

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*:574.24+58.02

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ ДЕРЕВЬЕВ КОЛЬСКОГО СЕВЕРА***

© 2012 г. Т. В. Черненкова¹, Ю. Н. Бочкарев², М. Фридрих^{3,4}, Т. Беттгер⁵

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
117 997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32
e-mail: chernenkova50@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, географический факультет
119 992 Москва, Воробьевы горы, главное здание

³Institute of Botany, Hohenheim University, Garbenstraße 30, 70599, Stuttgart, Germany;

⁴Heidelberg Academy of Sciences, Karlstr. 4, 69117, Heidelberg, Germany

⁵Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Department of Catchment Hydrology
Theodor-Lieser-Str. 4 D-06120, Halle, Germany

Поступила в редакцию 30.01.2012 г.

Изучена динамика радиального прироста деревьев сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea obovata* Ledeb.) на северном пределе их распространения на Кольском полуострове, в районе действия комбината Североникель. С помощью статистических методов установлена связь радиального прироста деревьев с совокупностью сопряженно действующих факторов внешней среды и выявлен вклад отдельных факторов. Найден статистически значимые зависимости продуктивности деревьев от уровня загрязнения, особенностей рельефа и климатической составляющей. Прослежена достоверная связь прироста деревьев с объемами поступающих в атмосферу выбросов предприятия, зависящая от степени техногенной нагрузки на деревья, видовой принадлежности деревьев и местоположения на склонах возвышенностей. Выявлена различная зависимость колебаний прироста разных частотных уровней (длинноволновых – 50 лет, средневолновых – 30 лет и коротковолновых – межгодовых) от климатических показателей.

Дендрохронологические методы, сосна, ель, Кольский север, атмосферное загрязнение, тяжелые металлы, годичный прирост, климат, ландшафтные факторы.

В условиях произрастания хвойных насаждений на границе их распространения сила воздействия внешних факторов среды проявляется наиболее отчетливо [11]. К таким районам относится территория Кольского п-ва, в центральной части которого присутствует источник сильного хронического загрязнения атмосферными выбросами – горно-металлургический комбинат (ГМК) “Североникель”. Многочисленные примеры повреждения состояния древесных насаждений в его окрестностях достаточно хорошо отражены в литературе [1, 8, 10, 13, 20].

Дендрохронологический метод часто используется при оценке изменений условий природной среды, в частности, динамики климата и погодных факторов [2–4, 12, 16, 21], а также при оценке функциональных нарушений в результате антропогенных воздействий [6, 9]. Статистические

методы позволяют установить связь радиального прироста деревьев с совокупностью сопряженно действующих факторов внешней среды и выявить вклад каждого фактора в отдельности, однако число исследований, учитывающих полифакторную детерминацию структурно-функциональных характеристик лесных насаждений в данном районе, крайне ограничено [15, 25]. Вместе с тем возможности использования дендрохронологических и статистических методов, по мнению канадских исследователей [23], имеют большое значение для понимания краткосрочной реакции продуктивности бореальных лесов на условия среды в течение последних нескольких десятилетий и оценки этого влияния на углеродный баланс. Применение модели смешанного эффекта позволило авторам продемонстрировать последовательное снижение прироста сосны обыкновенной на 17%, или 0.0025 мм год⁻¹ в 1930–1980-х гг. в Северной Евразии [23].

* Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН по разработке методологии мониторинга биоразнообразия лесов и РФФИ (11-04-01093 и 07-04-01743).

Целью данной работы являлся анализ изменения радиального прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях Кольского Севера под влиянием атмосферного загрязнения, экотопических условий и климатических параметров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен за полярным кругом в подзоне северной тайги, в центральной части Кольского п-ва и занят в основном еловыми и сосновыми кустарничково-зеленомошными редкостойными лесами. Изучаемая территория располагается на высоте 100–1200 м над ур. моря и характеризуется среднегодовой суммой активных средних суточных температур воздуха

$\geq +10^\circ\text{C}$ около 900°C и выпадением 500–600 мм атмосферных осадков [7]. В районе исследования находится источник атмосферного загрязнения – горно-металлургический комбинат (ГМК) “Североникель”, определяющий облик и состояние лесных экосистем в окрестностях г. Мончегорска с 1935 г. В зоне его влияния на протяжении многих десятилетий основными ингредиентами токсического воздействия выступают тяжелые металлы и сернистые соединения. Объем промышленных выбросов в атмосферу в 1980-х годах составлял: двуокиси серы – 220–240 тыс. т год⁻¹, соединения никеля – 3400, меди – 2640, кобальта – 100, окислов азота – 1200, серной кислоты (пары) – 3350, хлора – 1000, фторидов – 800 т год⁻¹. В последние годы выбросы заметно уменьшились в связи с сокращением объемов производства, в частнос-

Таблица 1. Характеристики точек отбора проб

Зона	Расстояние и направление от комбината, км	Высота над ур. моря, м	Экспозиция склона	Порода дерева	Долгота	Широта
Импактная	Ю-5	< 250	в	Е	32.7848	67.9082
	Ю-10	250–300	в	Е	32.7867	67.8464
		< 250	н/в	С	32.7066	67.8543
Буферная	Ю-20	< 250	с-в	Е	32.7997	67.7611
		250–300	в-с-в	Е	32.7717	67.7640
		> 300	н/в	Е	32.7480	67.7619
	Ю-30	< 250	с-с-з	Е	32.8025	67.6792
		250–300	в-ю-в	Е	32.7924	67.6707
		> 300	в	Е	32.7846	67.6721
		< 250	с	С	32.7720	67.6473
		< 250	с-з	С	32.74983	67.6498
Фон	Ю-65	< 250	н/в	С	32.51450	67.5707
		< 250	н/в	С	32.50833	67.5745
		< 250	н/в	С	32.49250	67.5790
Контроль	СЗ-70	< 250	с-в	Е	31.0851	68.2291
		250–300	в.	Е	31.0247	68.2282
		250–300	н/в	Е	31.0307	68.2283
		250–300	в	Е	31.0609	68.2287
		250–300	в	Е	31.0670	68.2287
		250–300	в	Е	31.0730	68.2280
		> 300	с-в	Е	31.0187	68.2282
		> 300	з	Е	31.0368	68.2284
		> 300	з	Е	31.0420	68.2284
	> 300	в	Е	31.0549	68.2289	
	ЮВ-70	> 300	в	С	34.1463	67.7398

Примечание: в – восточная, с – северная, з – западная, н/в – не выражена.

ти, объем выбросов SO_2 сократился более чем в шесть раз и в 2007 г. составил около 35.9 т год^{-1} [5].

Состояние древостоев сосны и ели оценивалось на пробных площадях в сосновых и еловых сообществах, характеризующих зональный тип северо-таежных лесов (*Piceeta fruticuloso-hylocomiosa* и *Pineta fruticuloso-hylocomiosa+Pineta hylocomiosocladinosa*). Наиболее ярко градиент загрязнения выражен в меридиональном направлении в соответствии с розой ветров в регионе. Поэтому пробные площади были заложены на разном расстоянии от источника эмиссий в пределах зон дигрессии с различной степенью нарушенности биоценозов (табл. 1, рис. 1). В качестве контроля исследовались растительные сообщества, располагающиеся вне зоны техногенного воздействия, приблизительно в 70 км к северо-западу (северо-западная граница Лапландского заповедника) и юго-востоку (восточные Хибинины) от комбината. Сравнение показателей радиального прироста сосны и ели осуществлялось при оценке деревьев в сходных экологических условиях на высоте 250–300 м над ур. моря при сопоставимых техногенных нагрузках: Ю11 (сосна) – Ю10 (ель); Ю30 (сосна) – Ю30 (ель); ЮВ70 (сосна) – СЗ-70 (ель).

Отбор проб древесины и методы измерения годовых колец. Для оценки влияния экологической вариабельности на продуктивность древостоя, главным образом рельефа, пробные площади закладывались на ландшафтных профилях на высотах менее 250 м, 250 – 300 м и более 300 м над ур. моря (верхняя граница леса) в пределах каждой зоны дигрессии и в контроле. Исключение составляла ближняя зона максимальной степени нарушенности экосистем, где на высотах более 300 м живых деревьев не осталось. Возраст и радиальный прирост стволов у деревьев диаметром более 10 см определяли по древесным кернам, взятым древесным буром с двух противоположных сторон ствола. Повторность измерений для пробной площади на каждой высоте ландшафтного профиля составляла 15–20 стволов, включая живые и мертвые деревья. На среднем уровне измерено всего 70 стволов елей и 40 – сосны.

Для измерения ширины годичных колец использован полуавтоматический комплекс LINTAB 5 и программный пакет TSAP WIN. Для перекрестной датировки и построения хронологий по индексам прироста по пробным площадям был использован программный пакет TSAP WIN, а также программа ARSTAN, входящая в библиотеку дендрохронологических программ DPL [24].

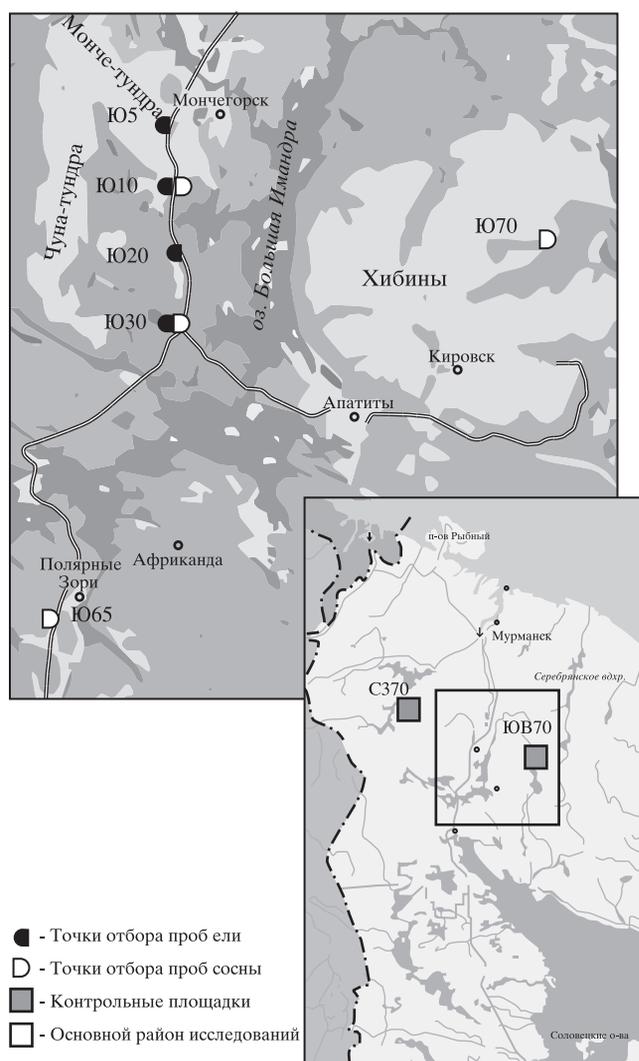


Рис. 1. Картограмма расположения точек исследования и условное зонирование территории.

Для верификации перекрестного датирования – программа COFECNA. С помощью перекрестной датировки с участием региональных хронологий живых деревьев были датированы годы роста и гибели мертвых деревьев, пострадавших в результате атмосферных выбросов. Для этого, в частности, была использована хронология по сосне из района Хибинских гор [22] и хронология по сосне из финской Лапландии [19]. Для удаления возрастных трендов использован метод “региональной кривой” (RCS), метод усреднения индексированных рядов [18], а также метод подбора кубических сплайнов для вычленения низкочастотных составляющих рядов прироста [17].

Химический анализ образцов почв и растений. Для оценки уровня загрязнения применялся стандартный метод атомно-абсорбционной спектроскопии с определением валового содержания

Таблица 2. Изменение концентрации меди и никеля в разных частях деревьев сосны обыкновенной и в почве в окрестностях металлургического комбината “Североникель”, мг кг⁻¹ (по данным 1983, 2008 и 2009 гг.)

Объект	Расстояние до источника выбросов, км				
	5	10	20	30	70 (контроль)
Cu					
Хвоя					
текущего года	31.2	101.3	49.6	17.6	7.4
1-го >>	100.8	294.2	72.8	32.9	7.3
2-го >>	92.0	120.5	48.0	38.2	10.4
Древесина	4.2	5.3	4.1	2.0	1.8
Корни	145.0	79.3	35.8	5.1	2.8
Ni					
Хвоя					
текущего года	188.9	214.0	101.4	20.0	5.8
-го >>	870.3	203.9	139.2	20.6	9.5
-го >>	866.0	250.0	61.2	18.4	11.6
Древесина	5.0	6.2	3.1	1.2	0.4
Корни	235.7	130.1	85.3	15.2	3.1
Cu					
Подстилка (OF)	22857/3383*	673.6/4588*	51.7/1293*	45.5/741*	3.25
Почва (E)	114.0/47.0*	32.5/62.0*	5.3/10.5*	3.1/9.8*	1.47
Ni					
Подстилка (OF)	6220.4/4819*	2068.4/5600*	332.1/1547*	115.4/922*	4.5
Почва (E)	424.5/181*	89.6/136*	14.6/43.0*	3.3/26.0*	0.33

* Данные 2008 и 2009 гг.

металлов (1983 г.) и метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии на TXRF спектрометре PicoTAX (производитель Bruker AXS, Германия). Минимальные пределы обнаружения (LLD) – 5–10 10⁻¹² г л⁻¹ или г кг⁻¹ (2008, 2009 гг.). Количественный анализ образцов растений и почв осуществлялся с использованием внутреннего стандарта (в данном случае – нитрат галлия, Государственный стандартный образец водного раствора, сертификат № 1543, ГДВИ 410408.024ПС, ГСО 7340–96), который вводился в каждый образец.

Климатические характеристики. Использовались синтетический температурный ряд по данным трех метеостанций (“Хибины”, “Апатиты” и “Кола”), покрывающий период 1878–2005 гг., метод вычисления которого подробно описан Кононовым и др. [22]. Средний корреляционный коэффициент среднемесячных температур, по данным этих станций, составлял 0.990 ± 0.005. В качестве независимых переменных были выбраны следующие ряды климатических показателей: среднемесячные температуры и осадки с апреля по август, апреля–мая, мая–июня, июня–июля, июля–августа текущего и прошедшего года, с сентября по ноябрь, сентября–октября, октября–ноября прошедшего года, а также средние летние температуры и осадки текущего и прошедшего

года, средние зимние температуры и осадки (за ноябрь и декабрь предыдущего и с января по март текущего года), среднегодовые температуры и осадки с сентября по декабрь предыдущего года и с января по август текущего года.

Статистический анализ. Применялся совместный анализ графиков хронологий годичного радиального прироста с наложенными на них сглаженными кривыми (кубические сплайны) и множественная пошаговая регрессия [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выбросы металлургического комбината в атмосферу в течение многих десятилетий определили накопление токсических соединений в биотических и абиотических компонентах окружающей среды в окрестностях производства. Результаты анализа разных частей взрослых деревьев сосны обыкновенной, почвы и подстилки в окрестностях ГМК в 1980-е годы отличались почти на два порядка от аналогов, отобранных на незагрязненной территории, и являлись пороговыми для роста растений. Анализ почвенных проб, отобранных в 2008, 2009 гг. на тех же тестовых участках, продемонстрировал так же повышенный уровень многих элементов, особенно содержания соеди-

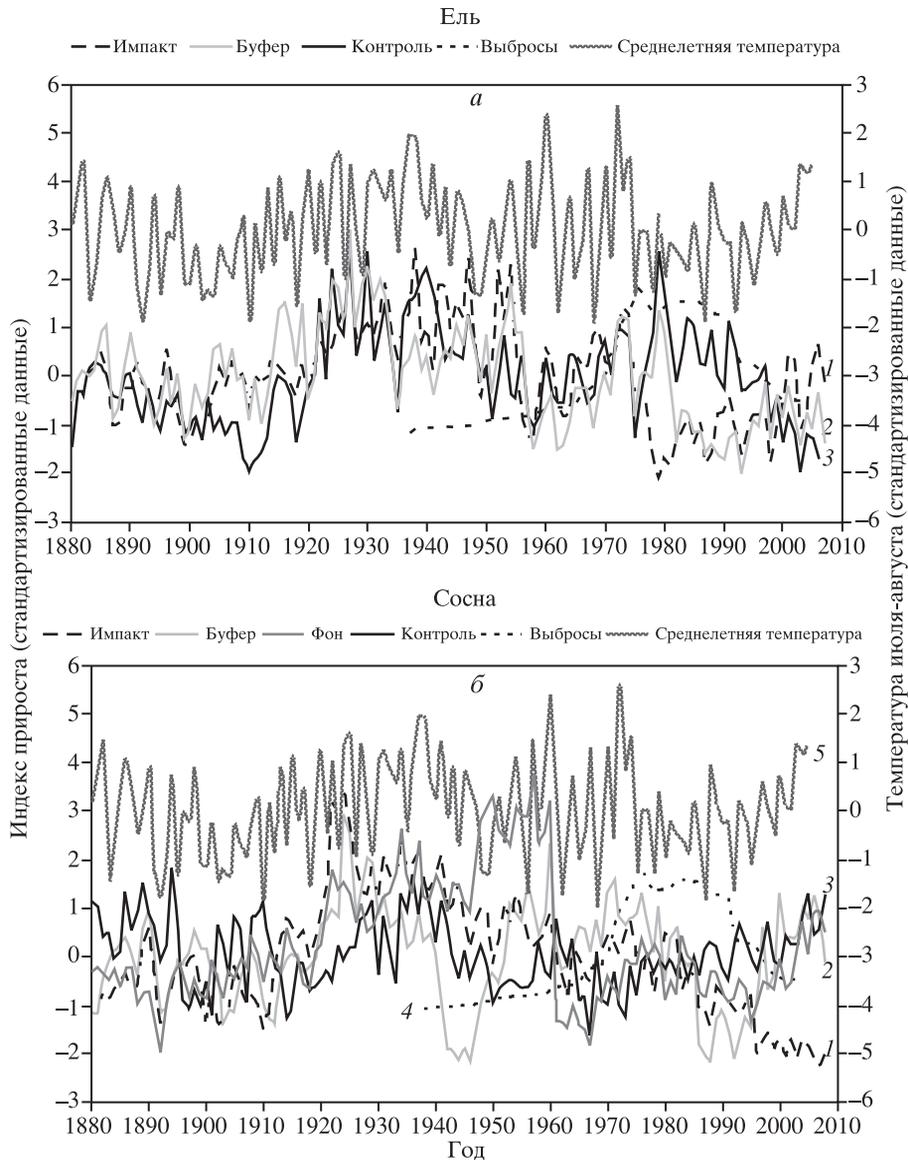


Рис. 2. Изменение величины годичного радиального прироста деревьев в разных зонах загрязнения *а* – ель в импактной (Ю10), буферной (Ю20, Ю30) и контрольной (С370) зонах; *б* – сосна в импактной (Ю11), буферной (Ю30), фоновой (Ю65) и контрольной (ЮВ70) зонах.

нений меди и никеля, превышающее в большинстве случаев уровень загрязнения 1980-х годов (табл. 2). Данный факт подтвердил свойство тяжелых металлов со временем накапливаться в экосистемах и тем самым пролонгировать свое действие на живые организмы даже при снижении или отсутствии дальнейшей техногенной нагрузки.

Анализ дендрохронологических параметров позволил оценить изменения роста деревьев в районе функционирования металлургического производства. На рис. 2, *а*, *б* даны кривые изменения индексов годичных колец для деревьев ели и сосны из разных зон загрязнения. Видно, что до середины 1970-х годов все хронологии деревьев

ели и сосны хорошо синхронизированы между собой, синхронность наблюдается также с кривой среднелетней температуры. Характер дальнейшей асинхронности кривых различен между видами деревьев и между зонами загрязнения. В частности, в 1970-е годы, после резкого увеличения нагрузки, наблюдается резкое падение прироста ели в зоне загрязнения (10 и 20 км), хотя прирост деревьев в контрольной и буферной зонах увеличился. В 1982–1993 гг. в ближних к комбинату импактной и буферной зонах ель росла исключительно медленно из-за увеличивающегося уровня загрязнения как атмосферы, так и почвы, а также низкой температуры – на 0.65 °С ниже средней за

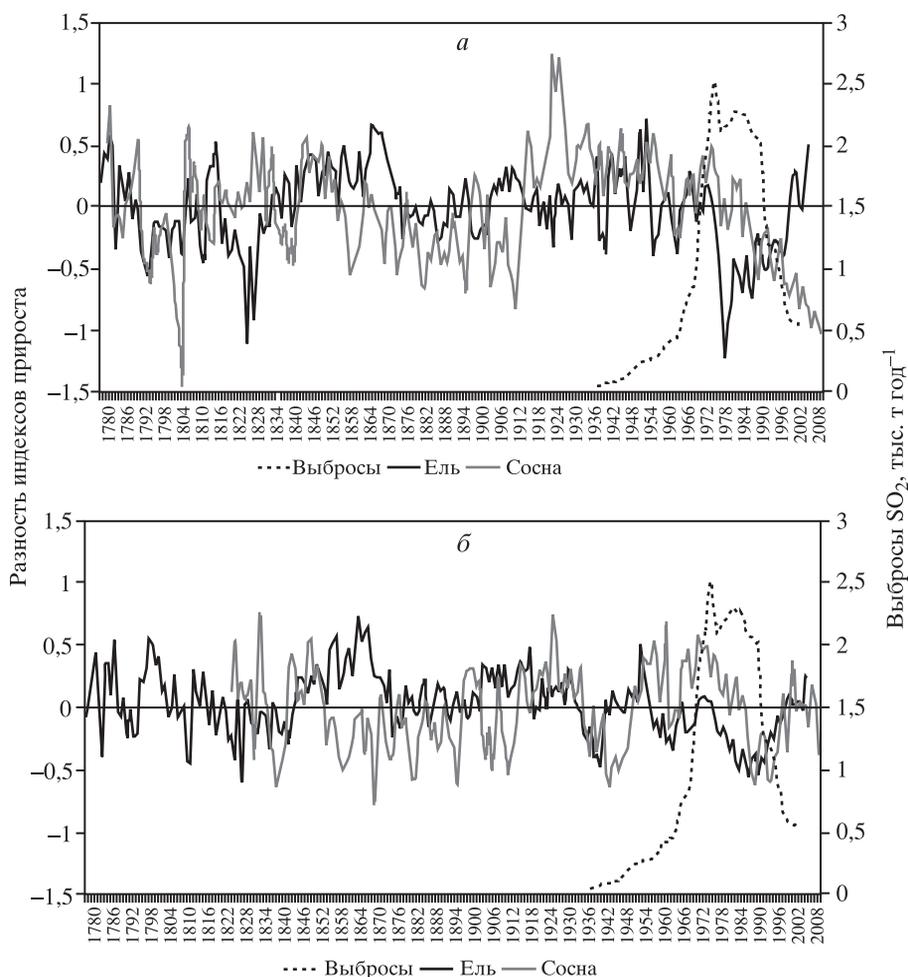


Рис. 3. Разность величины хода роста у сосны и ели из загрязненной и контрольной зон: *а* – импактная и контрольная; *б* – буферная и контрольная.

период 1878–2007 гг. величины, равной 12.8 °С. Многократное снижение аэротехногенной нагрузки в начале 1990-х годов вызвало увеличение радиального прироста елей в радиусе 30 км от металлургического производства.

При анализе хронологий прироста сосны видно, что после 1940 г. отмечено увеличение прироста у деревьев. В 1970-е годы наблюдается некоторое ингибирование роста во всех изученных зонах, что может быть как следствием предыдущего холодного периода, так и действием многократно увеличивающихся эмиссий комбината или же аддитивным влиянием обоих эффектов (рис. 2, б). В импактной зоне (11 км) ингибирование прироста сосны, выраженное прежде всего уменьшением годичных осцилляций по сравнению, например, с контрольной зоной, наблюдается начиная уже с 1930-х годов. До 1980 г. кривая в общем следует температурному ходу, хотя с меньшими, чем на других точках, вариациями. После 1980 г. на 11 и 30 км наблюдается резкое уменьшение при-

роста, которое на 30 км прекращается с 1990 г., а на 11 км продолжается в дальнейшем. В отличие от ели у сосны в импактной зоне в 1990-х годах после снижения уровня выбросов не было увеличения прироста, наоборот, рост продолжал резко падать.

Для установления достоверной динамики роста в результате атмосферного загрязнения построены кривые разности годичного прироста деревьев из местообитаний, подверженных загрязнению, и контроля (рис. 3, а, б). На графике для деревьев ели из импактной зоны видна область различий с отрицательными значениями в период максимальных объемов выбросов (1980-е годы), а также область различий с положительными значениями, демонстрирующая восстановление хода роста после сокращения деятельности комбината. При этом в буферной зоне область как отрицательных, так и положительных различий смещена примерно на 10 лет. Для сосны из импактной зоны, в отличие от ели, отрицательная область различий

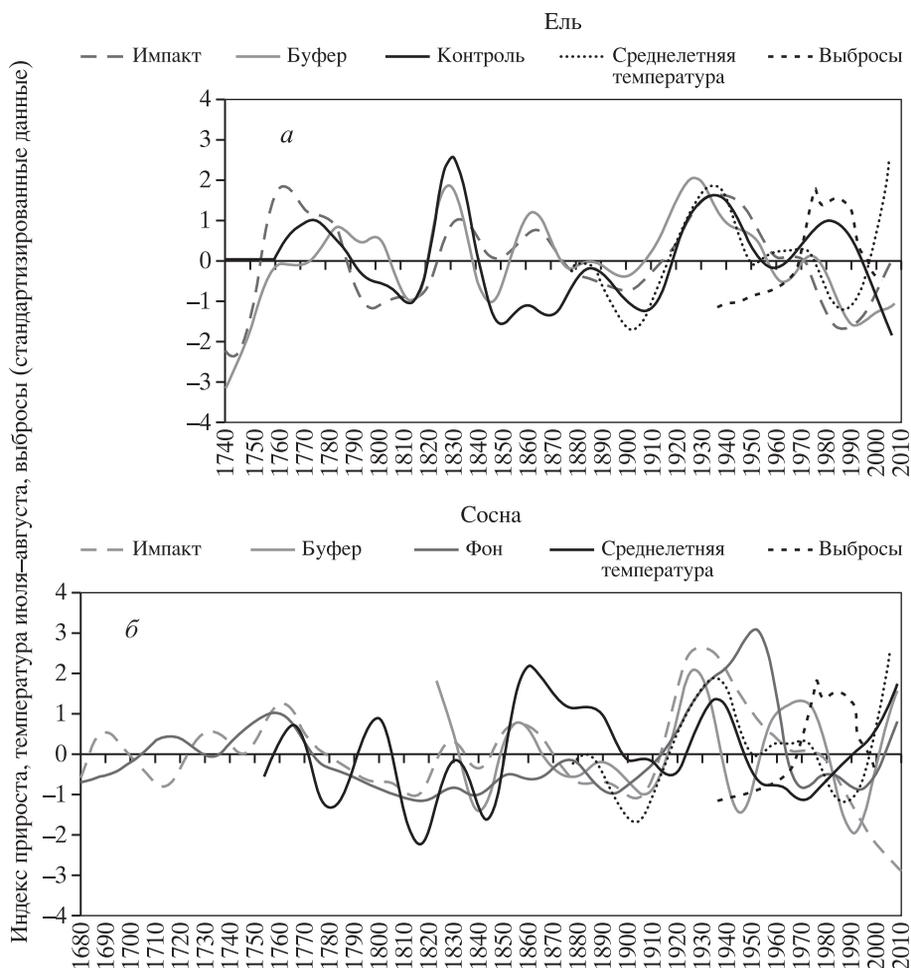


Рис. 4. Изменение усредненных индексов прироста (сглаженные кривые) ели (*a*) и сосны (*б*), среднелетней температуры и объемов выбросов SO_2 в атмосферу (тыс. т год⁻¹) (стандартизированные кривые).

сохраняется для периода снижения объемов выбросов, однако в буферной зоне кривые различий идентичны для обоих видов деревьев и хорошо синхронизированы. Таким образом, сосна в импактной зоне в радиусе 10–20 км от комбината реагировала на техногенную нагрузку, начиная с 1930-х годов, четким уменьшением интенсивности колебаний годичного прироста в целом. Изменение радиального прироста у деревьев сосны в зоне максимального загрязнения происходило более резко по сравнению с елью, а после существенного снижения атмосферных выбросов прирост сосен продолжал уменьшаться, тогда как ель продемонстрировала способность к восстановлению доиндустриальной величины прироста.

При сопоставлении всех хронологий обоих видов деревьев, начиная с середины 18-го в., заметна их относительная синхронность, обусловленная, судя по имеющимся только с 1878 г. климатическим данным, главным образом влиянием среднелетней температуры. Однако, по данным

последних лет, рост ели на контроле асинхронен температурному тренду (средняя температура июля–августа) (рис. 4, *a*, *б*), в то время как радиальный прирост сосны достоверно положительно с ней коррелирует ($R = 0.62$).

Выявление зависимости продуктивности деревьев от климатических показателей разных иерархических уровней осуществлялось на основе регрессионных моделей (множественная пошаговая регрессия). Показано, что длинноволновые колебания (около 50 лет и более) слабее связаны ($R = 0.52$) с температурной динамикой, чем короткие (около 30 лет), о чем свидетельствует достоверное увеличение корреляции с климатом при рассмотрении коротковолновой компоненты ($R = 0.56$). На межгодовом иерархическом уровне получена максимальная зависимость от климатических параметров ($R = 0.60$ – 0.73), причем как до, так и после начала интенсивного влияния комбината. Ослабление связи с климатическими параметрами с уменьшением частоты колебаний

Таблица 3. Величина коэффициента независимых переменных в регрессионных моделях для ели с учетом индустриального периода

Климатические переменные	Без учета индустриального периода (1878–1974 гг.)			Полный ряд (1878–2007 гг.)		
	контроль	буфер	импакт	контроль	буфер	импакт
Температура мая текущего года		–0.17613	–0.16151			
Температура апреля прошлого года					0.222837	
Температура мая прошлого года			–0.31013		–0.23469	–0.30582
Температура июня прошлого года			0.183778			
Температура июля прошлого года	–0.18471					
Температура августа прошлого года		0.162145	0.267987			0.274472
Температура сентября прошлого года	0.183078			0.238746		
Температура среднелетняя прошлого года	0.28197	0.423344	0.425926	0.476888	0.285356	0.312848
Температура среднезимняя (прошлого года)			0.261899			0.168369
Температура среднезимняя прошлого года			0.274455			0.170521
Осадки апреля текущего года				–0.18388		
Осадки июля текущего года						–0.19465
Осадки августа текущего года						0.165131
Осадки апреля прошлого года			–0.15946			
Осадки августа прошлого года			0.182569			
Осадки октября прошлого года			0.213938	0.246207		
Осадки среднезимние (за ноябрь и декабрь предыдущего и с января по март текущего года)	–0.16837	–0.18539			–0.30724	–0.12681
Осадки среднегодовые (с сентября по декабрь предыдущего года и с января по август текущего года)	–0.22565		–0.28984			
<i>R</i> – коэффициент множественной регрессии	0.48	0.52	0.73	0.55	0.51	0.73
<i>F</i> – критерий Фишера	4.64	8.9781	8.2298	6.5869	6.4584	7.9168
Уровень значимости при критерии Фишера	$p < .00037$	$p < .00000$	$p < .00000$	$p < .00004$	$p < .00016$	$p < .00000$

свидетельствует о том, что на более высоких иерархических уровнях колебаний прироста в большей мере проявляются процессы саморазвития экосистемы, хотя нельзя отрицать, что и длинноволновые колебания частично обусловлены также колебаниями температуры: видно, что кривые температуры и прироста в основном синхронны (рис. 2, 4).

При анализе состава климатических переменных, определяющих прирост деревьев, с помощью построенных регрессионных моделей была установлена статистически достоверная связь как с общими климатическими переменными (средняя температура июля–августа, температура октября и ноября, осадки октября), так и со специфичными, определяющими рост деревьев вблизи источника выбросов (табл. 3).

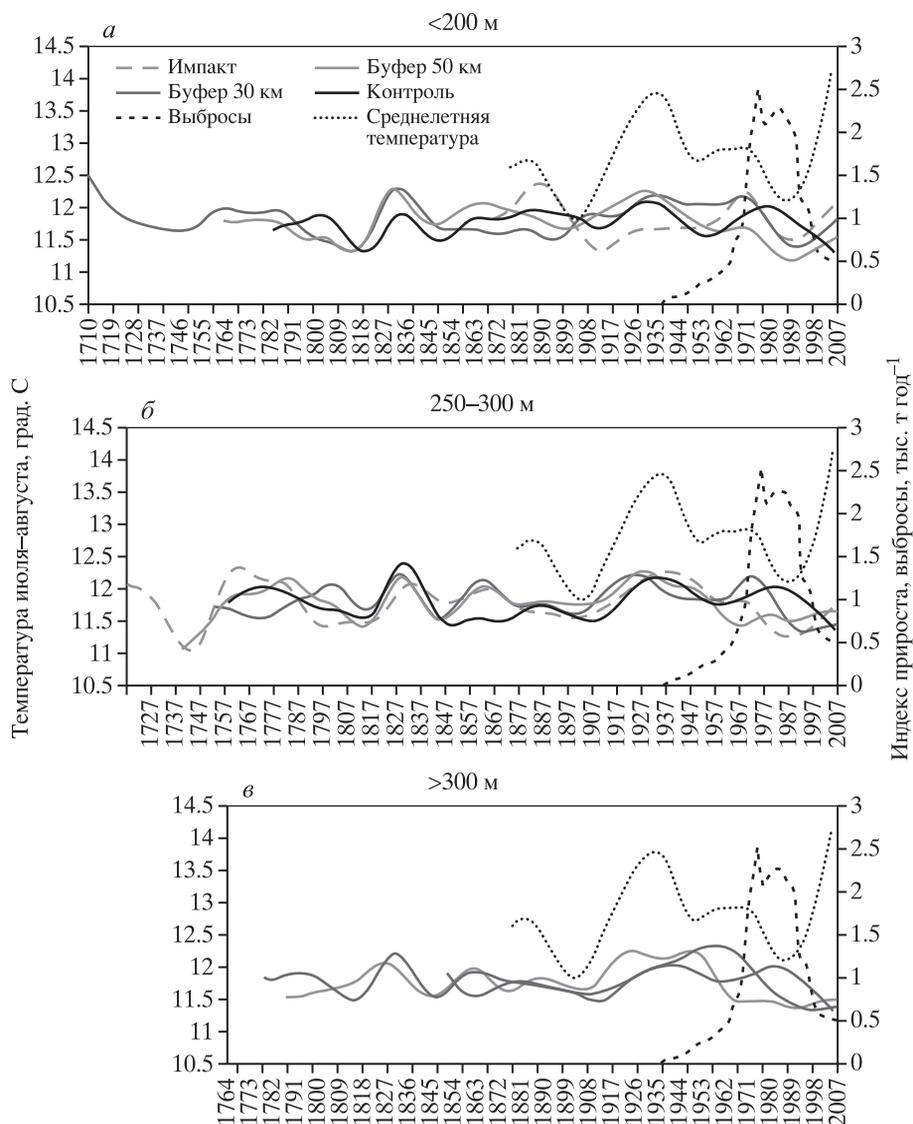


Рис. 5. Изменение величины годичного радиального прироста елей в разных позициях рельефа в импактной (5, 10 км), буферной (20 и 30 км) и контрольной зонах.

a – ниже 250 м; *б* – 250–300 м, *в* – выше 300 м над ур. моря

В частности, средняя летняя температура имела непосредственное достоверное положительное влияние на годичный прирост. Положительное влияние было установлено также для температуры и осадков октября, а отрицательное – для температуры ноября осени прошлого по отношению к приросту года (условия промерзания почвы и образования снежного покрова) и летних осадков, так как это район с переизбыточным увлажнением. Сильное влияние с противоположным знаком оказывает сумма зимних осадков. Важно отметить тот факт, что в импактной зоне (10 км) до деятельности комбината зависимость от климата как для сосны, так и для ели была существенно выше. Это означает, что условия роста деревьев вблизи г. Мончегорска были изначально более экстремальными по

сравнению с другими зонами, видимо, из-за орографических условий, так как зависимость от климата тем больше, чем менее благоприятные условия роста.

Для выявления влияния ландшафтообразующих факторов на динамику прироста были построены хронологии отдельно для деревьев ели, произрастающих в местообитаниях разных высотных уровней: менее 250, 250–300 и выше 300 м над ур. моря, продемонстрировавшие некоторые различия изменения радиального прироста (рис. 5, *a*, *б*, *в*). Отмечена сравнительно меньшая амплитуда колебаний прироста у деревьев, произрастающих выше 300 м над ур. моря. Зато увеличение прироста после 1990-х годов, когда

Таблица 4. Изменение величины коэффициента независимой переменной для сосны с учетом индустриального периода

Климатические переменные	Без учета индустриального периода (1878 – 1974 гг.)			Полный ряд (1878 – 2007 гг.)		
	контроль	буфер	импакт	контроль	буфер	импакт
Температура мая текущего года				0.268601		
Температура июня текущего года						-0.300747
Температура июля текущего года		0.183697	0.156031			
Температура августа текущего года		0.260915				
Температура августа прошлого года			0.248813			
Температура сентября прошлого года			0.237481	0.210090		0.271515
Температура октября прошлого года						
Температура ноября прошлого года			0.204386			
Среднегодовая температура прошлого года	0.172212	0.339942			0.275554	0.598766
Температура среднезимняя прошлого года						0.186827
Температура среднегодовая прошлого года						0.240991
Осадки июля текущего года			-0.343594			
Осадки июня прошлого года			0.155211			
Осадки октября прошлого года	-0.169665			-0.415551		
Осадки среднегодовые прошлого года			0.389523			
Осадки среднезимние (за ноябрь и декабрь предыдущего и с января по март текущего года)			-0.179401			
Осадки среднезимние прошлого года			-0.239698	-0.195473		
R – коэффициент множественной регрессии	0.44	0.45	0.71	0.56	0.38	0.68
F – критерий Фишера	4.1629	4.4024	7.5254	5.3501	4.2538	8.3312
Уровень значимости при критерии Фишера	p < .00088	p < .00054	p < .00000	p < .00014	p < .00795	p < .00000

снизились выбросы комбината, на высотах до 250 м выражено сильнее, чем на более высоких уровнях. Различия в восстановительной динамике деревьев можно объяснить более благоприятными условиями местообитаний на нижнем геоморфологическом уровне: меньшей степени выраженности эрозионных и большей степени аккумулятивных процессов, обуславливающих формирование более мощного органогенного горизонта почв, большую продуктивность и устойчивость экосистем нижних позиций к загрязнению.

Различия в высоте произрастания деревьев на склоне определили также разную зависимость радиального прироста от климата. Оказалось, что она максимальна на среднем высотном уровне 250–300 м (в среднем коэффициент множественной корреляции составил 0.62), причем не только в зоне влияния предприятия, но и в контрольной зоне. Для сравнения на высоте менее 250 м средний коэффициент множественной корреляции – 0.49, а на высотах более 300 м – 0.52. Это можно объяснить, с одной стороны, большим проявлением эндогенных процессов саморазви-

тия экосистемы на нижнем высотном уровне и, с другой стороны, выраженностью экзогенных геоморфологических процессов и ветров на верхнем уровне, которые напрямую не связаны с рассматриваемыми климатическими характеристиками. Однако в буферной зоне на высотах более 300 м климатическая зависимость на низко-, средне- и высокочастотном уровне колебаний также высока (в среднем коэффициент множественной корреляции составил 0.57), как и на среднем высотном уровне, что также свидетельствует о влиянии выбросов предприятия, которое увеличивает чувствительность деревьев, находящихся в условиях антропогенного стресса. В радиусе 10 км на высотах менее 250 м климатическая зависимость прироста минимальна на всех иерархических уровнях колебаний (коэффициент множественной корреляции в среднем 0.39). Это может быть следствием ослабления пессимальности условий местообитаний в нижних позициях склона, повысившее устойчивость елей к влиянию климатических параметров.

Специфичным для деревьев в радиусе 30 км на среднем и нижнем высотном уровне является отрицательное влияние среднезимних осадков из-за длительного таяния и переувлажнения почв и, следовательно, задержки вегетации, что не проявляется на верхней границе леса (более 300 м) из-за сдувания снежного покрова, и температуры мая, так как слишком ранний сход снежного покрова приводит к промерзанию почвы во время возвращения холодов, когда у деревьев уже начались процессы пробуждения при отсутствии защищающей от промерзания торфяной подстилки в зоне влияния комбината.

Заключение. Анализ факторов, одновременно влияющих на продуктивность древостоев, выявил, что наряду с климатической составляющей, лимитирующей распространение лесных сообществ на север, в исследуемом регионе велика сила воздействия техногенного фактора. Прослежена достоверная связь прироста деревьев с объемами поступающих в атмосферу выбросами предприятия, при этом связь носила нелинейный характер и зависела от степени техногенной нагрузки на деревья разной удаленности от комбината, от видовой принадлежности деревьев и местоположения на склонах возвышенностей. В частности, выявлены различия в реакции сосны и ели на техногенный стресс. Несмотря на существенное снижение выбросов в последние годы, величина радиального прироста деревьев в зоне загрязнения продолжает оставаться существенно меньше контрольных и фоновых величин. Основной причиной являются высокое содержание тя-

желых металлов в органогенном горизонте почвы и сохраняющиеся атмосферные выпадения.

При сопоставлении всех хронологий обоих видов деревьев, начиная с середины 18-го в., заметна их хорошая синхронность, обусловленная, согласно имеющимся климатическим данным с 1878 г., главным образом влиянием среднейлетней температуры. При этом для ели фактор тепла в данном регионе оказался более значимым по сравнению с фактором количества осадков, согласно закону лимитирующих факторов Либиха, так как показатель суммы положительных температур здесь находится в минимуме. Различия в высоте произрастания деревьев на склоне определили разную зависимость радиального прироста от климата. Оказалось, что она максимальна на среднем высотном уровне (250 – 300 м), причем не только в зоне влияния предприятия, но и в контрольной зоне. Влияние комбината на динамику прироста ели на нижнем геоморфологическом уровне также проявляется в гораздо меньшей степени, чем на средних и верхних уровнях.

Выявлена различная зависимость колебаний прироста разных иерархических уровней (длинноволновых – 50 лет, средневолновых – 30 лет и коротковолновых – межгодовых) от климатических показателей. На межгодовом иерархическом уровне получена максимальная зависимость от климатических параметров, причем как до, так и после начала интенсивного влияния комбината. Ослабление связи с климатическими параметрами с уменьшением частоты колебаний свидетельствует о том, что на более высоких иерархических уровнях колебаний прироста в большей мере проявляются процессы саморазвития экосистемы.

Попытка учесть и разграничить влияние нескольких факторов на рост деревьев при всей сложности существующей задачи показала принципиальную ее возможность. В итоге удалось выявить различную значимость ряда условий среды при формировании продукционных процессов хвойных насаждений, без учета которых полученные данные могли бы быть неправильно интерпретированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А.С.* Колебания радиального прироста в древостоях при атмосферном загрязнении // *Лесоведение*. 1990. № 2. С. 82–86.
2. *Битвинская Т.Т.* Денроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с.

3. Ваганов Е.А. Регистрация потепления в текущем столетии клетками годичных колец деревьев // ДАН. 1996. Т. 351. № 2. С. 281–283.
4. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Дендроклиматические и дендроэкологические исследования в Северной Евразии // Лесоведение. 2005. № 4. С. 18–27.
5. Данные Кольской ГМК (<http://www.kolagmk.ru/rus/ecology/>).
6. Мусаев Е.К. Сезонный рост и структура годичных колец сосны после Чернобыля // Лесоведение. 1996. № 1. С.16–28 .
7. Справочник по климату СССР. Вып. 2. Мурманская область. Л.: Гидрометеиздат, 1965, 1966, 1968.
8. Цветков В.Ф., Цветков И.В. Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск: Арханг. Центр РГО. 2003. 354 с.
9. Черненькова Т.В., Басова Е.В., Бочкарев Ю.Н., Пузаченко М.Ю. Оценка биоразнообразия лесов в зоне влияния горно-металлургического комбината “Североникель” // Лесоведение. 2009. № 6. С. 38–45.
10. Черненькова Т.В., Макаров А.В. Рост сосны обыкновенной в окрестностях металлургического комбината “Североникель” // Лесоведение. 1996. № 5. С. 72–76.
11. Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
12. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Красноярск: Изд. центр Красноярского гос. ун-та, 2000. 80 с.
13. Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение. СПб.: Изд-во НИИ химии СПб. ун-та, 1997. 208 с.
14. Электронный учебник по статистике. М.: StatSoft, Inc., 2001. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.
15. Bakkal I.J. The effect of fire and air pollution on the field layer in pine forests in the Kola peninsula // Aerial pollution in Kola Peninsula. Proc. Int. Workshop, April 14–16, 1992, St.Petersburg. Apatity, 1993. P. 299–307.
16. Boettger T., Friedrich M. A new serial pooling method of shifted tree ring blocks to construct millennia long tree ring isotope chronologies with annual resolution // Isotopes in Environmental and Health Studies. 2009. V. 45. № 1. P. 68–80.
17. Cook E.R. A time series analysis approach to tree-ring standardization: Ph.D. Dissertation. Tucson, AZ: Arisona Univ. Press 1985. 171 p.
18. Cook E.R., Briffa K.R., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Tree-ring standardization and growth-trend estimation // Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences / Eds. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht. Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1990. P. 104–123.
19. Eronen M., Zetterberg P., Briffa K.R., Lindholm M., Merilainen J., Timonen M. The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland. Pt 1. Chronology Construction and Initial Influences. The Holocene. 2002. V. 12. № 6. P. 673–680.
20. Fedorkov A. Effect of heavy metal pollution of forest soil on radial growth of Scots pine // Forest Pathology. 2007. V. 37. № 2. P. 136–142.
21. Fritts H.C. Tree-Rings and Climate. London; New York; San Francisco: Acad. Press, 1976. 567 p.
22. Kononov Yu. M., Friedrich M., Boettger T. Regional summer temperature reconstruction in the Khibiny Low Mountains (Kola Peninsula, NW Russia) by means of tree-ring width during the last four centuries // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2009. V. 41. № 4. P. 460–468.
23. Savva Y., Berninger F. Sulphur deposition causes a large-scale growth decline in boreal forests in Eurasia // Global Biogeochem. Cycles, 2010. V. 24, 14 p. GB3002, doi:10.1029/2009GB003749.
24. The Laboratory of Tree-Ring Research. Software & Data, 2005 // <http://www.ltrr.arizona.edu/software.html>
25. Valkama J., Kozlov M.V. Impact of climatic factors on the developmental stability of mountain birch growing in a contaminated area // J. Appl. Ecol. 2001. V. 38. № 3. P. 665–673.

The Influence of Natural-Anthropogenic Factors on Radial Increment of Trees on Kola Peninsula

T. V. Chernenkova, Yu. N. Bochkarev, M. Fridrich, T. Boettger

The dynamics of the radial increment of pine (*Pinus sylvestris* L.) and pine (*Picea obovata* Ledeb.) trees at the northern limit of their distribution was studied on Kola Peninsula. The relation between the radial tree increment and a set of environmental factors, and the contribution of individual environmental factors were revealed. Statistically significant dependences of the tree productivity on the pollution level, relief and climatic conditions were found, as well as the significant relationship between the tree increment and industrial waste volumes. The effect of technogenic loads on trees is related to the their species and position of trees on the upland slopes. The different relations of fluctuations in the tree increment of different frequency levels (longwave – 50 years, midwave – 30 years, and shortwave – interannual) with climatic characteristics were found.