С. 125–127.
6. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
7. Шиятов С.Г. Верхняя граница леса на Полярном Урале и ее динамика в связи с изменениями климата // Докл. Первой науч. конф. молодых специалистов-биологов. Свердловск: Ин-т биологии Урал. фил. АН СССР, 1962. С. 37–48.
8. Шиятов С.Г. Возрастная структура и формирование древостоев лиственных редколесий на верхней границе леса в бассейне реки Соби (Полярный Урал) // География и динамика растительного покрова. Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР, 1965. Вып. 42. С. 81–96.
9. Шиятов С.Г. Время рассеивания семян лиственницы сибирской в северо-западной части ареала и роль этого фактора во взаимоотношении леса и тундры // Вопросы физиологии и геоботаники. Зап. Свердловского отд-ния ВБО. 1966. Вып. 4. С. 109–113.
10. Шиятов С.Г. О типах верхней границы леса и ее динамике на Полярном Урале // Биологические основы использования природы Севера. Сыктывкар: Коми книжное изд-во, 1970. С. 73–81.
11. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
12. Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Климатогенная динамика лесотундровых экосистем в горах Полярного Урала // Экологические проблемы горных территорий. Матер. Междунар. науч. конф., 18–20 июня 2002 г. Екатеринбург: Академкнига, 2002. С. 41–45.
13. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. С. 1–8.
14. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В., Цимменманн Н.Е. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. 2007. № 4. С. 243–248.
15. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, San Paulo: Cambridge University Press, 2005. 1042 p.
16. Climate Changes and Their Impact on Boreal and Temperate Forests. International Conference (June 5–7, 2006, Ekaterinburg, Russia). Abstracts. Ekaterinburg, 2006. 127 p.
17. Growth Trends in European Forests. Studies from 12 Countries / Eds. Spiecker H. et al. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996. 372 p.
18. Holtmeier F.-K. Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2003. 369 p.
19. Jurday G.P. Forests, Land Management, and Agriculture // Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, San Paulo: Cambridge University Press, 2005. Chapter 14. P. 781–862.
20. Korner Ch. Alpine Plant Life. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 343 p.
21. Kullman L. Dynamics of altitudinal tree-limits in Sweden: a review // Nor. Geogr. Tidsskr. 1990. V. 44. P. 103–116.
22. 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.
23. 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. V. 6/95, 1995. P. 144–147.
24. 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.

## The Climatogenic Dynamics of Forest-Tundra Vegetation in the Polar Urals

S. G. Shiyatov and V. S. Mazepa

The paper presents the results of long-term studies related to the influence of climatic changes on the species composition, structure, productivity, and spatial distribution of forest-tundra communities at a timberline on the eastern macroslope of the Polar Urals (the Sob River basin). The limits of variation of forest-tundra vegetation for the last millennium are shown. Such parameters, as the age structure, stand density and productivity, altitude of the timberline for sparse and dense larch forests are considered. These characteristics were compared with secular changes in summer temperature reconstructed using the tree-ring analysis. The spatial-temporal dynamics of forest-tundra communities within the twentieth century has been analyzed in detail related to the current warming of climate.