Мазепа Валерий Семёнович

На правах рукописи
УДК 574:630*561.24:581.54

Пространственно-временная изменчивость радиального прироста хвойных видов деревьев в субарктических районах Евразии.

03.00.16 – экология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Екатеринбург 1998

Работа выполнена в лаборатории дендрохронологии Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской Академии Наук.

Научный консультант – доктор биологических наук, профессор Шиятов С.Г.

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук, профессор Мухин В.А.

доктор биологических наук, старший научный сотрудник Санников С.Н.

доктор биологических наук, профессор Чиндяев А.С.

Ведущая организация – Институт леса им. В.Н.Сукачёва СО РАН

Защита состоится "17" декабря 1998 года в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 002.05.01 в Институте экологии растений и животных Уральского отделения РАН (620144, г.Екатеринбург, ул. 8-го Марта, 202).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института экологии растений и животных УрО РАН.

Автореферат разослан "02" ноября 1998 года

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат биологических наук М.Г.Нифонтова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Проблема реакции экосистем и их отдельных компонентов на глобальные и региональные изменения климата имеет фундаментальное научное и важное прикладное значение в перечне задач современной экологии. Эта проблема возникла в последние десятилетия в связи с возрастающими промышленными выбросами, загрязнением среды, участившимися лесными пожарами, вырубкой и деградацией лесов и существенным увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере. Имеющиеся сценарии и прогнозы свидетельствуют о возможном потеплении поверхности Земли, которое может оказать значительное, а в ряде случаев, катастрофическое влияние на биоту (Technical Summary,1996). Проблема разрабатывается мировым научным сообществом в рамках международных программ (IGBP, PAGES, GCTE, GTOS, ENRICH и др.) и российской Государственной научно-технической программой (Глобальные изменения природной среды и климата). Цель этих программ - описание условий среды на Земле, которые определяются множеством тесно взаимодействующих физических, химических, биологических и социально-экономических систем, изучение и объяснение глобальных изменений среды в прошлом, выявление нарушений условий среды под воздействием естественных и антропогенных факторов, построение моделей, которые бы количественно описывали изменение условий прошлого и надежно прогнозировали их в будущем.

Важнейшей задачей, направленной на решение этой проблемы, является исследование северных экосистем. 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. Организмы и их сообщества находятся в экстремальных условиях при довлеющем влиянии одного фактора - недостатка тепла, в результате чего и другие элементы среды имеют лимитирующий характер (физиологическая сухость при изобилии влаги, дефицит доступного азота, характеристики снежного покрова и время его схода и др.). Здесь наблюдается более высокая изменчивость термического режима, по сравнению с южными районами. Эти экосистемы в первую очередь должны среагировать на глобальное потепление, так как здесь климатическая обусловленность реакций экосистем проявляется наиболее четко.

Одним из самых надежных индикаторов состояния среды являются лесотундровые экосистемы, в частности, притундровые редколесья. Для синэкологов лесные сообщества северных широт с их предельно низким уровнем биоразнообразия и упрощенной структурой являются более простой моделью экосистем в изучении принципиальных механизмов и особенностей экологических явлений.

Такое направление исследований как в биогеографии, климатологии, так и в глобальной экологии становится все более весомым. Информация об изменении условий природной среды в прошлом представляет значительную эмпирическую базу для понимания сущности настоящего и будущего их изменения. Поэтому большое

внимание уделяется получению всевозможной прямой и косвенной информации об изменениях различных параметров природной среды и климата за длительные интервалы времени и с более высоким разрешением.

Среди различного рода косвенных данных за сотни и даже тысячи лет наиболее часто используются характеристики радиального годичного прироста древесины. Методическим преимуществом этого признака является высокая разрешающая способность (год, сезон) и возможность календарной датировки событий, связанных с величиной прироста. Ширина годичного кольца интегрирует влияние внешних и внутренних факторов. Прирост является комплексным показателем состояния древостоев и лесных экосистем. Использование этого метода дает определенную оценку состояния и динамики среды в прошлом, а с учетом выявленных тенденций развития, прогноз изменения среды в будущем.

В настоящее время необходимо более полное и адекватное представление о естественной изменчивости важнейших факторов среды лесотундровых экосистем, средозащитная и климаторегулирующая функции которых огромны. Изменения в росте под влиянием изменения среды - это первый и исходный уровень для последующих изменений структуры растительных сообществ и сукцессионных процессов в целом. Поэтому, актуальной и своевременной экологической проблемой является определение индикаторной роли притундровых редколесий для оценки важнейших абиотических факторов среды, соотношение естественной и антропогенно-обусловленной ее изменчивости.

Цель исследования. Описание и обобщение результатов исследования пространственно-временной изменчивости радиального прироста хвойных видов деревьев и лесорастительных условий в субарктических районах Евразии.

Задачи иследования:

1. Охарактеризовать изменчивость абсолютного и относительного радиального прироста хвойных видов деревьев, произрастающих на климатическом пределе своего распространения.
2. Оценить климатические факторы, влияющие на рост и продуктивность в лесотундровых экосистемах.
3. Показать особенности климатически обусловленной изменчивости величины годичного радиального прироста у хвойных видов деревьев в различных районах Субарктики.
4. Разработать принципы динамического районирования субарктической зоны, основанного на изменчивости годичного радиального прироста хвойных видов.
5. Выделить районы со сходной изменчивостью прироста деревьев и показать их динамику за последние 300 лет.
6. Построить региональные хронологии изменчивости радиального прироста с целью глобального мониторинга изменений климата.
7. Произвести пространственно-временную реконструкцию основных климатических факторов (температуры и осадков) за последние 300 лет.

Основные положения работы, выносимые на защиту.

1. Сходство в изменчивости радиального прироста различных видов хвойных деревьев Евроазиатской субарктики в подавляющем большинстве случаев обусловленно динамикой температур воздуха летних месяцев.
2. Изменчивость радиального прироста хвойных видов носит одновременно глобальный и региональный характер в пределах крупных секторов Субарктики.
3. Динамичный характер границ дендроклиматических районов связан с региональными изменениями климата.
4. Древесно-кольцевые хронологии дают надежные количественные оценки важнейших абиотических факторов (температуры и осадков), соотношения естественной и антропогенно-обусловленной изменчивости прироста.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Впервые осуществлена комплексная оценка изменчивости радиального прироста хвойных видов на огромной территории Евроазиатской субарктики. Показана четкая прямая зависимость возраста самых старых живых деревьев, среднего и максимального радиального прироста, количества выпадающих колец от степени континентальности климата.

Детально изучено влияние температуры летних месяцев на радиальный прирост хвойных видов деревьев. Показано, что относительная роль летних температур неодинакова в различных секторах Евроазиатской субарктики. При движении с запада на восток и/или с севера на юг наблюдается постепенное уменьшение влияния темепартуры июля и увеличение влияния температуры июня на изменчивость прироста деревьев.

Впервые осуществлен анализ влияния количества осадков на прирост хвойных видов деревьев. Оценена роль осадков в различные сезоны года на формирование величины радиального прироста деревьев. Показана специфичность этого влияния в зависимости от условий местообитаний.

Впервые построено динамическое районирование в высоких широтах Евразии на основе сходства в изменчивости прироста деревьев. Показана синхронность естественной климатически обусловленной изменчивости прироста в пределах крупных секторов Субарктики. В соответствии с предложенным дендроклиматическим районированием построены региональные древесно-кольцевые хронологии по лиственнице (5 шт.), ели сибирской (3 шт.) и сосне обыкновенной (1 шт.), отражающие характерную изменчивость каждого из районов.

Выделенные дендроклиматические районы, основанные на анализе синхронности длительных древесно-кольцевых хронологий, могут быть использованы для разработки других видов районирования (климатического, лесорастительного, лесопожарного и др.).

Полученные результаты об изменчивости радиального прироста могут быть использованы для оценки продуктивности и геохимических циклов, в первую очередь потока и запаса углерода в лесотундровых экосистемах.

Реконструкции летних температур воздуха и количества осадков в различные сезоны года могут быть использованы для уточнения моделей глобального, и особенно, региональных изменений климата.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке грантов INTAS-93-37, РФФИ № 96-04-48258, РФФИ № 96-05-64520, РФФИ № 96-07-89101.

Апробация работы. Материалы данной работы докладывались и обсуждались на III Всесоюзной конференции "Дендроклиматические исследования в СССР" (Архангельск, 1978), на II Всесоюзном семинаре по реконструкции климата Земли последнего тысячелетия (Эльбрусская научно-учебная станция МГУ, 1981), на IV Всесоюзном совещании по вопросам дендроклиматологии (Иркутск, 1983), на X Всесоюзном симпозиуме "Биологические проблемы севера" (Магадан, 1983), на международном симпозиуме "Древесные кольца и среда" (Истад, Южная Швеция, 1990), на международном совещании "Древесные кольца" (Красноярск, 1992), на международной конференции "Изменчивость климата в горах" (Давос, Швейцария, 1992), на международной конференции "Древесные кольца, среда и человечество: взаимоотношения и процессы" (Туссон, Аризона, США, 1994), на международной конференции по прошлому, настоящему и будущему климата (Хельсинки, Финляндия,1995).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 30 работах.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, семи глав, заключения. В конце глав, начиная с четвертой приведены основные выводы по соответствующему разделу. Работа изложена на 303 страницах машинописного текста, включает в себя 20 полностраничных таблиц и 30 рисунков; 14 таблиц и 36 рисунков, помещенных внутри текста. Список литературы состоит из 301 наименования.

Глава 1. Физико-географическая характеристка районов исследования.

На основе литературных источников приведены краткие сведения по геологии, рельефу, климату и растительности районов исследования (Печорская лесотундровая провинция; Полярный и Приполярный Урал; Западно-Сибирская лесотундровая равнина; Среднесибирское плоскогорье; Восточно-Путоранская провинция; Хатангско-Оленекская провинция; провинция Анабарского массива; Харатасская лесотундровая провинция; Восточно-Сибирская низина, Верхоянское и Колымское нагорья).

Глава 2. Древесно-кольцевые хронологии Субарктики.

В главе приводится обзор специальной литературы по различным аспектам дендроклиматологии Субарктики, перечень накопленного материала и построенных хронологий за последние 30-35 лет.

Глава 3. Материал и методы исследования.

Для построения 82 обобщенных древесно-кольцевых хронологий в субарктических районах Евразии было использовано 1488 модельных деревьев и 1924 ради-

альных кернов древесины, в среднем 18 деревьев и 24 керна для построения одной хронологии. По лиственнице (*Larix sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*) было получено 56 хронологий, по ели сибирской (*Picea obovata*) - 20, по сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris*) - 6.

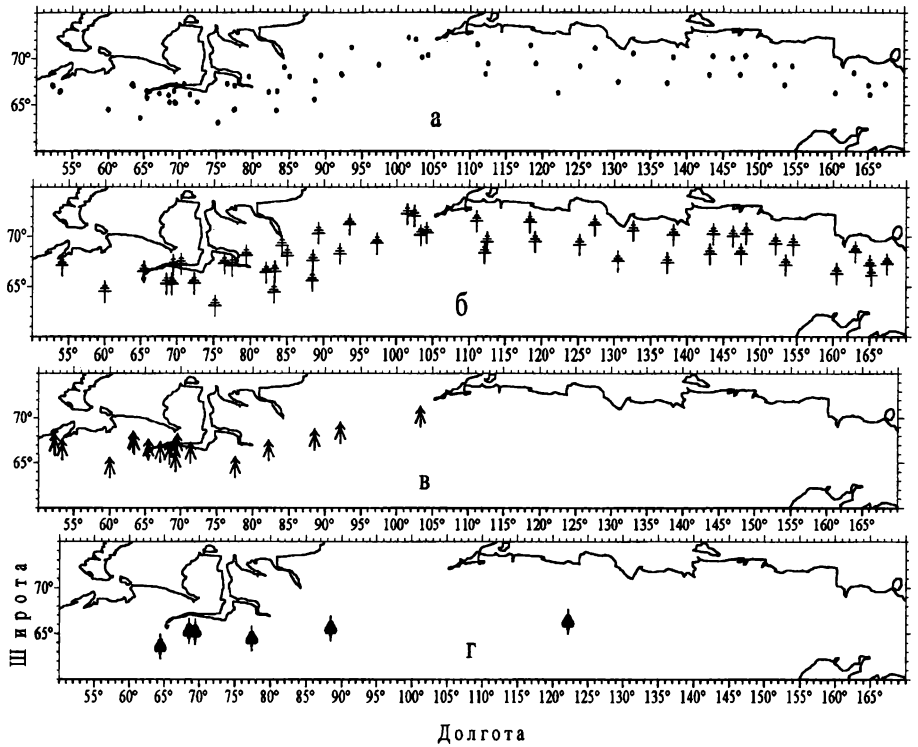

Рис. 1. Расположение мониторинговых тест-полигонов на исследованной территории. а - все хронологии, б - хронологии по лиственнице, в - хронологии по ели, г - хронологии по сосне.

Сбор образцов древесины осуществлялся согласно разработанной системе дендроклиматического мониторинга (Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996; Шиятов, Ваганов,1998). Тест-полигоны закладывались по двум меридиональным профилям: северному и южному. Северный профиль проходил по самым северным массивам лесов и редколесий и в целом повторял изгибы полярной границы древесной растительности. Южный профиль проходил на 200-250 км южнее. Среднее расстояние между тест-полигонами составило около 200 км.

Дальнейшая работа с образцами производилась в лабораторных условиях. Сначала производилась предварительная датировка колец, после этого производили измерение ширины годичных колец с точностью до 0.01 мм. По данным измерений

строились графики абсолютного радиального прироста для каждого радиуса, которые использовались для точной абсолютной датировки годичных колец при помощи метода перекрестной датировки (Douglass, 1919). Для проверки правильности датировки использовалась программа COFECHA (Holmes, 1983).

Для изучения влияния температуры воздуха и количества осадков на радиальный прирост древесных было отобрано 48 метеостанций, инструментальные наблюдения которых в наибольшей степени удовлетворяли следующим требованиям: достаточная длительность рядов, возможность восстановления отсутствующих данных по независимым источникам информации и равномерность расположения в пределах исследуемой территории. Восстановление данных производилось методом множественной линейной регрессии.

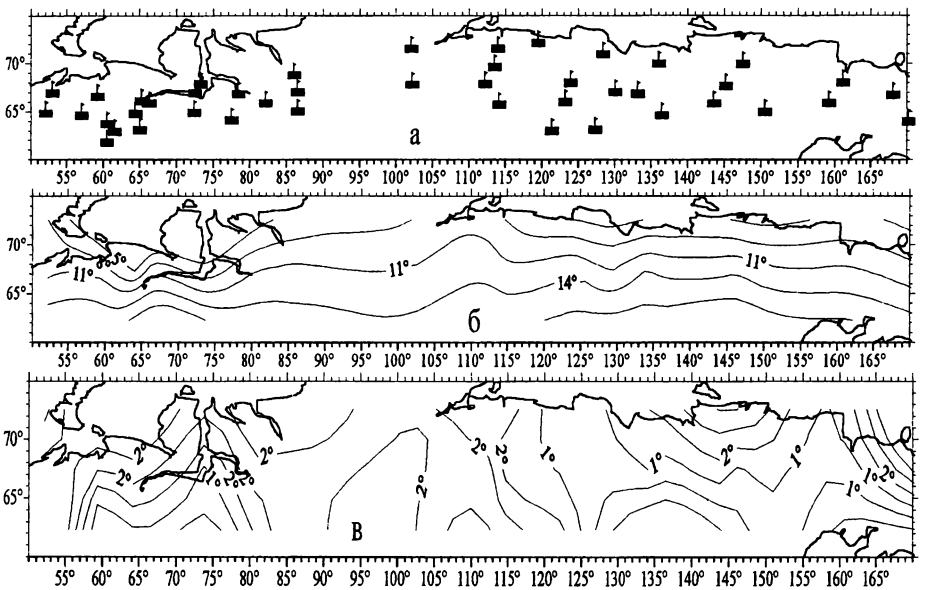

Рис. 2. Расположение базовых метеостанций на исследованной территории (а), изотермы средней летней (июнь-июль) температуры воздуха (б), изотермы стандартного отклонения средней летней температуры воздуха (в).

Возрастной тренд моделировался и исключался из ряда ширины годичных колец перед тем как эти ряды использовать для изучения климатически обусловленной изменчивости прироста в прошлом. В дендрохронологии процедура моделирования и исключения неклиматической изменчивости известна как стадартизация (Fritts, 1976). Теоретическая основа стандартизации состоит в описании изменчивости абсолютных величин прироста деревьев линейно-агрегированной моделью (Graybill, 1982; Cook, 1985, 1987, 1990).

Индексация ширины годичных колец производилась для каждой индивидуальной хронологии, полученной по отдельному радиусу. У каждого такого ряда в значительной степени были исключены индивидуальные особенности радиального роста дерева и сохранены общая для данной совокупности деревьев изменчивость (сигнал). Количественно эти сигналы мы оценивали величиной отношения "сигнал-шум" (Wigley at al., 1984).

Известно, что ряды ширины годичных колец обладают определенной инерционностью или автокорреляцией вследствие физиологических причин (Fritts, 1976; Meko, 1981; Monserud, 1986; Briffa at. al., 1987; Graybill, Shiyatov, 1992). Обычно такую составляющую достаточно адекватно моделируют авторегрессионным (AR) процессом (Cook, 1985) или процессом авторегрессии-скользящего среднего (ARMA) (Guiot, 1986). Индивидуальные ряды индексов ширины годичных колец моделировались процессами AR(p) или ARMA (p,q) и получали так называемые "выбеленные" хронологии. Порядок процесса, т.е. параметры p и q, определялись во время оценки коэффициентов уравнения при помощи информационного критерия Акайка (Akaike, 1974). Затем вносилась поправка в индексы прироста. Выбеливание производилось при помощи программы ARSTAN (Holmes *et al.*, 1986).

После того, как были получены индексированные ряды для каждого модельного дерева вычислялись обобщенные ряды по совокупности деревьев одного вида, произрастающих в одном типе условий местообитания, иногда на разных участках, удаленных друг от друга не более, чем на 10 км. Обобщенный ряд индексов прироста для отдельного участка и определенного вида дерева получали осреднением индивидуальных выбеленных хронологий. При этом выбирали одну из следующих оценок: арифметическое среднее, робастное оценивание или максимальная мода при полимодальном распределении (Мазепа, 1982; Methods of Dendrochronology, 1990).

Для количественной характеристики изменчивости годичных колебаний прироста древесных растений использовался коэффициент чувствительности. Он дает оценку относительных различий в ширине соседних колец, т.е. показывает степень воздействия в основном внешних факторов на изменение величины прироста (Douglass, 1936; Schulman, 1956). Серия колец считается чувствительной, когда средний коэффициент чувствительности больше 0.3 (Ferguson, 1969). Этот коэффициент является одним из наиболее важных показателей, при помощи которого можно отбирать виды древесных растений и местообитания, наиболее пригодные для дендрохронологического анализа.

Коэффициент синхронности показывает степень воздействия общих факторов среды по отношению к двум рассматриваемым временным рядам (Huber, 1943). Он расчитывается как количество однонаправленных отрезков по отношению к их общему числу.

В некоторых случаях трудно заранее предложить модель связи между климатом и ростом или известно, что такая связь опосредована через другие абиотические характеристики. В таких случаях стало уже обычным использовать эмпирический

подход, описывающий связь между ростом дерева и климатом в терминах месячных климатических данных на основе множественной регрессионной модели. Оценив эту связь как значимую, говорят о климатическом сигнале древесно-кольцевой хронологии. Такой эмпирический подход был назван анализом функции отклика (Response function) (Fritts at al., 1971; Fritts, 1976). Подход является некоторой формой множественного линейного регрессионного анализа, в котором предикторами (независимыми переменными) выступают главные компоненты средних месячных температур воздуха и месячного количества осадков. Иногда к этим переменным добавляют значения прироста в предшествующий(ие) год(ы). Такая модель используется для оценки изменчивости древесно-кольцевой хронологии, объяснимой климатом и предшествующим ростом, а также для оценки относительного вклада (важности) в прирост текущего года отдельных климатических переменных. Процент изменчивости хронологии, объяснимой этими переменными в уравнении регрессии рассматривается как мера климатического сигнала хронологии. Знак и величина коэффициентов регрессии отдельных месячных климатических переменных характеризуют связь роста дерева с климатом. В анализ были включены месячные значения климатических переменных с января по август текущего года и с сентября по декабрь предыдущего года роста дерева. Климатические функции отклика расчитывались при помощи программы RESPONSE (Lough, 1983; Holmes, 1994).

Оценка передаточной функции (Transfer function) осуществлялась для реконструкции элементов климата. Она определяется как некоторое множество коэффициентов, применяемых к индексам прироста, для получения климатических оценок (Kaennel, Schweingruber, 1995). В этом смысле передаточная функция получается обращением функции отклика в определенном периоде инструментальных климатических данных.

Формальной теории выбора специфического множества предикторов (хронологий) для построения передаточной функции не существует (Lofgren, Hunt, 1982). Тем не менее, существует ряд придержек, которые позволяют строить надежные передаточные функции и получать адекватные реконструкции элементов климата. Прежде всего этого добиваются выбором подходящего множества хронологий, которые несут в себе сильный и одинаковый климатический сигнал. Затем строят передаточные функции на различных периодах инструментальных наблюдений за элементами климата и сравнивают их значения. Эти подпериоды называют оценочными или калибровочными. Затем строят реконструкцию элементов климата на оставшийся период времени и тестируют качество реконструкции различными статистическими показателями. Эти периоды времени называют проверочными или верификационными. Окончательно для реконструкции элементов климата на весь период имеющихся хронологий выбирают ту передаточную функцию, которая показывает наиболее высокие и стабильные статистические показатели как на калибровочном периоде так и на верификационном (Briffa *at al.*, 1986).

В этой работе реконструкцию летних температур воздуха и количества осадков выполняли регрессионным методом, описанным выше. Предиктантом каждый раз была отдельная метеостанция. В качестве предикторов использовали обобщенные ряды индексов прироста деревьев, построенные для мониторинговых участков. Таким образом получали множество точечных реконструкций. Пространственную реконструкцию элементов климата строили на основе точечных реконструкций, нанося на схематическую карту изолинии аномалий соотвествующих элементов климата.

Глава 4. Изменчивость радиального годичного прироста деревьев.

Дендрохронологическая сеть Евроазиатской субарктики была построена по образцам наиболее старых деревьев. В различных частях исследованной территории длительность хронологий различна. Так, при движении с запада на восток длительности всех хронологий увеличиваются. В том числе: по 3 видам лиственниц от 350-400 до 600-700 лет; по ели сибирской от 250-300 до 350-400 лет; по сосне обыкновенной от 250-300 до 400-450 лет. Приведенные оценки характеризуют максимальные длительности хронологий, которые могут быть построены по живым деревьям в различных частях Субарктики.

Анализ показал, что самые старые по возрасту деревья наиболее вероятно встретить вблизи их северной границы распространения. Хронологии северного профиля в среднем длиннее хронологий южного профиля на 100-150 лет. Существенной разницы между длительностями рядов по деревьям, произрастающих на разных высотах не обнаружено. Лишь образцы деревьев, произрастающие на Полярном и Приполярном Урале выделяются своей большей средней длительностью (на 50-100 лет) по сравнению с соседними районами.

Средняя ширина годичных колец образцов модельных деревьев уменьшается при движении с запада на восток вдоль циркумполярного профиля (от 0.5 мм до 0.3 мм). Обнаружена статистически значимая разница ($F_{2,53}$ = 9.2) между средней шириной годичных колец у хронологий по лиственнице сибирской (*Larix sibirica*) по сравнению с хронологиями остальных двух видов (*Larix gmelinii, Larix cajanderi*). Для хронологий по лиственнице сибирской средняя ширина годичного кольца составляет 0.49 мм, (за исключением Приполярного Урала, где она составляет 0.24 мм), на территориях Средней Сибири и Северо-Востоке Сибири она составляет 0.30 и 0.31 мм соответственно. Заметно повышение среднего прироста при движении с севера на юг. Средняя ширина кольца для ели сибирской на территориях Большеземельской тундры и Полярного Урала составляет 0.63 мм, Приполярного Урала и северном профиле Западной Сибири - 0.41 мм, южного профиля Западной Сибири - 0.55 мм, Средней Сибири - 0.40 мм. Средняя ширина кольца у сосны обыкновенной на территории Западной Сибири составляет 0.54 мм, Средней Сибири - 0.46 мм.

Показана высокая корреляция между максимальным приростом (как правило, в молодом возрасте) и средним приростом после 30-70 лет роста. В частности, для лиственницы коэффициент корреляции составляет 0.81, для ели - 0.65, для сосны -

0.82. Другими словами, можно надежно оценивать максимальный прирост по среднему и наоборот. Более слабая связь между этими показателями у ели объясняется большими различиями условий местообитаний.

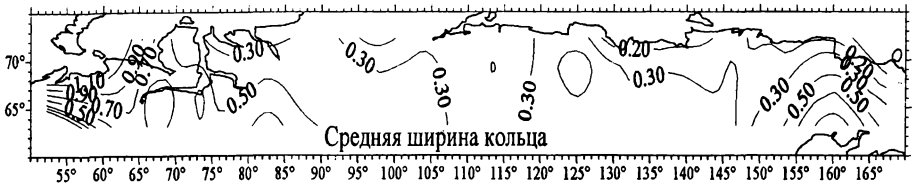

Рис. 3. Изолинии средней ширины колец для исследованной территории.

Менее всего возрастные тренды выражены на территориях Полярного, Приполярного Урала, на самых северных участках Средней Сибири и Северо-Востока Сибири. Разница в значениях автокорреляций северного и южного профилей становится большей при движении на восток. Аналогичная закономерность в зависимости от мест произрастания наблюдается для индивидуальных хронологий по ели сибирской, но с более высоким средним значением автокорреляции. Самые высокие значения автокорреляции имеют хронологии по сосне.

Процент выпавших колец характеризует степень неблагоприятности условий для роста деревьев. Количество выпавших колец в хронологиях северного профиля в 2-3 раза выше по сравнению с южными хронологиями. Выпадение колец в основном приходилось на холодные периоды 19-го столетия. Для хронологий северного профиля, построенных по лиственнице, наибольший процент выпадения колец приходится на период начала 19-го столетия (до 30%). Для хронологий южного профиля выпадение колец этого периода доходит до 10%. Хронологии по ели характеризуются наименьшим числом случаев выпадения колец. Их число составляет в среднем 1-1.5%. Наибольшее число случаев выпадения колец приходится на 19-е столетие. Хронологии по сосне характеризуются высоким процентом случаев выпадения колец, сравнимым с хронологиями по лиственнице (до 27%). Наибольшее число таких случаев приходится на конец 18-го и начало 19-го столетий. В холодный период 19-го столетия количество выпавших колец в 2-2.5 раза выше, чем за последние 300 лет. Самое большое число выпавших колец обнаружено в хронологиях по лиственнице, особенно на территории Средней Сибири. Количество выпавших колец у ели сибирской в 10-15 раз меньше, чем у хронологий по лиственнице.

Практически все полученные обобщенные хронологии имеют высокие значения коэффициента чувствительности и стандартного отклонения. Средняя величина коэффициента чувствительности по всем рядам составляет 0.34, а стандартного отклонения - 28%. Наибольшей чувствительностью и амплитудой колебаний обладают хронологии, полученные для Средней Сибири (в среднем 0.37 и 31%) и вдоль всего северного профиля (в среднем 0.40 и 32%). Для южного профиля эти показатели

равны в среднем 0.30 и 26%. Самые высокие показатели имеют хронологии по лиственнице, а самые низкие - хронологии по ели. Хронологии по сосне занимают промежуточное положение. У хронологий по сосне наблюдается существенное снижение рассматриваемых показателей при движении с запада на восток.

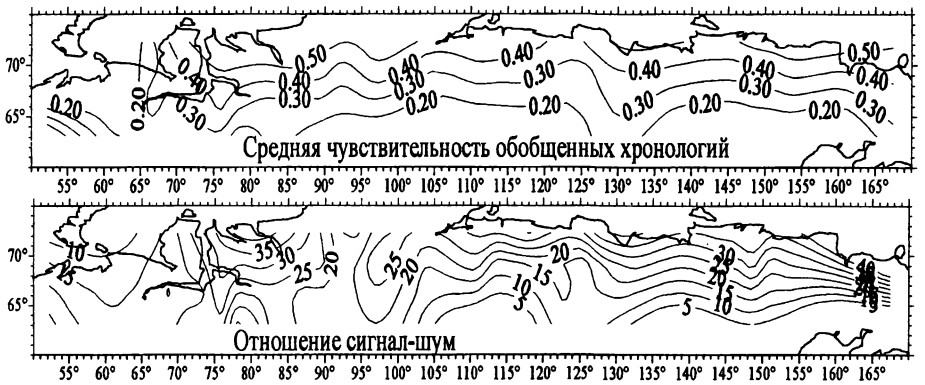

Рис. 4. Изолинии средней чувствительности и отношения сигнал-шум обобщенных хронологий для иследованной территории.

Как правило, прирост предыдущих 1-2 лет оказывает влияние на прирост текущего года. Вклад условий роста предыдущих лет значимо прослеживается у хронологий, полученных для Западной Сибири. Практически отсутствует автокорреляция у хронологий, полученных для Полярного Урала, Средней Сибири и Северо-Востока Сибири. Различие во вкладе условий роста предыдущих лет для роста лиственницы текущего года объясняется как абиотическими условиями местообитаний, так и видовой принадлежностью рода лиственницы. Для хронологий по ели и сосне при движении с запада на восток не замечено существенной разницы в порядке авторегрессии и процентом дисперсии, объяснимой этой моделью.

Сравнительный анализ отношения сигнала к шуму показывает, что оно высокое для большинства полученных хронологий. Более высокими показателями обладают ряды северного профиля по сравнению с рядами южного профиля. Отношение сигнала к шуму увеличивается при движении с запада на восток. Самыми высокими значениями обладают хронологии по лиственнице, хронологии по ели и сосне содержат одинаковый общий сигнал. Так, для хронологий по лиственнице особенно заметно увеличенное значение этого отношения для территорий Средней Сибири и Северо-Востока Сибири. Для хронологий по ели увеличенное значение этого отношения характерно лишь для территории Большеземельской лесотундры. Для хронологий по сосне не замечено различий в значениях этого отношения для различных районов.

Глава 5. Влияние климатических факторов на динамику прироста.

Оценка климатических функций отклика для древесно-кольцевых хронологий, построенных для субарктических районов, производилась на основе использования климатических данных ближайших метеостанций. В случае значительного удаления (от 100 до 150 км) мониторингового участка от метеостанций, выбор последних осуществлялся на основе следующих критериев: а) минимальное расстояние между участком и метеостанцией; б) длительность метеонаблюдений; в) принадлежность к однородному климатическому и физико-географическому району.

В работе показано, что температура летних месяцев (июня и июля) оказывает значимое влияние на изменчивость прироста хвойных видов деревьев в пределах всей изученной территории. При этом, если на рост лиственницы значимое положительное влияние оказывает лишь температура летних месяцев текущего года роста, то на рост ели, кроме этого, значимое отрицательное влияние оказывают температуры сентября месяца предыдущего года роста. На рост сосны, кроме значимого положительного влияния температуры воздуха летних месяцев, значимое положительное влияние оказывают октябрьские температуры воздуха предыдущего года роста.

Относительная роль июньских и июльских температур неодинакова в различных секторах Субарктики, в пределах северного и южного профилей и у разных видов древесных растений. При движении с запада на восток вдоль северного профиля наблюдается постепенное уменьшение влияния температуры июля и увеличение влияния температуры июня на изменчивость индексов прироста деревьев. Так, на северном профиле Западной Сибири изменчивость прироста лиственницы, произрастающей на полярном пределе леса, определяется изменчивостью температуры июля, влияние температуры июня незначительно. В районах Средней Сибири (плато Путорана, полуостров Таймыр) относительный вклад температуры июня в изменчивость индексов прироста увеличивается, а в пределах Анабарского плато уже превышает влияние температуры июля. При дальнейшем движении на восток эта закономерность сохраняется и на всей изученной территории Северо-Востока Сибири. Вклад температуры июня в изменчивость индексов прироста превышает вклад температуры июля. Эта же закономерность прослеживаетяс на южном профиле. Исключение составляют хронологии Приполярного Урала Здесь наблюдается повышенное и основное влияние июньских температур воздуха на рост лиственницы.

Для Западной Сибири на участках, расположенных на одной долготе, но в направлении с севера на юг основное различие заключается в том, что южные хронологии содержат значимый вклад температур не только июля, но и июня, в то время как северные - лишь температур июля.

В западной части Средне-Сибирского сектора в пределах северного профиля преобладает вклад июльских температур, в то время как в пределах южного профиля преобладает вклад июньских. В восточной части этого сектора наблюдается существенное различие в функциях отклика между северными и южными хронологиями: у первых вклад в изменчивость прироста оказывают температуры июня и

июля, у вторых - лишь температур июня. В северо-восточном секторе различия роли температур на рост лиственницы северных и южных тест-полигонов такие же, как и у хронологий, полученных для восточной части Средней Сибири.

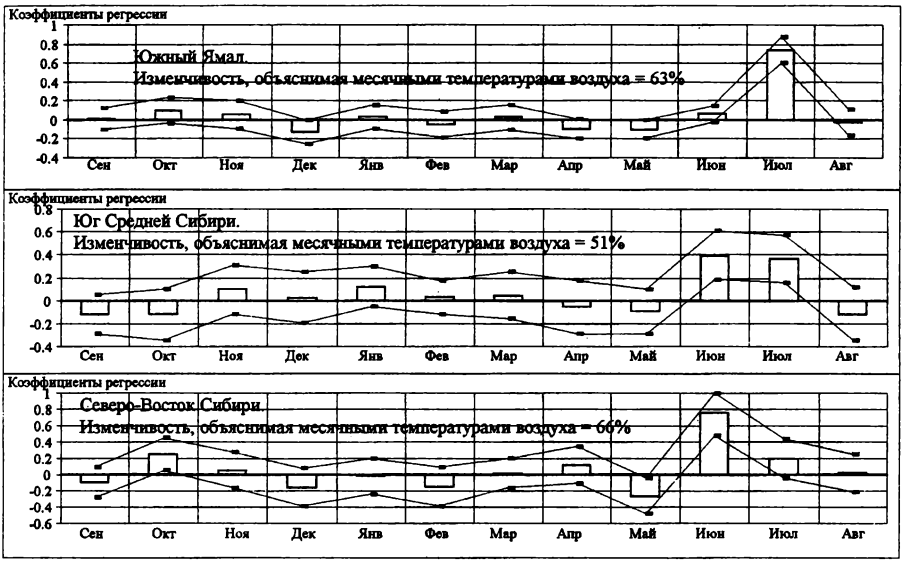

Рис. 5. Некоторые функции отклика на среднюю месячную иемпературу воздуха для обобщенных древесно-кольцевых хронологий по лиственнице.

Процент изменчивости, объяснимый средними месячными температурами воздуха, варьирует от 20% до 67% со средним значением около 50%. При движении с запада на восток доля изменчивости относительного прироста, объяснимая средними месячными температурами воздуха, увеличивается. Увеличенной долей этой изменчивости обладают также хронологии северного профиля. Максимальной изменчивостью объяснимой температурой воздуха обладают хронологии Северо-Востока Сибири, Полярного, Приполярного Урала и севера Западной Сибири.

Влияние осадков на изменчивость прироста хвойных видов деревьев прослеживается в большинстве районов иследований. Оно более сложное и разнообразное по сравнению с влиянием температуры воздуха и зависит от мест произрастания. Часто это влияние опосредованно через почвенный гидрологический и термический режимы и выражено в меньшей степени.

Значимым экологическим фактором для роста лиственницы, связанным с влагонакоплением в почвах, являются осадки осенне-зимнего, зимне-весеннего и летнего периодов. Доля изменчивости хронологий по лиственнице, объяснимая месячным количеством выпадающих осадков, не велика. В среднем она оценивается в 20-30%.

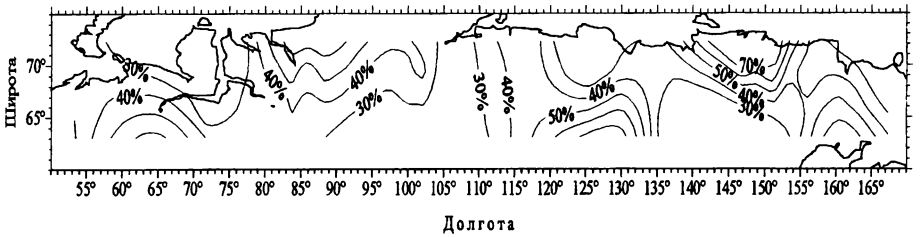

Рис. 6. Изолинии процента дисперсии сети хронологий по лиственнице, объяснимой средними месячными температурами воздуха с сентября предшествующего года по август текущего года роста.

На территориях Большеземельской тундры, Полярного и Приполярного Урала, частично Западной Сибири отсутствует статистическая связь роста лиственницы с осадками осенне-зимнего периода предшествующего года роста. На остальной территории осенне-зимние осадки предшествующего года роста в большинстве случаев положительно влияют на прирост лиственницы.

Зимне-весенние осадки в подавляющем большинстве случаев оказывают отрицательное влияние на прирост лиственницы.

На территории Средней Сибири, Северо-Востока Сибири отсутствует статистическая связь с осадками летнего периода текущего года роста. Летние осадки оказывают положительное влияние в западных районах и отрицательное в восточных.

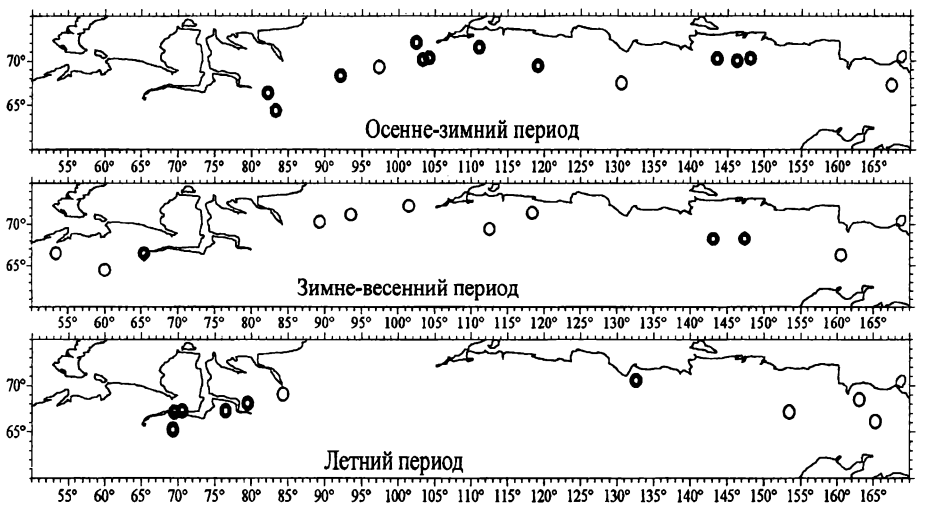

Рис. 7. Распределение по территории хронологий по лиственнице, которые характеризуются значимой статистической связью с количеством выпадающих осадков в различные сезоны года. Положительная и отрицательная связь обозначена символами ● и ○ соответственно.

Влияние осадков на рост ели сибирской незначительное. Примерно у 60% хронологий обнаружено такое влияние. У большинства из них отмечена значимая отрицательная статистическая связь с осадками зимних месяцев. При этом только для территории Средней Сибири обнаружена положительная статистическая связь прироста ели с осенними осадками предыдущего года, а для территории Западной Сибири обнаружена положительная связь прироста ели с летними осадками текущего года роста. Незначительные отклонения от этих характеристик встречаются и обусловлены спецификой условий местообитания.

Только у половины хронологий по сосне обнаружено влияние осадков. У хронологий Западной Сибири сказывается положительное влияние весенних осадков и незначительное влияние осадков ранней осени предшествующего года роста, у хронологий Средней Сибири - отрицательное влияние осенне-зимних осадков.

Хорошо прослеживаются долготные и широтные закономерности в реакции индексов прироста деревьев на изменение термических условий летних месяцев. Известно, что при движении с запада на восток увеличивается континентальность климата, т.е. снижается температура самого холодного зимнего месяца с -20° до -40°С, уменьшается количество осадков с 300-350 до 50-100 мм за теплый период года и с 300-450 до менее 150 мм за год, уменьшается мощность снежного покрова с 70 до 30 см, уменьшается облачность, особенно в зимнее время.

В связи с тем, что теплый сезон на северном пределе произрастания древесной растительности чрезвычайно короток (период со средними суточными температурами выше 5°С составляет 75-110 дней), для годичного цикла роста дерева первостепенное значение имеют сроки начала вегетации. В Западно-Сибирском секторе в районе полярной границы леса средние сроки перехода температуры воздуха через 5°С наиболее поздние (17-20 июня). На северном подножье плато Путорана и Анабарского плато многолетние средние даты перехода температуры через 5°С более ранние (около 16 июня), а в субарктических районах Северо-Востока Сибири - 8-14 июня. Это означает, что вегетационный период в восточных районах Сибирской субарктики начинается раньше, чем в западных, в связи с чем вклад июньских температур в изменчивость прироста деревьев возрастает.

Увеличение роли июньских температур в изменчивости прироста деревьев, произрастающих на тест-полигонах южного профиля, объясняется тем, что рост деревьев на расположенных в 200-300 км южнее участках, начинается на 1-2 недели раньше, чем в самых северных островках редколесий. Достаточные для активного роста деревьев температуры здесь наблюдаются и в августе. Однако, ни одна из полученных функций отклика не показывает значимого влияния температуры августа на изменчивость прироста у изученных видов древесных растений.

Годовой ход осадков специфичен в различных районах Субарктики. Кроме уменьшения количества осадков при движении с запада на восток, имеются различия в их распределении по месяцам. В Западной Сибири основное количество осадков выпадает во второй половине лета и осенью. В наиболее континентальных рай-

онах (от низовий р. Хатанги до низовий р. Колымы) максимум осадков приходится на лето, в основном на июль-август, при этом месячное их количество очень небольшое (до 40-50 мм). В июле, когда температуры воздуха наиболее высокие, происходит сильное иссушение верхних горизонтов почвы, основным лимитирующим фактором становится недостаток влаги. В результате этого дерево прекращает радиальный прирост до окончания вегетационного периода. Об этом свидетельствуют данные расчета функций отклика для рядов по лиственнице и ели сибирской.

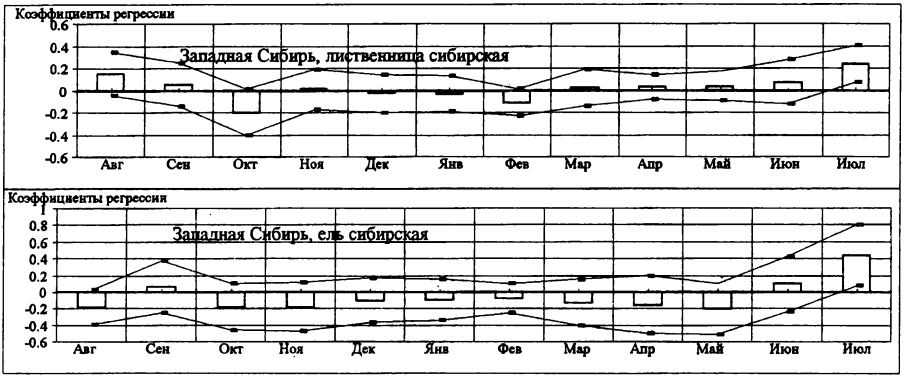

Рис. 8. Функции отклика хронологий по лиственнице и ели сибирской на летнее количество осадков.

На прирост сосны влияет температура октября предшествующего года роста и июля текущего года роста во всех изученных районах. Однако, влияние это незначительное по величине. Это общая закономерность влияния термического режима для роста сосны. Большинство хронологий по сосне имеют сходную реакцию на температуру воздуха. Исследование влияния осадков на рост сосны не дало общей закономерности для этого вида. Здесь сказываются локальные условия местообитания. Так, в Западной Сибири, в окрестности поселка Тарко-Сале значимое влияние оказывают весенние осадки (март, апрель). Именно в этот период примерно на 80 градусе восточной долготы месячное количество осадков несколько увеличено по сравнению с маем и июнем. По-видимому, снегонакопление в этот период создает основу для достаточного влагообеспечения в вегетационный период. Далее, при движении на восток, в низовье реки Нижняя Тунгуска, начинает сказываться отрицательное влияние зимних осадков, а для самого восточного тест-полигона по сосне отрицательное влияние осказывают осадки сентбря предшествующего года роста. Если посмотреть на графики многолетнего среднего количества осадков в этих районах (90° в.д. и 125° в.д.), то можно заметить повышенное количество осадков в эти сезоны.

Положительную связь прироста с осенне-зимними осадками в основном можно объяснить высотой снежного покрова по отношению к многолетней норме. Чем

выше снежный покров, образовавшийся предшествующей осенью и в начале зимы, тем меньше промерзание сезонно-талого слоя почвогрунтов во время предстоящей зимы, и соответственно, более ранние сроки начала вегетации. Отрицательную связь прироста с осенне-зимними осадками можно объяснить локальными условиями местообитания. Это могут быть пониженные элементы рельефа, в которых скапливается повышенное количество снега за осень и зиму. В связи с этим таяние снега в этих местах происходит за более длительное время и сроки начала вегетации сдвигаются, что может привести к образованию более тонкого слоя прироста. Это же объясняет отрицательную связь прироста с зимне-весенними осадками.

Положительное влияние осадков весеннего периода можно объяснить локальными условиями местообитания. Как правило, это горные условия. Деревья здесь произрастают на транзитных хорошо дренированных по отношению к почвенной влаге местообитаниях. Талые воды поступают с более высоких элементов рельефа, что ускоряет протайку почвогрунтов весной. Повышенное количество осадков в летний период ускоряет и углубляет оттаивание сезонно-талого слоя почв. Это создает дополнительные (по отношению к термическому режиму) благоприятные условия для роста в текущем вегетационном сезоне. Некоторые хорошо прогреваемые местообитания характеризуются недостатком влаги (сухие местообитания). Здесь также повышенное количество летних осадков создает дополнительные благоприятные условия для роста лиственницы в текущем вегетационном сезоне. Отрицательная связь с количеством осадков в летний период указывает на избыточное увлажнение, создание анаэробных условий в почве, что снижает поступление питательных веществ. Это может привести, вместе с неблагоприятным термическим режимом вегетационного периода, к формированию заниженного по ширине годичного кольца.

Глава 6. Районирование изменчивости прироста.

В основу районирования положены различие количественных характеристик хронологий построенной сети дендроклиматических тест-полигонов. Вместе с тем дендроклиматические районы в этой схеме увязаны с крупными физико-географическими странами, обобщенные границы которых служат на картах в качестве границ районов.

Для районирования использовались следующие количественные характеристики изменчивости радиального прироста хвойных видов деревьев: а) средняя ширина кольца, стандартное отклонение и средняя чувствительность индивидуальных хронологий; б) стандартное отклонение, средняя чувствительность, процент изменчивости в модели авторегрессии и отношение сигнала к шуму в обобщенных хронологиях; в) коэффициенты синхронности и корреляции между всевозможными парами хронологий по всей сети дендроклиматических станций.

Анализ индивидуальных хронологий абсолютного прироста показал, что в широтном направлении с юга на север уменьшается средняя ширина годичного кольца и увеличивается чувствительность. Это является хорошей иллюстрацией известного феномена полярного усиления изменчивости климата, который объясняется как

проявление колебаний атмосферной циркуляции в изменчивости интенсивных характеристик состояния атмосферы (Алексеев, Священников, 1991).

В меридиональном направлении с запада на восток намечаются рубежи, на которых указанные характеристики изменяются скачкообразно. Такие границы можно провести между 60° и 65° восточной долготы, между 85° и 90° в.д., между 125° и 130° в.д. и между 150° и 155° в.д. (см.рис. 3).

Для обобщенных хронологий стандартное отклонение, средняя чувствительность и отношение сигнал шум повышаются от южного профиля к северному. В меридиональном направлении с запада на восток намечается пять основных границ, которые совпадают с крупными географическими рубежами: р.Обь, р.Енисей, бассейны рек Хатанга и Котуй, р.Лена, р.Колыма (см.рис. 4).

Таким образом, построенные карты-схемы изолиний этих характеристик всех индивидуальных и обобщенных хронологий показывают наличие 6 дендроклиматических районов. Внутри каждого района соответствующие статические характеристики остаются более или менее постоянными в меридиональном направлении. На условных границах, разделяющие два смежных района, эти характеристики меняются скачкообразно.

Рассмотрим теперь выделение районов на основе сходства динамических характеристик хронологий. Такой характеристикой являлся коэффициент синхронности, который оценивает число однонаправленных изменений от года к году между двумя хронологиями. За нижний предел был принят коэффициент синхронности, равный 68%. Эмпирическим путем было установлено, что если коэффициент синхронности между индивидуальными или обобщенными хронологиями равен или выше этого предела, то перекрестная датировка между ними уверенная.

Коэффициент синхронности зависит от расстояния между хронологиями. Синхронность между соседними хронологиями наивысшая. Более высокая синхронность наблюдается между хронологиями, полученными вдоль северного профиля, притом они синхронизируют на гораздо большем удалении друг от друга по сравнению с хронологиями, полученными вдоль южного профиля. Поэтому, если в пространстве могут быть выделены группы хронологий, то в середине группы число синхронных хронологий будет выше, чем на условной границе, разделяющей эти группы.

Далее, для каждого тест-полигона вычислялся геометрический центр тех точек сети тест-полигонов, которые с ней датируются. При этом в качестве весовых функций использовались множители прямо пропорциональные коэффициенту корреляции и обратно пропорциональные расстоянию между точками на сферической поверхности (Мазепа, 1998а, 1998б).

На карту в месте расположения каждой хронологии наносился символ стрелки, направленной в сторону геометрического центра. Величина стрелки была пропорциональна числу хронологий, с которыми датируется данная хронология. Таким образом на карте каждая хронология изображалась стрелкой, направленной в сторону тех точек сети, с которыми она датируется.

Необходимо отметить, что наиболее высокие значения коэффициентов корреляции и синхронности получены между хронологиями по лиственнице, особенно между теми, которые получены для равнинных территорий севера Западной Сибири, удаленных от побережья северных морей на 400-600 км. В горных районах (плато Путорана, Анюйско-Чукотское плоскогорье) и на низменностях, расположенных вдоль побережья (Северо-Сибирская, Яно-Индигирская и Колымская), корреляция и синхронность между хронологиями снижается. Например, хронологии по лиственнице, полученные для прибрежных районов, не показывают высоких показателей сходства с хронологиями, полученными для удаленных до 400-500 км от побережья хронологий (Shiyatov et al., 1996).

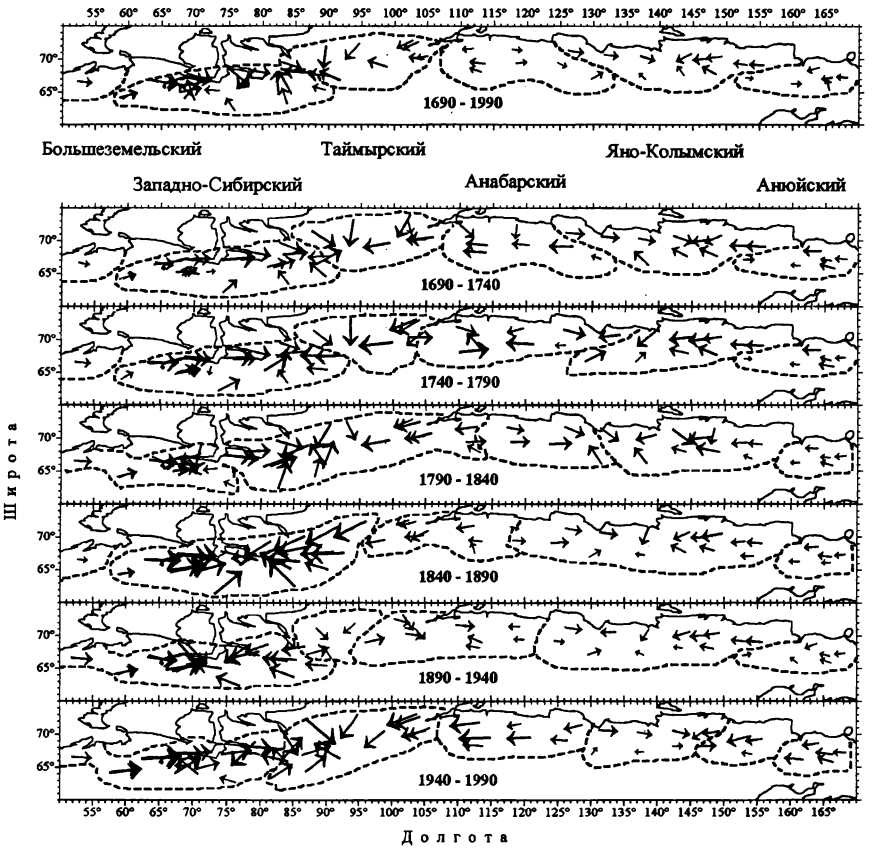

Рис. 9. Карта-схема выделенных районов по сходству хронологий лиственницы на основе коэффициентов синхронности и корреляции. В верхней части показано районирование за весь 300-летний период, в нижней - отдельно по 50-летиям.

Хронологии по ели коррелируют между собой на значительно меньшем расстоянии, главным образом между соседними тест-полигонами.

Корреляция и синхронность между хронологиями по лиственнице и ели, полученными даже для одного участка, не такие высокие (r до 0.48, S до 78%), как между хронологиями по лиственнице, удаленными друг от друга до 200-300 км. Между хронологиями по сосне и лиственнице, сосне и ели на большом расстоянии (300-400 км) корреляция и синхронность практически отсутствуют. На тех же тест-полигонах где удалось собрать образцы деревьев с разных видов (среднее течение р.Полуй, низовье р.Нижняя Тунгуска) возможна даже перекрестная датировка между ними.

На основе динамических характеристик хронологий по лиственнице показано, что в пределах Евроазиатской субарктики они разделяются на 7 групп (рис. 9), каждая из которых содержит разное количество синхронных между собой хронологий. Каждая группа сходных хронологий занимает определенную территорию, которую предлагается называть дендроклиматическим районом. При движении с запада на восток выделены следующие субарктические дендроклиматические районы: Большеземельский, Западно-Сибирский, Таймырский, Анабарский северный, Анабарский южный, Яно-Колымский, Анюйский. Кластеризация динамических характеристик хронологий по ели сибирской позволил выделить три района: Большеземельский, Западно-Сибирский, Таймырский (рис. 10).

Между дендроклиматическими районами по всем 5 видам хвойных древесных растений за последние 300 лет даже в меридиональном направлении нет резких границ, что соответствует концепции биоценотического континуума. Особенно заметно непрерывное изменение характера изменчивости дендроклиматических рядов между Западно-Сибирским и Таймырским районами. Наиболее узкая и резкая переходная зона, которая совпадает с мощным географическим барьером - Верхоянским хребтом, наблюдается между Анабарским и Яно-Колымским районами.

Произведено динамическое районирование субарктической трансекты. Выделены естественные районы по сходству хронологий лиственницы и ели сибирской в различные периоды времени (Мазепа, 1998б). Выбрано 6 временных интервалов длиной 50 лет, с 1690 по 1990 годы (см.рис. 9, 10). Анализ синхронности между древесно-кольцевыми хронологиями в различные временные интервалы показал, что в течение трех столетий происходили сдвиги границ между этими районами. Наиболее устойчивая в течение 300 лет по своему положению граница разделяет Яно-Колымский и Анюйский дендроклиматический районы. Достаточно устойчивая граница, разделяющая Таймырский и Анабарский районы, проходит вдоль бассейна р.Хатанга. Лишь в холодный период конца XVIII, начала XIX столетия (1790-1840 гг.) она смещается на восток вплоть до нижнего течения р.Анабар. Во второй половине XIX столетия (1840-1890 гг.) эта граница смещается на запад вплоть до 95°-100° в.д. Менее устойчивая, но
все же узкая граница разделяет Анабарский и Яно-Колымский районы. В периоды с 1690 по 1840 годы и с 1940 по 1990 годы она проходит вдоль Верхоянского хребта,

лишь северная ее часть варьирует по устье р.Лена. В период с 1840 по 1940 годы граница смещается немного на запад приблизительно до 120° в.д. Наименее устойчивая граница разделяет Западно-Сибирский и Таймырский районы. Более того, в холодные периоды XIX столетия (1790-1890) эта граница вообще отсутствует. Изменчивость хронологий в этот период времени очень сходна на огромной территории. В остальные периоды эта граница намечается по Енисейскому меридиану. Во второй половине XX столетия (с 1940 по 1990 годы) огромная территория от р.Лена до р.Колыма разделилась на два района. Граница, разделяющая их, проходит вдоль западной оконечности бассейна р.Индигирка.

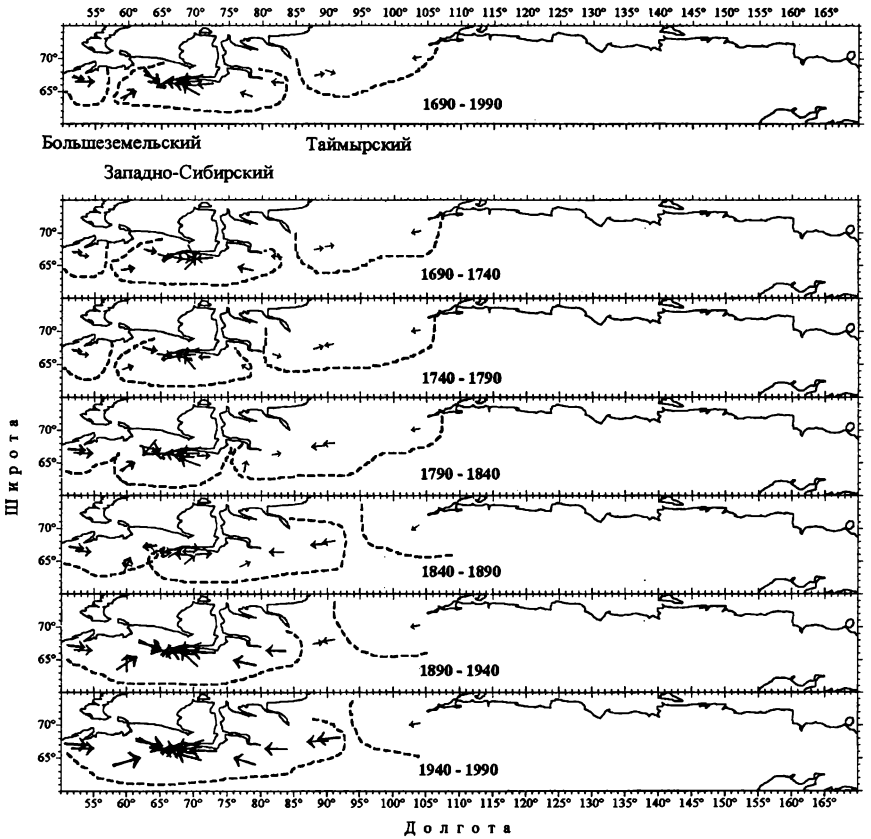

Рис. 10. Карта-схема выделенных районов по сходству хронологий ели сибирской на основе коэффициентов синхронности и корреляции. В верхней части показано районирование за весь 300-летний период, в нижней - отдельно по 50-летиям.

Границы, разделяющие дендроклиматические районы произрастания ели сибирской (см.рис. 10), также варьируют по своему положению. Так, начиная с 1690 и до 1990 годов граница, разделяющая Большеземельский и Западно-Сибирский районы, сначала, вплоть до второй половины XIX столетия, сдвигается на восток, захватывая территории Полярного и Приполярного Урала, и затем постепенно исчезает, при этом образуется один огромный район. Граница, разделяющая Западно-Сибирский и Таймырский районы, сначала вплоть до второй половины XIX столетия, сдвигается на запад, захватывая бассейны рек Пур и Таз, и затем занимает положение несколько восточнее первоначального.

В соответствии с предложенным дендроклиматическим районированием территории Евроазиатской субарктики были построены региональные хронологии по лиственнице (рис. 11), ели сибирской (рис. 12) и сосне обыкновенной (рис. 13), отражающие характерную изменчивость каждого из районов. Построенные региональные хронологии позволяют наглядно анализировать пространственные особенности изменчивости прироста хвойных видов и летней температуры воздуха на огромной территории.

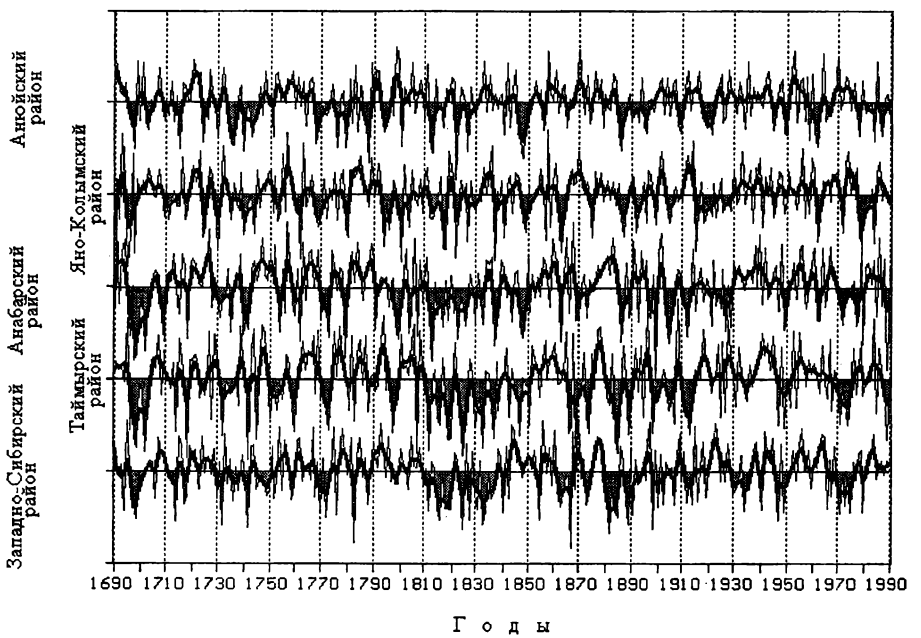

Рис. 11 Региональные хронологии по лиственнице, отражающие характерную изменчивость термического режима летних месяцев.

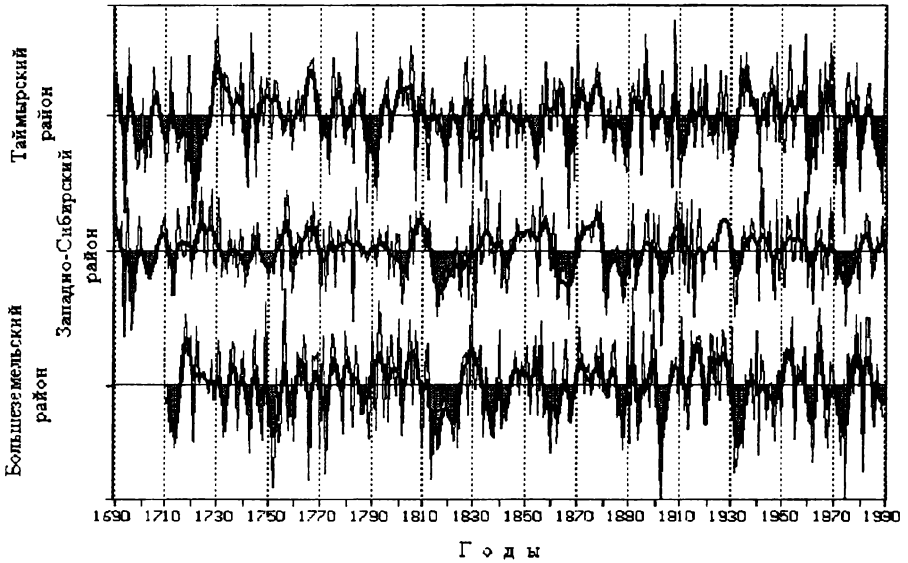

Рис. 12. Региональные хронологии по ели сибирской.

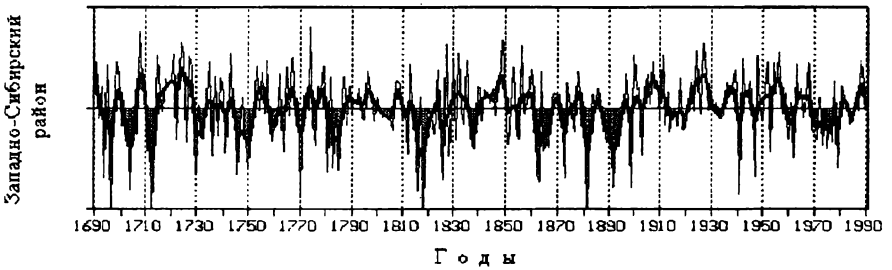

Рис. 13. Региональная хронология по сосне обыкновенной.

В табл. 1 представлены некоторые статистические характеристики региональных хронологий. В таблице также приведены коэффициенты корреляции региональных хронологий с данными аномалий средней месячной (июня и июля) температуры воздуха по географической сети размером 5° широты и 10° долготы (Jones et al., 1991). При этом выбирались те трапеции географической сети, которые входят в соответствующий район и данные интерполяции имеют наибольшую продолжительность. Все приведенные характеристики свидетельствуют о том, что построенные региональные хронологии отражают существенную долю изменчивости термического режима летнего периода.

Таблица 1.

Характеристика изменчивости региональных хронологий.

Район	1-я главная компонента (%)	Средняя корреляция между обобщенными хронологиями внутри района	обобщенные с региональной хронологией	со средней месячной температурой воздуха	
				июнь	июль
Larix sibirica					
Западно-Сибирский	66	0.6	0.8	0.44	0.46
Larix sibirica+Larix gmelinii					
Таймырский	75	0.67	0.84	0.35	0.38
Анабарский	71	0.57	0.81	0.43	0.19
Larix cajanderi					
Яно-Колымский	70	0.64	0.83	0.47	0.31
Анюйский	70	0.54	0.8	0.34	0.23
Picea obovata					
Большеземельский	58	0.51	0.74	0.21	0.27
Западно-Сибирский	55	0.47	0.71	0.31	0.45
Таймырский	64	0.46	0.76	0.35	0.52
Pinus sylvestris					
Западно-Сибирский	64	0.5	0.77	0.13	0.29

Сравнивая рисунки, представляющие региональные хронологии по всем видам хвойных древесных растений, можно заметить, что крупные циклы понижения прироста совпадают по времени в большинстве случаев для соответствующих районов. Погодичная изменчивость региональных хронологий для различных видов отличается. По-видимому, крупные циклы (10 и более лет) в динамике относительного прироста всех изученных видов хвойных древесных растений связаны с общим ухудшением условий для роста. Таким фактором на северном пределе произрастания древесной растительности может быть только термический режим.

Глава 7. Реконструкция основных климатических факторов.

Реконструкцию хода летних температур для каждой из этих станций производили методом оценки коэффициентов множественного регрессионного уравнения, где зависимой переменной являлась средняя температура июня-июля, а независимой - несколько древесно-кольцевых хронологий, полученных на удалении до 200-500 км от метеостанции. Одна и та же хронология могла участвовать как независимая переменная при реконструкции летней температуры для 2-3-х базовых метеостанций. Использование нескольких хронологий для осуществления точечных реконструкций по базовым метеостанциям обосновано тем, что они содержат общий климатический сигнал - среднюю температуру июня-июля.

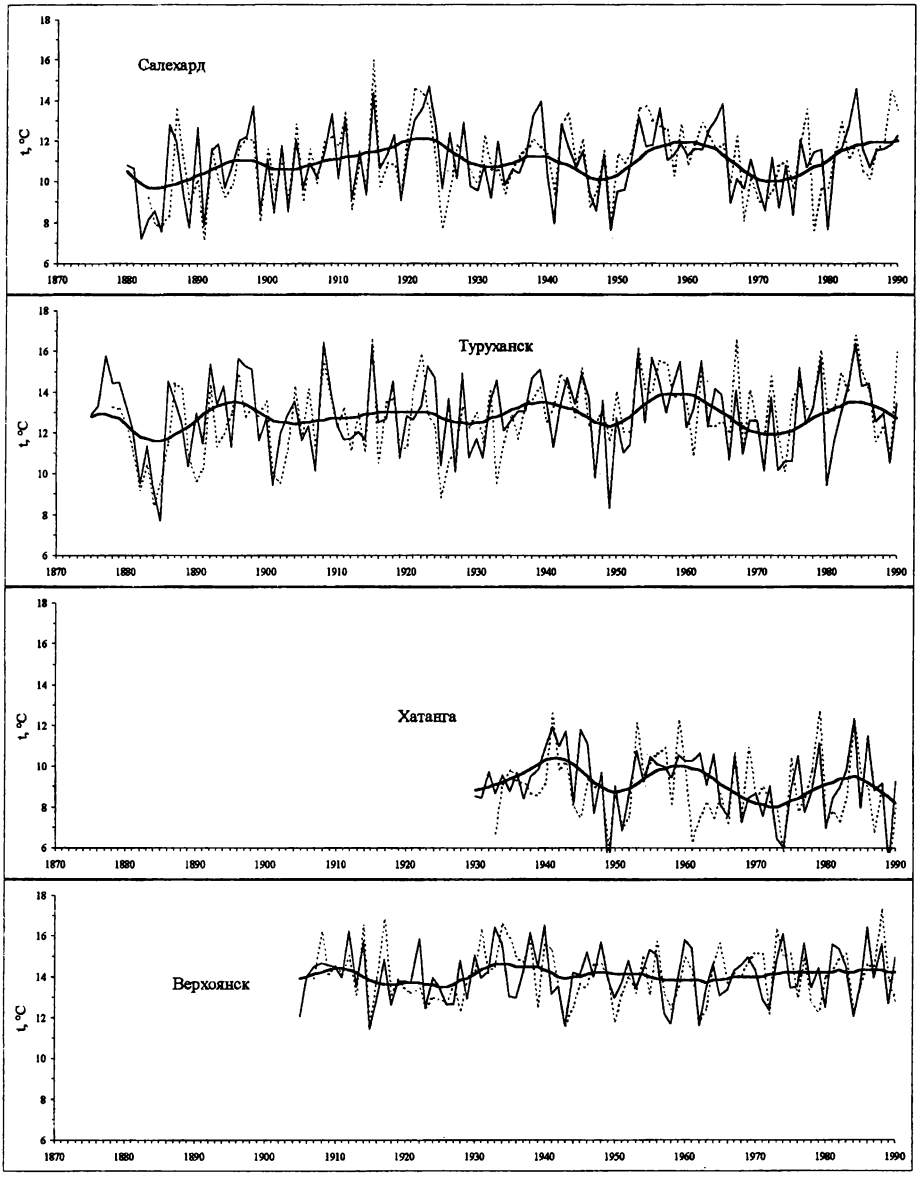

Рис. 14. Сравнение реконструированных (тонкая сплошная линия) и инструментальных (пунктирная линия) данных средней температуры июня-июля для 4 метеостанций.

На рис. 14 приведено сравнение реконструированных и фактических данных по средней температуре июня-июля для 4 базовых метеостанций. Оценки моделей

приведены в табл. 2. Экстремальные значения хорошо совпадают с фактическими экстремумами. Так, для Салехарда отмечено лишь четыре случая, когда такие расхождения имеются (по два максимума и минимума), для Туруханска- шесть случаев (по три максимума и минимума), для Хатанги существенных расхождений нет, для Верхоянска - три.

Таблица 2.

Пример величин, характеризующих процесс реконструкции средних летних температур воздуха (июнь,июль) для 4 метеостанций.
(r^* - коэффициент корреляции).

Оценка параметров			Проверка модели		
Период	R^2	F-критерий	Период	r^*	Критерий знаков
Салехард					
1883—1990	0.68	$22.4_{4,103}$	—	—	—
1883—1936	0.73	$17.1_{2,51}$	1937—1990	0.56	35/18
1937—1990	0.56	$4.1_{6,47}$	1883—1936	0.50	43/10
1898—1921	0.87	$34.1_{3,20}$	1883—1990	0.49	57/26
Туруханск					
1878—1990	0.60	$26.0_{2,110}$	—	—	—
1965—1990	0.70	$6.6_{4,31}$	1878—1990	0.46	81/31
Хатанга					
1933—1990	0.61	$16.6_{2,55}$	—	—	—
1965—1980	0.73	$4.1_{1,14}$	1933—1990	0.41	41/16
Верхоянск					
1907—1991	0.54	$34.7_{1,83}$	—	—	—
1907—1927	059	$6.7_{3,17}$	1907—1991	0.43	57/27

Рассмотрим качество пространственной реконструкции по отдельным годам. Большинство выбранных базовых метеостанций начали функционировать с середины 30-40-х годов нынешнего столетия. Поэтому здесь рассмотрено качество пространственной реконструкции начиная с 1940 года. На рис. 15 представлен график коэффициентов корреляции между наблюденными и реконструированными температурами воздуха по 47 метеостанциям. Каждый год с 1940 по 1990 представлен 47 парами чисел (наблюденное значение температуры и реконструированное). Из рисунка видно, что среднее значение корреляции выше 0.9. Это подтверждает высокое соответствие пространственной реконструкции летних температур с наблюденными.

Пространственная реконструкция произведена за каждого из последних 380 лет (с 1611 по 1990 гг.) на основе использования 67 точечных реконструкций средней температуры июня-июля (Ваганов, Шиятов, Мазепа, 1996, приложение 1). Визуальный анализ карт ежегодных пространственных изменений летних температур

воздуха показал, что можно выделить типичные случаи, прежде всего - противоположные типы аномалий - положительные и отрицательные.

Общее число положительных аномалий температуры составило 127 лет (33%), они неравномерно распределены во времени. Наиболее теплыми периодами на большей части Урало-Сибирской субарктики были 1650-1670, 1770-1790, 1850-1870, 1930-1950 и 1950-1970 гг. Для Западной Сибири самыми теплыми годами были 1782, 1861, 1986, для Средней Сибири - 1727, 1747, 1757, 1868, для Северо-Востока Сибири - 1757, 1861, 1960.

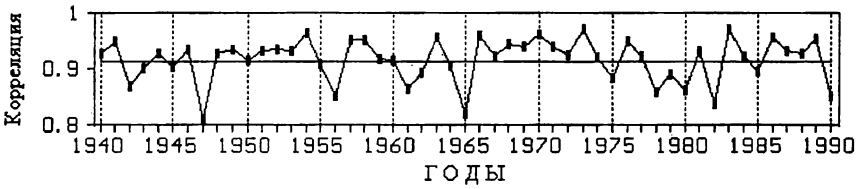

Рис. 15. Коэффициенты корреляции между наблюденными и реконструированными летними температурами воздуха по 47 базовым метеостанциям.

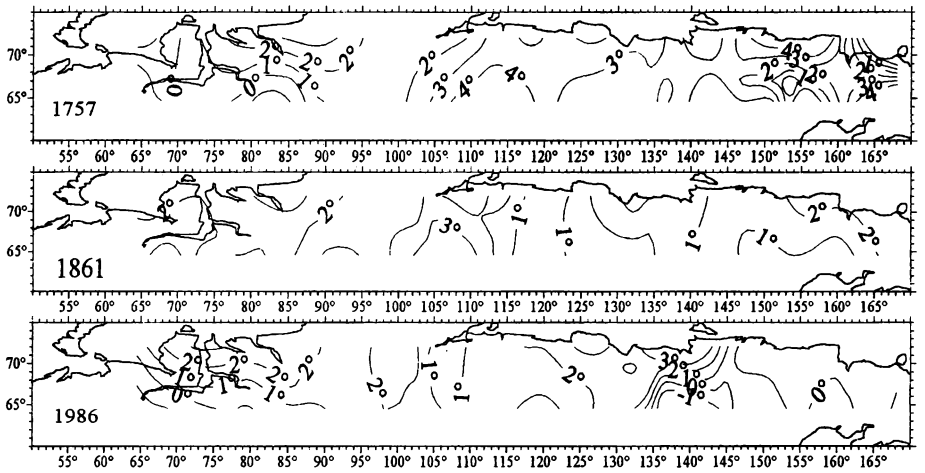

Рис. 16. Наибольшие положительные аномалии реконструированной летней температуры в Субарктике за отдельные годы.

Отрицательные аномалии температуры (ниже -1°С). Число холодных и экстремально холодных лет в пределах большей части Евроазиатской субарктики невелико - 18 (или около 5%). Частота холодных лет неодинакова в различные интервалы времени: в XVII в. - четыре случая (1642, 1675, 1696 и 1698 гг.), в XVIII в. - четыре случая (1718, 1726, 1772, 1788 гг.), в XIX в. - 6 случаев (1807, 1812, 1819, 1825, 1830

и 1837 гг.), в XX в. - 4 случая (1900, 1905, 1949 и 1980 гг.). Таким образом, наибольшее число холодных и экстремально холодных лет наблюдалось в первой половине XIX в., в другие интервалы времени их частота оставалась примерно одинаковой (четыре случая в столетие).

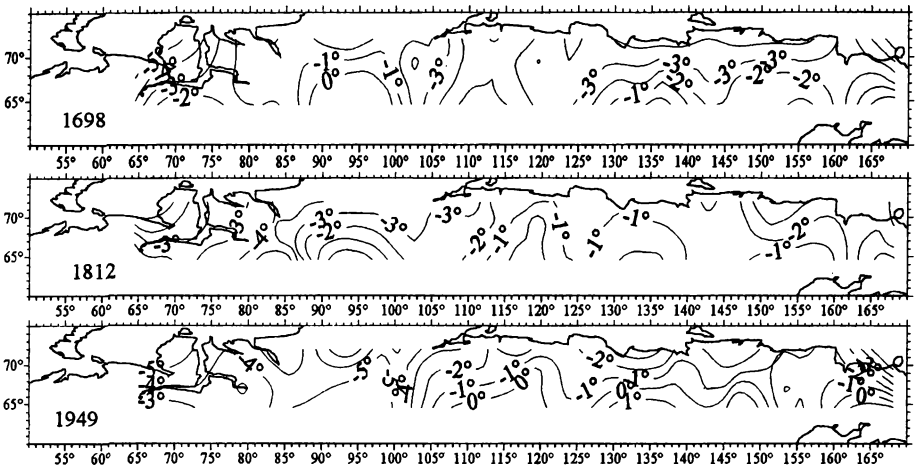

Рис. 17. Примеры различных типов отрицательных аномалий температуры.

В течение последних 380 лет довольно встречались случаи, когда аномалии температуры были противоположными в западной и восточной половинах трансекты. Типичными случаями таких летних сезонов были в 1622 и 1637 гг. Первый год характеризуется тем, что в западной части трансекты было холодное лето, а в восточной - теплое, а второй год - наоборот. Следует отметить, что граница между этими аномалиями не является постоянной в разные годы, а колеблется между 105-130° в.д. Число лет с распределением аномалий "запад (холод) - восток (тепло)" оказалось в два раза большим (20 случаев, или 5.3%) по сравнению с аномалиями "запад (тепло) - восток (хородно)" (10 случаев, или 2.6%). Поскольку холодные летние сезоны в северной части Урала и Сибири обусловлены вторжениями холодных арктических масс, то приведенные выше цифры свидетельствуют о том, что такие вторжения чаще встречались в западной половине трансекты, т.е. на Западную Сибирь и Таймырский полуостров. Подсчет числа таких лет для отдельных столетий не показал больших изменений частоты их встречаемости. Так, вариант "запад (холод) - восток (тепло)" в XVII в. повторился 8 раз, в XVIII в. - 4 раза, в XIX в. - 6 раз, в XX в. - 2 раза. Противоположный вариант "запад (тепло) - восток (холодно)" в XVII в. повторился 3 раза, в XVIII в. - 2 раза, в XIX в. - 3 раза, в XX в. - 2 раза. Однако, такие случаи чаще встречались в нечетные столетия по сравнению с четными.

Анализ карт аномалий летней температуры показывает, что за последние 380 лет только 38% случаев однонаправленных аномалий летней температуры были выражены на большей части Евроазиатской субарктики. В остальные годы аномалии показывали особенности хода летней температуры в пределах стран и дендроклиматических районов. Оценка региональных особенностей показана на примере Анабарского северного и южного дендроклиматических районов. Так, в 29% лет аномалии были такими же, как и в пределах Средней Сибири, в 33% лет они были характерны для каждого района (северного и южного). Таким образом, региональные особенности аномалий летних температур являются преобладающими (62%) по сравнению с аномалиями, выраженными в пределах северной части Азиатского материка (38%). Подобное соотношение региональных и материковых аномалий температуры наблюдалось в течение последних четырех столетий.

Анализ аномалий температуры, основанный на пространственных дендроклиматических реконструкциях, важен при оценке современных и будущих изменений климата. При глобальном потеплении климата можно ожидать увеличения числа умеренно-теплых лет для всей территории Субарктики, как это происходило, например, в наиболее теплый период текущего столетия (1930-70-е годы), в течение которого наблюдался 21 такой случай (свыше 50%). Не исключается, что в одних районах будут преобладать положительные, а в других - отрицательные аномалии, т.е. глобальное потепление будет региональным по своей природе.

Реконструкция количества осадков была произведена лишь для некоторых базовых метеостанций. Выбирались наиболее качественные реконструкции по своим статистическим показателям. Это объясняется двумя обстоятельствами. В субарктических районах термический режим является основным лимитирующим фактором влияющим на рост древесных растений. Во-вторых, основная часть материала (образцы модельных деревьев) была собрана именно для целей реконструкции температуры воздуха. Для этого выбирались соответствующие местообитания во время полевых работ.

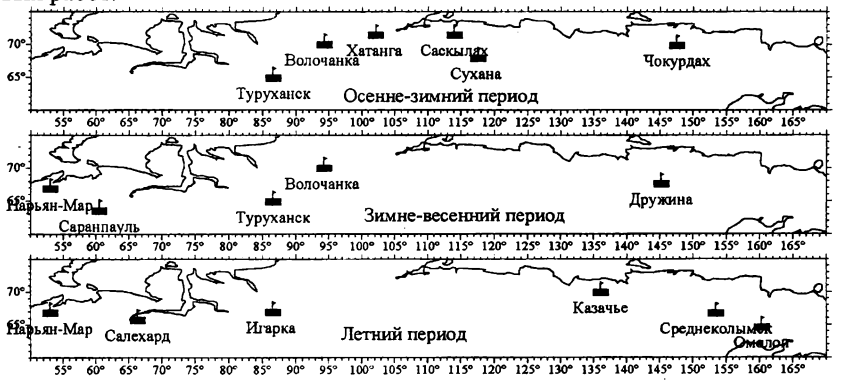

Рис. 18. Расположение метеостанций, для которых выполнена реконструкция количества осадков с 1800 по 1990 гг. в различные периоды года.

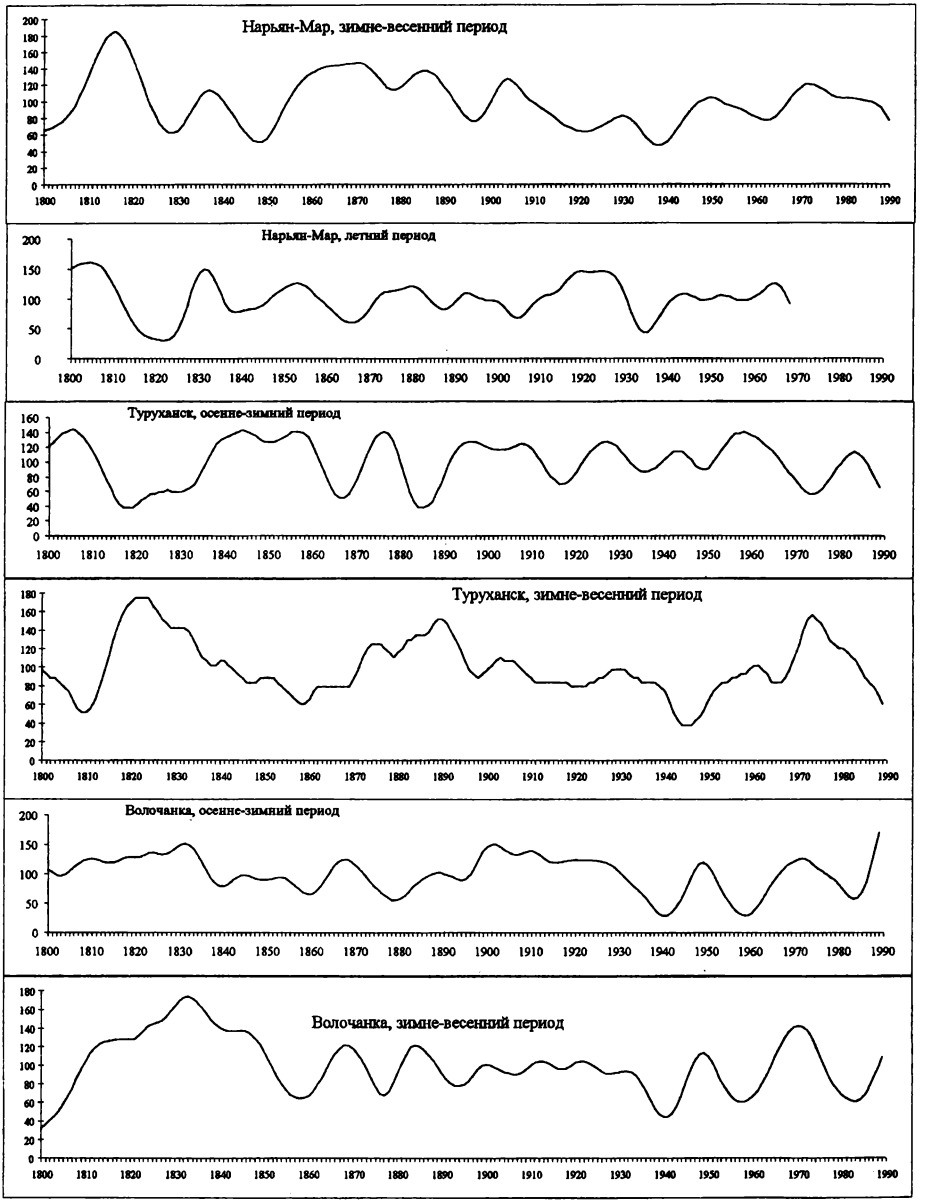

Рис. 19. Примеры сглаженных реконструкций количества осадков в различные периоды года.

Визуальный анализ построенных реконструкций показывает, что не наблюдается синхронности внутривековых и вековых изменений степени увлажненности в различные периоды. Нет такой синхронности и между близлежащими метеостанциями. Лишь отдельные периоды повышенной или пониженной увлажненности совпадают для различных районов. Показательный пример для метеостанции Туруханск, для которой удалось выполнить реконструкцию количества осадков в осенне-зимний и зимне-осенний периоды. Двадцатые-тридцатые годы девятнадцатого столетия были очень холодными для этого района (см. реконструкцию летних температур воздуха). Осенне-зимний период этого района характеризовался пониженной увлажненностью. Однако, зимы этого периоды были, судя по реконструкции многоснежными. Внутривековые и вековые изменения увлажненности в осенне-зимний и зимне-весенний периоды не синхронны для метеостанции Туруханск. Более синхронные изменения увлажненности за осенне-зимний и зимне-весенний периоды наблюдаются для метеостанции Волочанка, для которой тоже удалось выполнить обе реконструкции.

Для метеостанции Нарьян-Мар удалось выполнить две реконструкции относительной увлажненности за зимне-весенний и летний периоды. Интересно, что летний период 10-20-х годов XIX столетия характеризовался пониженной увлажненностью и даже сухостью, а зимы в это время были многоснежными. Для этой метеостанции также не наблюдается синхронности между реконструированной увлажненностью для летнего и зимнего периодов.

Заключение.

Основное внимание в работе было уделено изучению пространственно-временной изменчивости годичного радиального прироста хвойных видов деревьев в пределах зоны лесотундры и северной части подзоны редкостойных лесов Евразии и оценке климатических факторов, влияющих на рост и продуктивность в лесотундровых экосистемах. Исходным материалом являлась собранная воедино достаточно густая и равномерно распределенная сеть древесно-кольцевых хронологий по наиболее чувствительным к изменениям климата хвойным видам деревьев на огромной территории от Большеземельской тундры на западе до Чукотки на востоке.

Важным результатом работы является установление сходства в изменчивости радиального прироста различных видов хвойных деревьев, которое в подавляющем большинстве случаев обусловленно динамикой температур воздуха летних месяцев (июня и июля). Регрессионные модели роста хвойных деревьев показали, что температура летних месяцев объясняет до 60% изменчивости прироста. Наиболее сильный климатический сигнал содержится в хронологиях по лиственнице. В ряде районов (низовья рек Яны, Индигирки, Алазеи и Колымы) этот сигнал является максимальным из представленных до сих пор в дендроклиматической литературе.

Оценки климатического сигнала, содержащегося в древесно-кольцевых хронологиях, полученных для различных районов Евроазиатской субарктики, позволили получить реконструкции летних температур на основе использования множествен-

ных регрессионных моделей. Во-первых, анализ функций отклика показал, что изменчивость радиального прироста деревьев, произрастающих на северном климатическом пределе их распространения и в условиях континентального и резко континентального климата, определяется почти исключительно температурами двух летних месяцев (июня и июля). Во-вторых, четко прослеживаются долготные и широтные закономерности в смещении сроков начала роста деревьев. Двигаясь с запада на восток и с севера на юг, уменьшается относительный вклад июльских температур и увеличивается - июньских, что связано с более ранним началом вегетации деревьев в континентальных и южных районах. В третьих, в этих районах из года в год проявляется лимитирующее воздействие температурного фактора благодаря кратковременности сезона радиального роста деревьев (до 50-60 суток активного роста), а также тому, что деревья произрастают на климатическом пределе своего существования или вблизи его, а изменчивость термического режима в этих широтах высокая. В четвертых, однонаправленное и сходное воздействие температуры воздуха на радиальный прирост деревьев наблюдается в пределах больших территорий (многие сотни километров), в разных типах условий местообитания (от сухих до заболоченных) и у различных видов хвойных деревьев. Наконец, субарктические районы относительно слабо подвергались антропогенному воздействию и содержащийся в годичных кольцах климатический сигнал отражает в основном естественные изменения климата.

В континентальных и бедных осадками районах существенное отрицательное влияние на прирост деревьев оказывает дефицит влаги в маломощном слое оттаявшей почвы, в связи с чем осадки июня-июля способствуют увеличению прироста. В общем случае влияние осадков в различные сезоны года более разнообразно и выражено в меньшей степени по сравнению с влиянием температуры воздуха. Регрессионные модели показали, что динамика количества осадков объясняет до 30% изменчивости прироста.

Для роста лиственницы, в зависимости от района, значимым экологическим фактором являются осадки осенне-зимнего, зимне-весеннего и летнего периодов. Так, на территории Большеземельской тундры, Полярного и Приполярного Урала, Западной Сибири отсутствует связь прироста с осадками осенне-зимнего периода предшествующего года роста. На остальной территории осенне-зимние осадки в большинстве случаев положительно влияют на прирост. Зимне-весенние осадки оказывают отрицательное влияние. На территории Средней Сибири, части Северо-Востока Сибири отсутствует связь с осадками летнего периода. Летние осадки оказывают положительное влияние в западном секторе Субарктики.

Примерно у 60% хронологий по ели сибирской обнаружено незначительное влияние осадков. У большинства из них отмечена отрицательная связь с осадками зимних месяцев. Только для территории Средней Сибири обнаружена положительная связь прироста с осенними осадками предыдущего года, а для территории Западной Сибири - с летними осадками текущего года роста.

У хронологий по сосне обыкновенной из Западной Сибири сказывается положительное влияние весенних осадков и незначительное влияние осадков ранней осени предшествующего года роста. У хронологий из Средней Сибири - отрицательное влияние осенне-зимних осадков.

Обращает на себя внимание большое сходство погодичной изменчивости прироста деревьев в пределах обширных территорий (до 600-800 км). Длительные колебания (внутривековые, вековые) имеют синхронный ход в пределах более обширных территорий. Это свидетельствует о том, что на изменчивость прироста основное влияние оказывают макроклиматические процессы.

На основе анализа изменчивости прироста, синхронности в погодичной динамике изученная территория была разделена на семь дендроклиматических районов: Большеземельский, Западно-Сибирский, Таймырский, Анабарский северный, Анабарский южный, Яно-Колымский и Анюйский.

Границы, разделяющие дендроклиматические районы произрастания лиственницы, варьируют по своему положению. Наиболее устойчивая граница, в течение 300 лет, разделяет Яно-Колымский и Анюйский районы. Достаточно устойчивая граница, разделяющая Таймырский и Анабарский районы, проходит вдоль бассейна р.Хатанга. Лишь в холодный период конца XVIII - начала XIX столетия она смещается на восток вплоть до нижнего течения р.Анабар. Во второй половине XIX столетия эта граница смещается на запад до 95°-100° в.д. Обращают на себя внимание существенные различия в климатически обусловленной изменчивости прироста лиственницы между прибрежными и континентальными районами, расположенными между реками Хатангой и Леной. Менее устойчивая, но все же узкая граница разделяет Анабарский и Яно-Колымский районы. В периоды с 1690 по 1840 годы и с 1940 по 1990 годы она проходит вдоль Верхоянского хребта, лишь северная ее часть варьирует по устье р.Лена. В период с 1840 по 1940 годы граница смещается немного на запад приблизительно до 120° в.д. Наименее устойчивая граница разделяет Западно-Сибирский и Таймырский районы. Более того, в холодные периоды XIX столетия эта граница вообще отсутствует. Изменчивость прироста в этот период очень сходна на огромной территории. В остальные периоды эта граница намечается по Енисейскому меридиану. Во второй половине XX столетия огромная территория от р.Лена до р.Колыма разделилась на два района. Граница, разделяющая их, проходит вдоль западной оконечности бассейна р.Индигирка.

Границы, разделяющие дендроклиматические районы произрастания ели сибирской, также варьируют по своему положению. Граница, разделяющая Большеземельский и Западно-Сибирский районы, сначала, вплоть до второй половины XIX столетия, сдвигается на восток, захватывая территории Полярного и Приполярного Урала, и затем постепенно исчезает. При этом образуется один огромный район. Граница, разделяющая Западно-Сибирский и Таймырский районы, сначала, вплоть до второй половины XIX столетия, сдвигается на запад, захватывая бассейны рек Пур и Таз, и затем занимает положение несколько восточнее первоначального.

Важным результатом проделанной работы явилась пространственная реконструкция аномалий средней температуры июня-июля для территории Евроазиатской субарктики. Анализ хода реконструированных летних температур показал, что на протяжении последних нескольких столетий амплитуда экстремальных летних температур оставалась высокой и более или менее постоянной. Однако, при движении с запада на восток наблюдается постепенное ее снижение.

Анализ внутривековых и вековых изменений реконструированного количества осадков в различные сезоны года за последние 200 лет показал, что для западного сектора Субарктики характерны более крупные циклы увлажнения по сравнению с восточным сектором. Однако, амплитуда колебаний выше для восточного сектора.

Существенно, что реконструкции не показывают четко выраженного положительного тренда температуры воздуха в связи с увеличением концентрации тепличных газов в атмосфере в пределах всей изученной территории. Более того, в конце 1970-х и в первой половине1980-х годов во многих районах Субарктики наблюдалось снижение прироста деревьев и похолодание в летние месяцы, которое наиболее четко было выражено в пределах Западно-Сибирского и Таймырского секторов. Происходящие в настоящее время погодичные и многолетние изменения летней температуры воздуха не выходят за пределы их исторических колебаний. Основываясь на дендроклиматических реконструкциях, нельзя однозначно утверждать, что потепление климата в высоких широтах, наблюдавшееся в середине текущего столетия, было экстраординарным. Аналогичные повышения летней температуры с близкой амплитудой наблюдались, например, в конце XVII в., в середине и конце XVIII в. в различных субарктических районах. В то же время анализ полученного материала дает основание утверждать, что антропогенно-обусловленное изменение климата вероятнее всего не будет синхронным в различных крупных секторах Субарктики. Прирост древесных растений, произрастающих на полярном пределе своего распространения, должен наиболее быстро отреагировать на такое изменение климата. Другие биологические процессы, такие, как изменение состава и структуры лесных экосистем, сукцессии, смещение границ ботанико-географических зон, полярной границы распространения древесной растительности, т.е. процессы с более продолжительным характерным временем, должны проявиться с заметным запаздыванием (десятки и сотни лет).

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

Мазепа В.С. Метод расчета индексов годичного прироста обобщенного дендроклиматологического ряда //Экология. - 1982. - 3. - С. 21-28.

Mazepa V.S. Method of computing annual-growth indexes of a generalized dendrochronological series //Soviet Journal of Ecology. - 1982. - 13(3). - P.172-177.

Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Прогноз тенденций климатогенных смен лесной растительности в Большеземельской и Западносибирской лесотундре. - В кн.: Биологические проблемы севера. Тезисы X Всесоюзного Симпозиума. - Магадан, 1983, С.173.

Мазепа В.С. Современные подходы при изучении дендрохронологической информации и анализ временных рядов. - Препринт. ИФ СО АН СССР. - Красноярск, 1984. - 51 с.

Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Natural fluctuation of climate in the eastern regions of the USSR based on tree-ring series. -Collaborative Paper. Regional Resource Management, Vol.1, IIASA, July, 1986, CP-86-24, P.47-73.

Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Цикличность радиального прироста деревьев в высокогорьях Урала. - Дендрохронология и дендроклиматология. - Новосибирск, Наука, 1986. - С.134-160.

Мазепа В.С. Использование спектрального представления и линейной фильтрации стационарных последовательностей при анализе цикличности в дендрохронологических рядах. - Новосибирск, Наука, 1986. - С.49-68.

Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Some new approaches in the construction of more reliable dendrochronological series and in the analysis of cycle components. -IIASA, Polish Acad.Sci. - System research Institute. - Methods of dendrochronology -1, Proceedings of the Task Force Meeting on Methodology of Dendrochronology: East/West Approaches, 2-6 June, 1986, Krakow, Poland. Editors: Kairiukstis L., Bednarz Z., Feliksik E. Warsaw, 1987, P.87-96.

Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Климатически обусловленные колебания радиального прироста деревьев в восточных районах СССР //Временные и пространственные изменения климата и годичные кольца деревьев. Часть 2. - Каунас, Институт Ботаники АН ЛитССР, 1987. - С.69-84.

Мазепа В.С. Спектральный подход и узкополосная фильтрация при прогнозировании дендрохронологических рядов. - Анализ и прогноз многолетних временных рядов: Сб.научн.труд. ВАСХНИЛ СО СибНИИЗХим. - Новосибирск, 1988. -С.144-151.

Оленин С.М., Мазепа В.С. Прогноз климатически обусловленного радиального прироста сосны в ленточных борах Прииртышья //Экология. - 1988. - 5. - С.78-80.

Mazepa V.S. Spectral Approach and Narrow Band Filtering for Assesment of Cyclic Components and Ecological Prognoses. //Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences (Eds. E.R.Cook & L.A.Kairiukstis). IIASA: Kluwel Academic Publishers - Dordrecht/Boston/London, 1990, pp. 302-308.

Coook E., Briffa K., Shiyatov S. and Mazepa V. Tree-Ring Standardization and Growth-Trend Estimation. //Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences (Eds. E.R.Cook & L.A.Kairiukstis). IIASA: Kluwel Academic Publishers - Dordrecht/Boston/London, 1990, pp. 104-123.

Cook E., Shiytov S. and Mazepa V. Estimation of the Mean Chronology. //Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences (Eds. E.R.Cook & L.A.Kairiukstis). IIASA: Kluwel Academic Publishers - Dordrecht/Boston/London, 1990, pp. 123-133.

Shiyatov S., Mazepa V. and Cook E. Correcting for Trend in Variance due to Changing Sample Size. //Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences (Eds. E.R.Cook & L.A.Kairiukstis). IIASA: Kluwel Academic Publishers - Dordrecht/Boston/London, 1990, pp. 133-137.

Шиятов С.Г., Мазепа В.С., Фриттс Г. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в высокогорьях Урала //Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XIV, Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 1992, с. 125-134.

Shiyatov S., Mazepa V., Fritts H. The influence of climatic factors on radial growth of timberline trees in the Urals. -LUNDQUA REPORT. Tree rings and environment. Proceedings of the International Dendrochronological Symposium. Ystad, South Sweden, 3-9 September 1990. - Lund 1992, Vol. 34 pp. 303-307.

Дружинин Н.А., Мазепа В.С., Шиятов С.Г. Влияние климатических факторов на радиальный прирост осушенных сосняков //Антропогенное влияние на европейские таежные леса России: Сб.научн.тр./АИЛиЛХ, Архангельск, 1994. - с.157-169.

Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Климат //Природа Ямала. - Екатеринбург: Наука, УИФ, 1995. - С. 32-68.

Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Vaganov E.A., Schweingruber F.H. Summer Temperature Variations Reconstructed by Tree-Ring Data at the Polar Timberline in Siberia. //Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference, Tucson, Arizona, 17-21 May 1994. (eds. Jeffrey S. Dean, David M. Meko, Thomas W. Swetnam). Radiocarbon, 1996, pp. 61-70.

Mazepa V.S. Reconstruction of spatial variations in summer temperatures for the last 300 years in the north of West-Siberian Plain. //International Conference on Past, Present and Future Climate. Proceedings of the SILMU conference held in Helsinki, Finland, 22-25 August 1995, pp.136-139.

Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. - Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. - 246 с.

Мазепа В.С. Погодичная реконструкция средней летней температуры воздуха на севере Западной Сибири с 1690 года на основе данных о радиальном приросте деревьев //Сибирский экологический журнал. - 1998. - т. 5, № 4. - С. 36-43.

Мазепа В.С. Дендроклиматическая реконструкция летней температуры воздуха с 1690 года в Субарктических районах Сибири //Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XVII, 1998, с.123-140.

Подписано в печать 12.10.98 г. Формат 60 х 84 1/16 Тираж 100 экз.
Объем - 2,0 печ. л. Заказ № 5738

620219, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, 42
ТОО "ИРА УТК"