

УДК 630*182:581.5

ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ И ДЕНДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

© 2005 г. Е. А. Ваганов¹, С. Г. Шиятов²

¹ Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок

² Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

Поступила в редакцию 20.02.2005 г.

В статье представлены основные результаты многолетних исследований влияния внешних факторов на динамику роста древесных растений в высоких широтах Евразии, полученные в последнее десятилетие объединенными усилиями двух основных специализированных дендрохронологических лабораторий СО РАН (Красноярск) и УрО РАН (Екатеринбург). Рассмотрены результаты пространственно-временной реконструкции длительных изменений температуры, а также реконструкции состава и структуры лесотундровых редколесий и динамики полярной и верхней границ леса в последние столетия и за несколько тысячелетий, описаны особенности реакции древесных растений разных секторов Северной Евразии на изменения климата. Представлены данные по созданию на территории России сети станций дендроклиматического и дендрозоологического мониторинга.

Дендроклиматология, дендрозоология, древесно-кольцевые хронологии, климат, вулканическая деятельность, экотон лес-тундра, глобальные изменения, север Евразии, Субарктика.

В докладе на Втором всесоюзном географическом съезде в 1948 г. академик В.Н.Сукачев, автор теории биогеоценологии, особо подчеркнул, что основной задачей биогеоценологии является всестороннее изучение обмена веществ и энергии между всеми компонентами биогеоценоза и между ними и окружающей средой. Если в середине XX в. исследования энерго- и массообмена между компонентами биогеоценоза и средой чаще имели качественный характер, то в настоящее время они твердо встали на прочную количественную основу, подкрепляемую постоянно растущим арсеналом новых методов и приборов для экологических исследований. К большому числу наземных методов органически добавляются и дистанционные. Широкое использование количественных методов, установление численных закономерностей и функциональное описание взаимосвязей как в рамках статистических, так и имитационных моделей переводит биогеоценологию из разряда учений в действующую теорию. Биогеоценология обогащается привлечением новых методов исследования из разных дисциплин: физики, химии, математики и др. Свой вклад в развитие количественной биогеоценологии вносит и дендрозоология - раздел экологической науки, занимающийся анализом влияния факторов внешней среды на рост древесных растений в пространственном и особенно во временном масштабах. В статье мы сосредоточились на примерах эффек-

тивного использования арсенала методов дендрозоологии в анализе реакции радиального прироста древесных растений в высоких широтах Евразии на климатические изменения в прошлом, справедливо полагая, что эти результаты являются существенным вкладом в развитие теории биогеоценологии, как в исследовании растительных ценозов и формаций, так и в направлении развития палеогеографии, т.е. тех направлений, которые активно развивал акад. В.Н. Сукачев.

Пространственно-временной анализ отклика радиального роста деревьев на климатические изменения и реконструкция изменений температуры в Северной Евразии за последние 400 лет. В начале 1990-х силами двух специализированных лабораторий дендрохронологии (Красноярск и Екатеринбург) совместно с иностранными коллегами была создана сеть станций для дендроклиматического мониторинга роста древесных растений в высоких широтах Евразии [8, 9, 17, 18]. Впервые для территории севера России были получены длительные древесно-кольцевые хронологии для условий полярного предела распространения древесной растительности по трансекте от Урала до Чукотки. Практически для всех участков лесотундровой зоны (более 80) длительность хронологий превышала 400 лет. Были найдены отдельные живые экземпляры лиственницы даурской и Каяндера, достигающие возраста 750-900 лет [4, 5, 7]. Все полученные хронологии

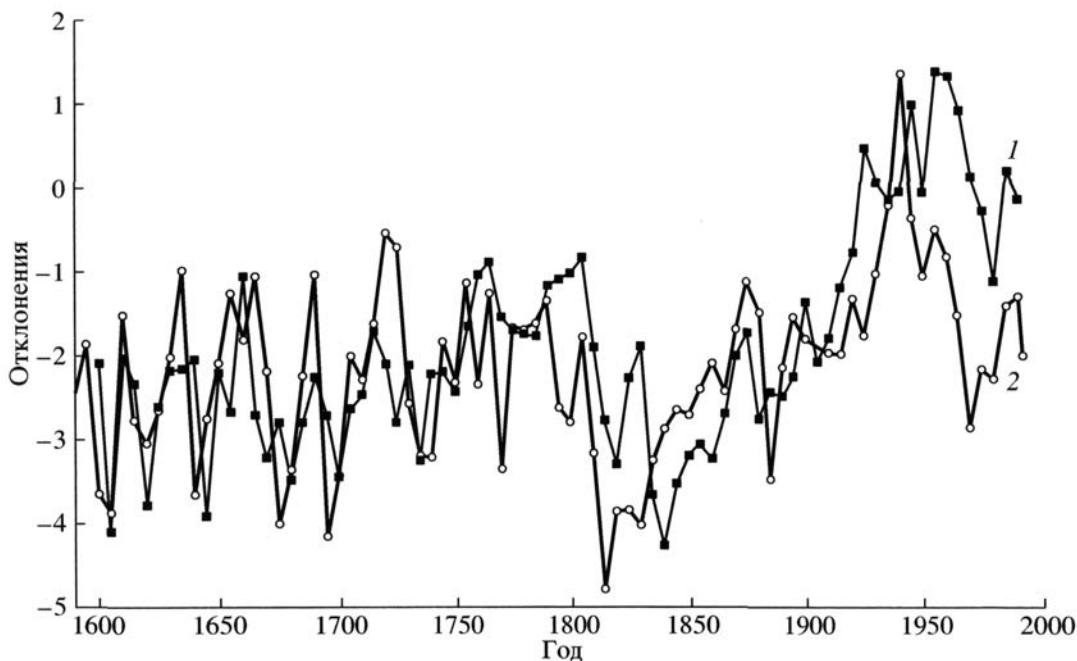


Рис. 1. Сопоставление длительных изменений температуры в Арктической области по данным [34] (1) и сети дендрохронологических станций Сибири (2).

имели высокие значения чувствительности к ежегодным климатическим изменениям и показывали высокую синхронность в пределах участков сети. Пространственный анализ синхронности изменений радиального прироста выявил, что корреляция между хронологиями является высокозначимой даже на расстояниях 300-400 км между отдельными участками [9, 25]. Это свидетельствует о сходстве в реакции роста на изменения регионального климата для крупных секторов Субарктики. Используя результаты пространственного корреляционного анализа хронологий, вдоль трансекта были выделены 6 относительно однородных в дендроклиматическом отношении районов, которые достаточно точно совпали с имеющейся физико-географической классификацией территории [9]. В пределах этих районов климатический отклик деревьев является сходным не только к длительным изменениям прироста, но и в погодичных изменениях, что позволяет точно датировать любые локальные хронологии из данного региона, используя осредненные генерализованные (региональные) кривые.

Анализ корреляций древесно-кольцевых хронологий с климатическими переменными (средними месячными величинами температуры и осадков) выявил следующее: 1) погодичная изменчивость радиального прироста на 60-70% определяется вариациями летней (июнь-июльской) температуры; 2) в восточном направлении относительный вклад температуры июля уменьшается, что связано как с более ранним началом сезо-

на роста, так и с уменьшением высоты снежного покрова [3, 8, 25, 32, 39]; 3) хронологии по максимальной плотности древесины годичных колец интегрируют температурный отклик за более длительный интервал сезона (июнь-сентябрь), чем хронологии по ширине годичных колец [23, 32]. Таким образом, анализируя древесно-кольцевые хронологии по ширине и максимальной плотности древесины годичных колец, удается получить реконструкции летней температуры, выделив наиболее активный период сезона (его первую половину) и в целом весь сезон роста. Используя сеть дендроклиматических станций, была произведена ежегодная реконструкция изменений летней температуры вдоль всей трансекты (длиной около 5000 и шириной 250 км) [9], которая позволила оценить особенности пространственных колебаний температуры в субарктической части Евразии за последние 400 лет (с 1610 по 1991 г.). Длительные изменения температуры для всей трансекты были получены усреднением ежегодных отклонений для отдельных районов, и построенная интегральная кривая сопоставлена с длительными изменениями температуры для циркумполярной области Северного полушария (рис. 1), опубликованными ранее [2, 34]. Соответствие двух реконструкций не вызывает сомнений и подтверждается как высоким коэффициентом корреляции ($R = 0.54, p < 0.0001$), так и совпадением длительных (повышение температуры в арктических широтах в середине XX в.) и более коротких колебаний температуры (особенно в XVII

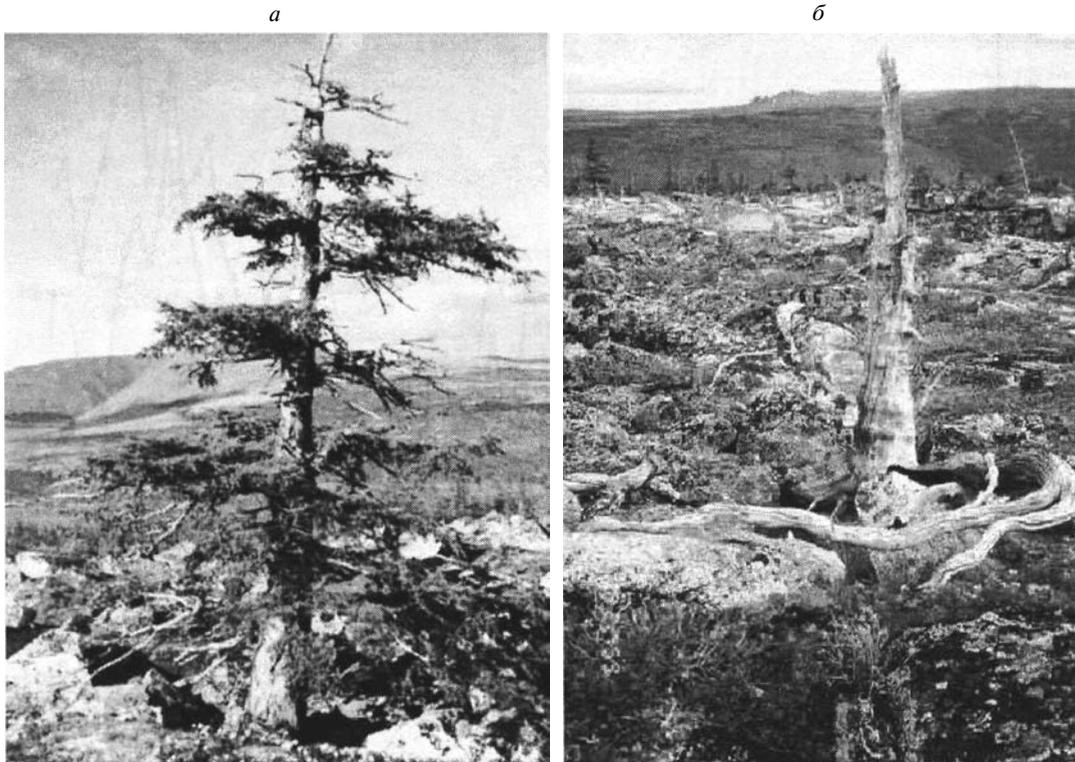


Рис. 2. Старое живое (а) и ствол отмершего (б) деревьев лиственницы.

и XVIII вв. в "малый ледниковый период"). Позднее аналогичный характер длительных изменений температуры в высоких широтах Северного полушария подтвержден и обобщением косвенных данных в других публикациях [24, 26]. Таким образом, результаты анализа изменений климата по длительным древесно-кольцевым хронологиям сети станций в Северной Евразии не только подтвердили уникальные возможности годичных колец деревьев в реконструкции изменений климата, но и дали в руки климатологов достаточно точный инструмент для количественных оценок этих изменений.

Тысячелетние древесно-кольцевые хронологии и изменчивость температуры на севере Евразии в позднем голоцене. В процессе сбора древесного материала для построения древесно-кольцевых хронологий во многих районах лесотундровой зоны были найдены хорошо сохранившиеся на земной поверхности остатки стволов деревьев, а также захороненных в аллювиальных и торфяных отложениях голоценового возраста и консервированных вечной мерзлотой (рис. 2). Особенно много отмершей и полуископаемой древесины найдено на Полярном Урале, п-ве Ямал, на северо-востоке Таймыра и в низовьях р. Индигирки [13, 15, 17, 37]. Радиоуглеродные даты отдельных стволов деревьев свидетельствуют, что они росли в указанных районах в разное время

голоцена, а систематический сбор отмершей и полуископаемой древесины и последующее ее датирование открывает возможности получения тысячелетних древесно-кольцевых хронологий протяженностью на весь период голоцена (длительность около 10000 лет) [14, 16, 33]. Среди находок отмерших стволов были датированы несколько, которые показали рекордные собственные возрасты деревьев из северных широт Северного полушария [2, 5]. В низовьях Индигирки найден ствол лиственницы Каяндера собственного возраста 1216 лет. Этот возраст на настоящее время - максимальный собственный возраст деревьев, зафиксированный для всей субарктической области Северного полушария.

Обширные сборы отмершей и полуископаемой древесины и последующая датировка образцов методом перекрестного датирования позволила для трех крупных районов северной Евразии (Ямал, северо-восток Таймыра и низовья Индигирки) получить более чем 2000-летние абсолютно датированные древесно-кольцевые хронологии, обеспеченные числом образцов на каждый из временных интервалов, достаточным для проведения количественных реконструкций изменчивости летней температуры на севере Евразии за последние 2 тысячелетия голоцена (рис. 3) [10, 13]. Количественная реконструкция изменений летней температуры, выполненная на основе этих и с

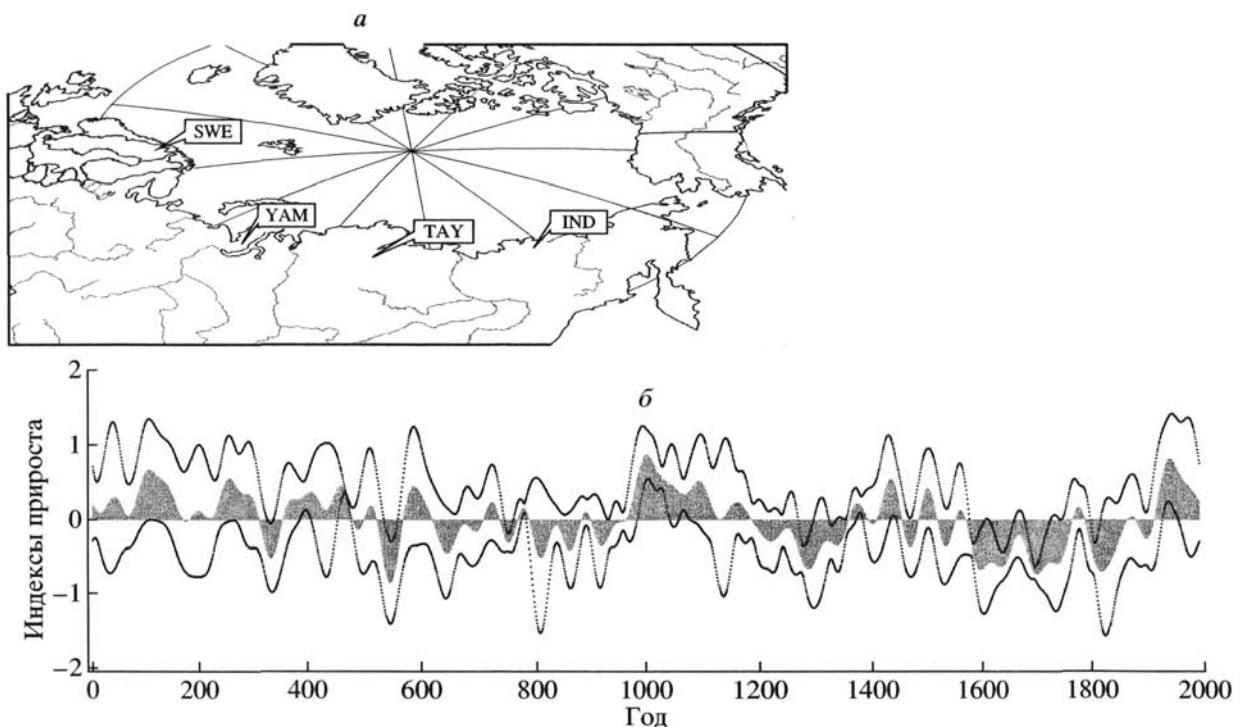


Рис. 3. Местоположение древесно-кольцевых хронологий севера Евразии (а) и их объединение в 2000-летнюю древесно-кольцевую хронологию (б). Пунктир - среднеквадратическое отклонение.

привлечением данных скандинавской тысячелетней хронологии показала следующее: 1) основной сигнал в изменчивости прироста деревьев у всех хронологий определяется изменчивостью летней (июнь-июльской) температурой; 2) погодичные изменения температуры в разных секторах субарктики Евразии не синхронны, однако длительные (внутривековые и сверхвековые) изменения происходили однотипным образом; 3) в последнее столетие увеличение прироста деревьев вследствие роста температуры несколько ранее и более интенсивно отмечается в западной части трансекты по сравнению с восточной; 4) все тысячелетние хронологии четко выявляют средневековое потепление, которое имело две фазы (более интенсивное - в XI и XII вв., менее интенсивно - вторая половина XIII - начало XIV в.); 5) все хронологии выявляют малый ледниковый период (начало XVI - середина XIX в.); 6) как прошлые, так и текущие изменения температуры на севере Евразии характеризуются пространственной неоднородностью - разной величиной колебаний температуры в разных секторах субарктической области. Региональная специфика в изменениях летней температуры значительна, особенно в первое тысячелетие. Однако современное потепление, начавшееся в середине XIX в., по амплитуде увеличения температуры пока не превысило уровня средневекового потепления, и в большей степени проявилось в западной части трансекты,

чем в восточной. Усредненные по отдельным столетиям оценки летней температуры показывают, что на протяжении 2 тысячелетий позднего голоцена температура колебалась в пределах 0.9-1.8°C для разных секторов субарктики Евразии. По полученным "плавающим" хронологиям для более ранних периодов голоцена оценки изменений температуры достигают больших значений, например, 3.5°C для периода оптимума голоцена. Эти пределы колебаний температуры достаточны для существенных сдвигов в границах лесорастительных зон, что подтверждают и результаты других косвенных источников, например, споропыльцевых спектров [21]. Результаты реконструкций изменений температуры в субарктике на длительностях, соизмеримых с длительностями жизни отдельных поколений деревьев, показывают, что в высоких широтах Евразии изменения температуры в период голоцена были существенными для динамики растительности и для изменений продуктивности лесных экосистем, а также для колебаний экотона «лес-тундра». Эти изменения соответствуют прогнозируемым колебаниям температуры по имеющимся климатическим сценариям глобального потепления, поэтому результаты реконструкций могут быть использованы и как аналоги для оценки реакции древесной растительности на длительные изменения климата [13].

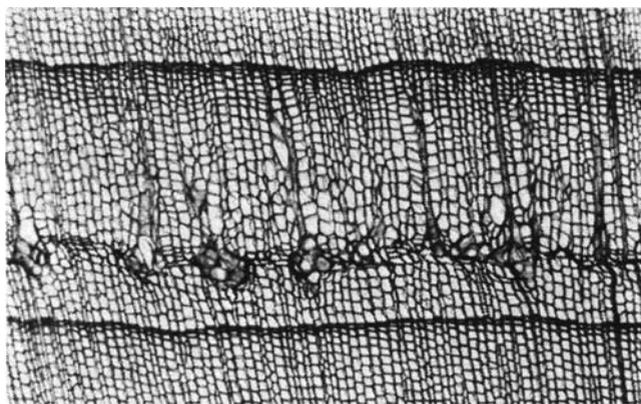


Рис. 4. Морозобойное кольцо.

Морозобойные кольца, депрессии радиального прироста деревьев и вулканические извержения в Северном полушарии. Существенное влияние на состояние, функционирование и устойчивость лесных экосистем оказывают экстремальные климатические события, в частности заморозки и длительные понижения температуры в течение вегетационного сезона, которые часто случаются в высоких широтах и высокогорьях. Такие температуры вызывают нарушение процессов роста и дифференцировки клеток древесины, и в годичном кольце формируется слой деформированных или слабо лигнифицированных клеток [7] (рис. 4). Годичные кольца, содержащие слой деформированных клеток, называются морозобойными, а кольца, у которых имеются слаболигнифицированные клетки поздней древесины, называются светлыми [27, 28]. Выявление и датировка таких колец у хвойных видов деревьев и кустарников позволяет реконструировать эти экстремальные события за длительный интервал времени и для конкретных участков.

В последние годы изучению морозобойных и светлых колец на севере Западной Сибири и Полярном Урале уделялось большое внимание [11, 12, 15, 29]. Показано, что наиболее часто морозобойные повреждения встречаются у ели сибирской и можжевельника сибирского по сравнению с лиственницей сибирской. Особенно перспективным для выявления морозобойных повреждений оказался можжевельник сибирский, который имеет тонкий теплозащитный слой (кору) и большой возраст (до 850 лет). В некоторых годичных кольцах ели сибирской содержится два морозобойных повреждения. Светлые кольца чаще встречаются у лиственницы. На основе анализа частоты этих патологий произведена реконструкция интенсивности заморозков и длительности понижений температуры воздуха за последние 1250 лет. Наиболее сильные весенне-летние заморозки на севере Западной Сибири происходили в 801, 1109, 1259, 1278, 1466, 1601, 1783 и 1882 гг. Показано, что экстремальные температурные события в эти годы наблюдались на больших территориях Северного полушария и часто совпадали с наиболее мощными вулканическими извержениями (рис. 5) [29].

Выброс значительных объемов вулканической пыли при извержении снижает прозрачность атмосферы и количество солнечной радиации, достигающей поверхности земли. Последовательность этих процессов приводит и к снижению температуры. Такова логика рассуждений, которая связывает даты извержения вулканов с возможным эффектом в радиальном приросте и структуре годичных колец. Естественно, что не только образование морозобойных колец, но и глубокие депрессии радиального прироста могут быть объяснены вулканической деятельностью [23]. Имея в распоряжении наиболее длительные хронологии по арктической области Северного полушария и полагая, что именно в этой области изменения температуры вследствие вулканичес-

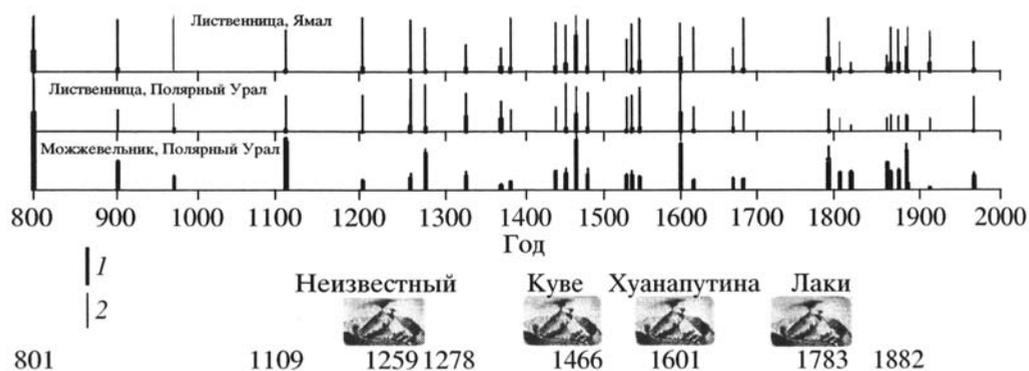


Рис. 5. Хронология "патологических колец". Приведены некоторые названия вулканов, крупные извержения которых могли вызвать заморозки на севере Западной Сибири: 1 - морозобойные кольца, 2 - светлые кольца [29].

кой активности могут быть наиболее заметны для растительности, мы сопоставили изменения радиального прироста деревьев до и после наиболее крупных ($VEI > 4$) вулканических извержений в Северном полушарии, даты которых точно определены [22, 23, 41].

За последние тысячелетие было рассмотрено сто событий ($n = 100$) наиболее мощных вулканических извержений из Северного полушария. В результате объединения данных получена суммарная кривая ответной реакции прироста деревьев для четырех тысячелетних хронологий на вулканические извержения (рис. 6). Из графика видно, насколько существенно подавляется радиальный прирост деревьев после извержений. На положительный уровень интегральные кривые выходят только после 5 лет. Полученная методом наложенных эпох кривая сопоставлена с аналогичной кривой, полученной Г. Зелинским по изменению приземной температуры воздуха в Северном полушарии на мощные вулканические извержения, в которых объединены данные только по годам активной вулканической деятельности за два последних столетия (1815, 1835, 1875, 1883, 1902, 1947, 1956, 1963 гг.) [40]. Сопоставление подтвердило вывод о том, что выброс вулканической пыли снижает летнюю и среднегодовую температуру воздуха и это наиболее существенно сказывается на приросте деревьев в высоких широтах, где рост растительности существенно лимитирован дефицитом тепла.

Дендрохронологический анализ динамики верхней границы леса в голоцене на Полярном Урале и Ямале. На основе 53 радиоуглеродных датировок полуископаемой древесины лиственницы сибирской и ели сибирской, собранной в аллювиальных и торфяных отложениях Южного Ямала, выделены и уточнены временные границы трех длительных этапов эпохи голоцена (раннего, среднего и позднего), характеризующихся различным положением полярной границы редколесий и степенью облесенности территории [16]. Самым благоприятным периодом для произрастания древесной растительности был ранний голоцен (10500-7400 лет назад), когда полярная граница редколесий проходила на 200-400 км севернее от ее современного положения и лиственничные редколесья были широко распространены на плакорных местообитаниях. В среднем голоцене (7400-3700 лет назад) полярная граница редколесий опустилась к югу и в течение длительного интервала времени располагалась в 50-70 км к северу от ее современного положения. В начале второго тысячелетия до нашей эры произошел значительный сдвиг к югу (на 30-40 км) полярной границы редколесий, причем это событие произошло за короткий промежуток времени. В последние 3700 лет (поздний голоцен) полярная граница редколесий занимала наиболее

южное положение и лиственничные и елово-лиственничные редколесья сохранились лишь в долинах рек, текущих с севера на юг (Танловаяха, Хадыгтаяха, Ядаяходьяха и др.). Более детальная реконструкция динамики полярной границы леса на Ямале произведена за последние 4000 лет на основе использования более 500 абсолютных дендрохронологических датировок остатков полуископаемых деревьев [14, 30]. Было подтверждено, что в результате резкого похолодания климата, происшедшего 3700 лет назад, произошел существенный сдвиг полярной границы редколесий к югу. В последующем происходили лишь незначительные (до 10 км) ее колебания в направлении «север-юг». Наиболее длительный период позднего голоцена, неблагоприятный для древесной растительности, наблюдался с 20 до 310 г. до нашей эры. В XX в., несмотря на потепление климата, сдвига полярной границы редколесий к северу не происходило в результате интенсивного хозяйственного использования этой территории (выпас домашнего северного оленя).

Наиболее интенсивное изучение климатогенной динамики лесотундровых сообществ проведено на восточном макросклоне Полярного Урала [19, 20, 31, 35, 36, 38]. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ изучалась в пределах полярноуральского мониторингового полигона, площадь которого составляет около 70 км². В пределах экотона имеется большое количество сухостоя и валежа. В силу суровых климатических условий древесина отмерших деревьев сохраняется на дневной поверхности многие сотни лет, что дает возможность изучать динамику древостоев за длительные интервалы времени. На основе дендрохронологической датировки времени появления и отмирания большого количества деревьев лиственницы, а также изучения возрастной и морфологической структуры ныне существующих древостоев, была реконструирована динамика состава и структуры лиственничных древостоев и верхней границы распространения редколесий за последние 1350 лет. Показано, что в средние века (с VII по XIII в.) климатические условия были благоприятными, в результате чего древесная растительность поднималась выше в горы до 60-80 м по сравнению с ее современным положением. В то время произрастали значительно более продуктивные и густые древостои. Начиная с XIV в. и до начала XX в. древесная растительность деградировала в связи с преобладанием холодного и влажного климата. Наиболее низкое положение верхней границы леса наблюдалось в конце XIX - начале XX в. Однако в начале 1920-х годов эта тенденция изменилась на противоположную в связи с очередным потеплением климата Арктики. Это потепление продолжается вплоть до настоящего времени, что привело к экспансии древесной растительности в

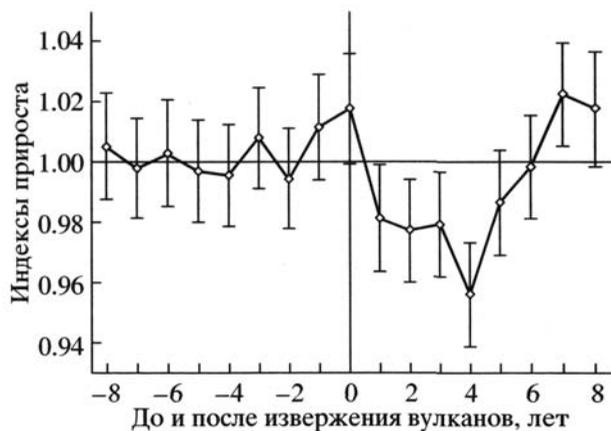


Рис. 6. Реакция прироста деревьев на вулканическую активность, установленная по методу наложенных эпох $n = 100$.

тундровые сообщества и увеличению продуктивности ранее существовавших древостоев. Для количественной оценки изменений в составе и структуре лиственных и елово-лиственных древостоев, которые произошли в XX в., были использованы постоянные высотные профили и пробные площади, заложенные в начале 1960-х и 2000-х годов, изображения древесной растительности на старых ландшафтных фотоснимках, аэро- и космоснимках. Кроме того, в пределах полярноуральского мониторингового полигона по специально разработанной методике было проведено крупномасштабное наземное картирование и описание лесотундровых сообществ на площади 54 км² (более 900 выделов). Наиболее наглядно происшедшие изменения в лесотундровой растительности Полярного Урала фиксируются при сравнении изображений ландшафтных фотоснимков, сделанных в разное время с одной и той же точки. На фотографиях, сделанных с восточного склона горы Малой Черной в 1962 и 2004 гг. (рис. 7), хорошо видно, что за последние 42 года произошло значительное облесение экотона верхней границы леса по левому берегу р. Кердоманшор. Там, где раньше произрастали одиночные деревья и редины, к настоящему времени

сформировались типичные редколесья и даже сомкнутые лиственные леса. К настоящему времени в пределах полярноуральского полигона сделано свыше 900 таких снимков, которые позволили реконструировать состав и структуру древостоев в различных выделах на начало 1960-х годов. В таблице приведены результаты подсчета площадей, занятых различными типами лесотундровых сообществ, по состоянию на начало 1910-х, 1960 и 2000-х годов по результатам наземного картирования. Видно, что в течение последних 90 лет площадь тундр с одиночными деревьями сократилась почти на 1000 га, в то время как площадь редины, редколесий и сомкнутых лесов увеличилась. Наиболее сильно изменилась 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. Одновременно с увеличением площадей, занятых рединами, редколесьями и сомкнутыми лесами, значительно увеличился прирост деревьев в высоту и по диаметру, а также возросла густота, сомкнутость крон и продуктивность древостоев. Существенно изменилось соотношение одноствольных, многоствольных и стланиковых форм роста деревьев. В нижней части экотона под пологом лиственных древостоев наблюдается успешное возобновление ели сибирской. На многих склонах верхняя граница леса поднялась выше в горы на 50-80 м. Произошло значительное увеличение облесенности территории. Если в начале 1910-х годов площадь редины, редколесий и сомкнутых лесов составляла 1282 га, или 24%, то в начале 1960-х годов она увеличилась до 1944 га (36%), а в настоящее время составляет 2218 га (41%). Наиболее существенное облесение тундровых территорий и более интенсивная трансформация редкостойных древостоев в более густые произошли в нижней части экотона, где, помимо более благоприятных микроклиматических и почвенно-грунтовых условий, также лучшая обеспеченность семенами. Экспансия древесной растительности на Полярном Урале

Распределение и соотношение площадей, занятых различными типами лесотундровых сообществ (Полярный Урал, бассейн р. Соби)

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

а



б



Рис. 7. Вид с одной и той же точки на восточном склоне горы Малая Черная (Полярный Урал), отражающей изменение облесенности и продуктивности лиственничных древостоев в экотоне верхней границы леса: а - 1962 г., б - 2004 г.

связана с существенным улучшением температурных условий для произрастания древесной растительности и более ранним началом вегетационного периода.

Заключение. В условиях постепенного увеличения глобальной температуры все больше внимания уделяется региональным особенностям климатических изменений, поскольку эти изменения могут быть разнонаправлены, а многие из характеристик продуктивности наземных биоценозов определяются именно региональными климатическими изменениями. Расширение и пополнение сети станций дендроклиматического мониторинга, вне сомнения, является одной из первоочередных задач. Увеличение числа и более полное покрытие территории Северной Евразии тысячекратными древесно-кольцевыми хронологиями позволит более надежно разделить естественные и антропогенные составляющие в текущих изменениях климата.

Не менее важная работа - сопоставление дендроклиматических реконструкций с данными изменения климата, полученными по другим косвенным источникам, особенно таким, которые выделяют вековые и сверхвековые климатические колебания. От надежности оценки длительных климатических изменений зависят многие расчеты по существующим климатическим моделям.

Нет сомнения и в том, что годовые кольца содержат гораздо большую информацию об изменениях среды (и климата), чем та, которую мы в настоящее время научились выявлять и анализировать [1, 6]. Интенсивные работы по изучению стабильных изотопов, соотношению важнейших органических компонент клеточной стенки (целлюлозы и лигнина, например), существенно расширяют наши знания о процессах сезонного формирования годовых колец деревьев и влиянию на эти процессы внешних условий. Новые подходы требуют новейшего оборудования, и успехи в

этих направлениях дендроэкологии во многом будут зависеть от разумной кооперации в исследованиях, в том числе и международной кооперации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов Е.А. Механизмы и имитационное моделирование формирования годичных колец у хвойных // Лесоведение. 1996. № 3. С. 3-17.
2. Ваганов Е.А., Бриффа К.А., Наурзбаев М.М., Швейнгрубер Ф.Г., Шиятов С.Г., Шишов В.В. Длительные климатические изменения в арктической области Северного полушария // Докл. АН. 2000. Т. 375. № 1. С. 103-106.
3. Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Силкин П.П. Значение раннелетней температуры и схода снежного покрова для роста деревьев в субарктической зоне Сибири // Лесоведение. 1999. № 6. С. 3-14.
4. Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Егерь И.В. Предельный возраст лиственницы в Сибири // Лесоведение. 1999. № 6. С. 66-70.
5. Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М., Хьюс М.К. Свидетели "средневекового потепления" климата // Природа. 2000. № 12. С. 53-56.
6. Ваганов Е.А., Хьюс М.К. Годичные кольца деревьев и глобальный цикл углерода // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2000. Т. 17. Р. 36-48.
7. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.
8. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Роль дендроклиматических и дендрогидрологических исследований в решении глобальных и региональных экологических проблем (на примере Азиатской части России) // Сиб. экологический журн. 1999. Т. 6. № 2. С. 3-17.
9. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Издательская фирма СО РАН, 1996. 246 с.
10. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурзбаев М.М. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах северного полушария за последние 1.5 тысячи лет: сравнительный анализ данных годичных колец деревьев и ледовых кернов // Докл. АН. 1998. Т. 358. № 5. С. 681-684.
11. Гурская М.А., Дэви Н.М. Светлые кольца в древесине хвойных деревьев на Приобском севере // Современные проблемы популяционной, исторической и прикладной экологии. Екатеринбург: Академкнига, 2001. С. 59-62.
12. Гурская М.А., Шиятов С.Г. Образование двух морозобойных повреждений ксилемы в одном годичном кольце у ели сибирской в условиях Западно-Сибирской лесотундры // Экология. 2002. № 2. С. 83-90.
13. Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 2. С. 84-91.
14. Хантемиров Р.М. 4309-летняя древесно-кольцевая хронология для Ямала и ее использование для реконструкции климата прошлого на севере Западной Сибири // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат, 2000. Т. XVII. С. 287-301.
15. Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Шиятов С.Г. Патологические структуры в годичных кольцах можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* Burgsd.) и их использование для реконструкции экстремальных климатических событий // Экология. 2000. № 3. С. 185-192.
16. Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г. Основные этапы развития древесной растительности на Ямале в голоцене // Экология. 1999. № 3. С. 163-169.
17. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале // М.: Наука, 1986. 136 с.
18. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А. Методическая основа организации системы дендроклиматического мониторинга в лесах азиатской части России // Сиб. экол. журнал. 1998. Т. 5. № 1. С. 31-38.
19. Шиятов С.Г., Мазена В.С. Климатогенная динамика лесотундровых экосистем в горах Полярного Урала // Экологические проблемы горных территорий. Материалы международной научной конференции. Екатеринбург: Академкнига, 2002. С. 41-45.
20. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. С. 1-8.
21. Andreev A.A., Siebert C., Klimanov V.A., Derevyagina A.U., Shilova G.N., Melles M. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the Taymyr lowland, northern Siberia // Quatern. Res. 2002. № 1. V. 57. P. 138-150.
22. Bradley R.S., Jones P.D. Records of explosive volcanic eruptions over the last 500 years // Climate since A.D. 1500. N.Y.: Routledge, 1992. P. 606-622.
23. Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.G. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperatures over the past 600 years // Nature. 1998. V. 393. P. 450-455.
24. Briffa K.R., Osborn T.G., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network // J. Geophys. Res. 2001. V. 106 D3. P. 2929-2941.
25. Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.G., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Reduced decadal thermal response in recent northern tree growth // Nature. 1998. V. 391. P. 678-682.
26. Cook E.R., Esper J., D'Arrigo D.D. Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years // Quatern. Sci. Rev. 2004. V. 23. P. 2063-2074.
27. Filion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y. Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool // Quat. Res. 1986. V. 26. P. 272-279.
28. Glerum C., Farrar J.L. Frost ring formation in the stem of some coniferous species // Can. J. Bot. 1966. V. 44. № 7. P. 879-886.

29. *Hantemirov R.M., Gorlanova L.A., Shiyatov S.G.* Extreme temperature events in summer in northwest Siberia since AD 742 inferred from tree rings // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Special Issue "High Latitude Eurasian Palaeoenvironments"*. 2004. V. 209. P. 155-164.
30. *Hantemirov R.M., Shiyatov S.G.* A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia // *The Holocene*. 2002. V. 12. №. 6. P. 717-726.
31. *Kharuk V.I., Shiyatov S.G., Kashishke E., Fedotova E.V., Naurzbaev M.M.* Forest-tundra ecotone response to climate change // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. Т. 18. С. 234-260.
32. *Kirdyanov A., Hughes H., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P.* The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in Siberian Subarctic // *Trees*. 2003. № 17. P. 61-69.
33. *Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Sidorova O.V., Schweingruber F.H.* Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series // *Holocene*. 2002. V. 12. № 6. P. 727-736.
34. *Overpeck J., Hughen K., Hardy D., Bradley R., Case R., Douglas M., Finney B., Gajewski K., Jacoby G., Jennings A., Lamoureux S., Lasca A., MacDonald G., Moore J., Retelle M., Smith S., Wolfe A., Zielinski G.* Arctic environmental change of the last four centuries // *Science*. 1997. V. 278. P. 1251-1256.
35. *Shiyatov S.G.* Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // *PAGES News*. 2003. V. 11. № 1. P. 8-10.
36. *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*. Helsinki: Publication of the Academy of Finland, 1995. P. 144-147.
37. *Shiyatov S.G., Hantemirov R.M., Schweingruber F.H., Briffa K.R., Moell M.* Potential long-chronology development on the Northwest Siberian Plain: early results // *Dendrochronologia*. 1996. V. 14. P. 13-29.
38. *Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Hantemirov R.M., Tchekhlov O.Y.* Climatically determined dynamics of forest-tundra ecosystems in the Yamal Peninsula and the Polar Ural Mountains // *Dynamics of Natural and Man-conditioned forest ecosystems*. Proceedings from the French-Russian scientific seminar, held in Yekaterinburg, 2001. Екатеринбург: Печатный дом "Формат", 2001, С. 81-90.
39. *Vaganov E.A., Hughes M.K., Kirdyanov A.V., Schweingruber F.H., Silkin P.P.* Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia // *Nature*. 1999. V. 400. P. 149-151.
40. *Zielinski G.A.* Use of paleo-records in determining variability within the volcanism-climate system // *Quatern. Sci. Rev.* 2000. V. 19. P. 417-438.
41. *Zielinski G.A., Mayewski P.A., Meeker L.D., Whitlow S., Twickler M.S., Morrison M., Meese D., Alley R.B., Gow A.J.* Record of volcanism since 7000 B.C from the GISP 2 Greenland ice core and implications for the volcano-climatic system // *Science*. 1994. V. 264. P. 948-952.

Dendroclimatic and Dendroecological Studies in Northern Eurasia

E. A. Vaganov and S. G. Shiyatov

The paper deals with an analysis of the environmental factors responsible for the growth of tree species in high latitudes of Eurasia in the past. The authors along with foreign colleagues from the USA, Germany, Switzerland, the UK, and other countries have developed a network of stations for the dendroclimatic and dendroecological monitoring in Russia. This network of stations (since 1989) includes more than 500 tree-ring chronologies over the last several centuries obtained for the European part of Russia, the Urals, Siberia, and the Far East. Some chronologies cover the last 2-7 thousand years. The spatial and temporal reconstruction of long-term temperature changes was performed. A response of tree growth to climatic changes and extreme lowering of temperature due to the volcanic activity was revealed. The reconstruction of forest-tundra sparse stands and the dynamics of the upper timberline were obtained over several millennia for different regions of Northern Eurasia. The future proposals for dendrological studies are being discussed for the Urals and Siberia.