

УДК 551.590.2

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПЕРИОДИЧНОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ХВОЙНЫХ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

© 2013 г. О.М. Распопов¹, Е.В. Лопатин², Т. Колстрём³, В.А. Дергачев⁴,
П.Б. Дмитриев⁴, Х.-П. Кале⁵, Х. Спикер⁵

¹ Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

² Университет Восточной Финляндии, г. Йоэнсуу, Финляндия

³ Финский научно-исследовательский институт леса, г. Ванта, Финляндия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁵ Фрайбургский университет им. Альберта-Людвига, Институт роста леса,
г. Фрайбург, Германия

С целью выяснения природы климатических факторов, влияющих на радиальный прирост хвойных пород деревьев на территории Республики Коми, был проведен спектральный анализ дендрорядов ели (*Picea obovata*) и сосны (*Pinus sylvestris* L.) для лесотундры, северной, средней и южной тайги. В результате выявилось существование нескольких групп периодичностей в радиальном приросте деревьев, одни из которых обусловлены внутренними процессами в системе атмосфера–океан, а другие – солнечной активностью.

Ключевые слова: кольца деревьев, дендрохронология, климатические изменения, хвойные бореальные леса, Республика Коми.

Введение

Республика Коми, расположенная на северо-востоке Европейской части России в предгории Уральских гор, является идеальным районом для исследования воздействия на климатические параметры различных физических факторов, имеющих как глобальное происхождение, так и связанных с внутренними процессами в системе атмосфера–океан. Ее северная часть находится на широте 67° N, т.е. вблизи зоны полярных сияний и интенсивных вторжений в атмосферу космических лучей, а общее расположение территории на стыке Северо-Атлантического и Арктического регионов определяет воздействие североатлантических (САО) и арктических (АО) осцилляций климата [Mielikainen, Sennov, 1996; Overpeck et al., 1997; Полонский, Семилетова, 2002; Мохов и др., 2006, 2008; Безуглова, Зинченко, 2009]. На изменчивость климата в регионе может

оказывать воздействие и изменчивость площади ледового покрова в Арктике [Proshutinssky, Johnson, 1997; Goosse et al., 2002; Petoukhov, Semenov, 2010].

Территория Республики Коми имеет большую (около 700 км) меридиональную протяженность, простираясь от зоны тундры до южной тайги. Поэтому изменение климатических параметров может иметь здесь региональную структуру. Следует также учитывать влияние Уральских гор на атмосферную циркуляцию.

В задачу настоящей работы входило выявление физических факторов как глобального, так и внутриагосферного происхождения, оказывающих воздействие на формирование климатической изменчивости в северо-восточном секторе Европейской части России с целью его климатического районирования. В качестве объекта информации о климатической изменчивости использованы биологические данные о радиальном приросте хвойных пород деревьев (сосна, ель) из нескольких районов Республики Коми [Lopatin, 2007; Raspopov et al., 2007; Lopatin et al., 2008; Соломина и др., 2009].

Метод анализа климатической изменчивости основывался на том, что различные климатические периодичности можно отождествить либо с различными внутренними процессами в системе атмосфера–океан, либо с внешним воздействием, связанным с периодичностью солнечной активности.

Район работ, материалы и методы исследований

Общая характеристика района работ.

Места отбора дендроданных и методика их первичной обработки

Республика Коми – лесной регион в северо-восточной области Европейской части России, где сохранились не подвергавшиеся до настоящего времени заметному антропогенному и техногенному воздействию лесные массивы [Lopatin et al., 2006, 2007, 2008; Lopatin, 2007]. Среднегодовая температура варьирует от +1 °С в южной части до –6 °С в северной части, при этом вегетационный сезон (дни со средней температурой около +10 °С и более) длится от 10 до 45 дней. Среднегодовое количество осадков изменяется от 700 мм на юге до 450 мм на севере региона.

В качестве исходных данных для выявления и анализа периодичностей были использованы ряды радиального прироста хвойных пород деревьев из следующих природных зон и подзон: лесотундры, северной, средней (две площадки) и южной тайги. Дендроданные собирались для двух пород хвойных деревьев: ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). На рис. 1 показано расположение природных зон на территории Республики Коми согласно Г.М. Козубову и С.В. Дегтевой [1999].

Сбор образцов дендроданных проводился в 2003–2004 гг. Выбор мест для отбора базировался на использовании данных наземного картирования лесов и показаний спутника TERRA ASTER, проводившего съемку территории кадрами размером 60×60 км с пространственным разрешением в 15 м. Учитывалось в первую очередь отсутствие в этом месте рубок, пожаров или другого какого-либо антропогенного или техногенного воздействия. Кроме того, отбирались площадки с примерно аналогичными природными условиями (топография, окружающая растительность, почвы, доминирование хвойных деревьев). При выборе площадок принималось во внимание наличие разновозрастных деревьев и отсутствие угнетения молодых деревьев доминирующими экземплярами. Этот фактор имеет существенное значение для изучения именно климатического воздействия на радиальный прирост деревьев.

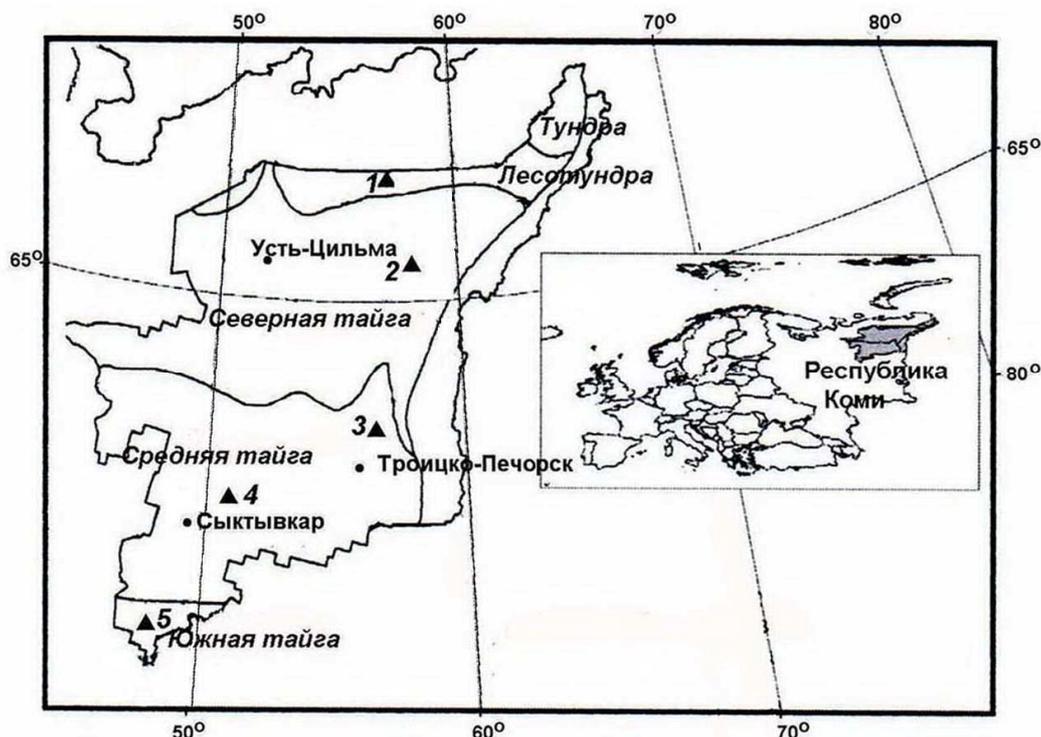


Рис. 1. Природно-географическое районирование территории Республики Коми (по [Козубов, Дегтева, 1999]) и местоположение площадок сбора образцов древесины (треугольники – 1–5)

На врезке – географическое положение Республики Коми (заливка)

Таблица 1. Основные характеристики базы дендрохронологических данных и выявленные квазипериоды в обобщенных древесно-кольцевых хронологиях на территории Республики Коми

Природная зона/подзона, номер площадки, см. рис. 1	Вид дерева, длительность хронологии	Тип данных	Квазипериоды, годы										
			30	23	20	15	13	7	7	5			
Лесотундра, пл. 1 (66°41' с.ш., 56°49' в.д.)	Ель (12)*, 1812–2003 гг.	ОР**											
		ДР***	28	22	19		14		7				
Северная тайга, пл. 2 (65°59' с.ш., 57°48' в.д.)	Ель (14), 1878–2003 гг.	ОР				16		11	7				
		ДР				15							
	Сосна (14), 1924–2003 гг.	ОР				17		7	5				
		ДР					13						
Средняя тайга, пл. 4 (61°44' с.ш., 50°34' в.д.)	Ель (40), 1878–2003 гг.	ОР	30	21		15		10	7				
		ДР	26, 31	22		17	13						
	Сосна (45), 1924–2003 гг.	ОР	31	21			14	11		6			
		ДР	32	25		17	13	10	8				
Средняя тайга, пл. 3 (63°25' с.ш., 57°57' в.д.)	Ель (51), 1826–2004 гг.	ОР	29	22			13		7	5			
		ДР	31	24	19	16		12					
	Сосна (5), 1842–2004 гг.	ОР	31	22		16		11					
		ДР	32	23		18		10					
Южная тайга, пл. 5 (60°33' с.ш., 49°26' в.д.)	Ель (9), 1917–2003 гг.	ОР			19		14	11	9	6			
		ДР					11	9					
	Сосна (21), 1877–2003 гг.	ОР				18		10		6			
		ДР				17		12	8	5			

* Число обследованных деревьев.

** Обобщенные ряды.

*** Наиболее длинные ряды.

Вариации радиального прироста деревьев изучали по буровым образцам, которые сразу после взятия визуально анализировались с целью исключения поврежденной гнилью древесины. Кernels отбирались на высоте 1.3 м от поверхности земли. По возможности делались и поперечные спилов деревьев. Если сбор спилов вызывал затруднения, то взятие кернов проводилось возрастным буровом в двух взаимно перпендикулярных направлениях, одно из которых было направлено на север. Радиальный прирост деревьев измерялся с точностью до 0.01 мм. Кросс-корреляция между результатами измерений ширины колец деревьев осуществлялась с помощью программы COFESHA [Crissino-Mayer et al., 1997]. В дальнейшем для обработки серий была использована программа ARSTAN [Holmes, 1999]. Построенные обобщенные хронологии, содержащие вариации ширины колец деревьев для каждого места сбора образцов и каждого вида деревьев (ели и сосны), были использованы для спектрального анализа радиального прироста деревьев с целью выявления периодичности.

Общая база имеющихся дендрохронологических данных и ее основные характеристики приведены в табл. 1.

База метеорологических данных

Для сопоставления периодичностей радиального прироста деревьев в различных подзонах тайги с климатическими периодичностями и последующего анализа была использована база метеорологических данных (средние ежегодные температуры и количество осадков) (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики метеостанций, данные которых использованы при исследованиях

Название	Местоположение		Временной интервал данных, годы
	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	
Сыктывкар	61.7	50.9	1888–1995
Троицко-Печорск	62.7	56.2	1888–1995
Койнас	64.8	47.7	1912–1995
Печора	65.1	57.1	1943–1995
Усть-Цильма	65.5	52.2	1895–1995
Мурманск	69.0	33.1	1936–1995

Кроме того, в эту базу была включена объединенная в один ряд средняя ежегодная температура, измеренная на метеостанциях Кола и Мурманска за 1878–1999 гг.

Метеорологические данные были предоставлены Центром по метеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Коми, а также взяты из литературных источников [Razuvaev et al., 1995].

В работе также были проанализированы:

– осредненные по всей арктической зоне вариации температуры и атмосферного давления на уровне моря (данные с 1875 по 1999 г.);

– вариации площади льда Баренцева моря (данные с 1900 по 2005 г.).

Эти данные были получены от сотрудника Арктического и Антарктического научно-исследовательского института Г.В. Алексева.

Все перечисленные данные были подвергнуты спектральному анализу по той же методике, которая использовалась для построения спектров вариаций радиального прироста деревьев.

Методика выделения периодичностей в дендрохронологических и гидроклиматических данных

Для детального изучения временной структуры указанных выше рядов был применен модифицированный метод спектрального анализа [Дмитриев и др., 2006]. Модификация заключалась в следующем.

Выборочная оценка нормированной спектральной плотности [Дженкинс, Ватт, 1972] для исходных временных рядов вычислялась в зависимости не от частоты, а от пробного периода, что обуславливалось постановкой задачи о выявлении скрытой периодичности в исходных данных [Серебрянников, Первозванский, 1965]. В основе лежало предположение, что исходный временной ряд состоит из двух составляющих: полигармонической – с конечным числом гармоник, имеющих различные амплитуды и периоды, и «помех»; причем к последним относят как случайный, так и любой другой детерминированный, но не содержащий гармоник первой полигармонической составляющей сигнал. Поиск числа и значений периодов гармоник полигармонической части исходного сигнала проводился при помощи так называемого пробного периода, значения которого перебирались из диапазона возможных значений, заданного физическими условиями изучаемого явления.

Кроме того, исходные временные ряды предварительно подвергались высокочастотной фильтрации [Alavi, Jenkins, 1965] с наперед заданной частотой «среза» фильтра на половине мощности сигнала, которой во временной области соответствует величина «разделительного» периода T_{ϕ} . Фильтрация исходных данных осуществлялась с целью устранения тренда и более мощных низкочастотных компонентов. Серия значений параметра T_{ϕ} выбирается довольно произвольно, обычно из физических условий рассматриваемой задачи: характерных особенностей временной структуры обрабатываемых данных и гипотетического предположения о возможности существования в них тех или иных групп периодических компонентов.

Затем для каждого отфильтрованного с конкретным значением параметра T_{ϕ} высокочастотного компонента снова вычислялась оценка нормированной спектральной плотности от периода. И, наконец, все эти оценки, вычисленные для различных значений параметра T_{ϕ} , накладывались друг на друга на одном поле графика, образуя *комбинированную спектральную периодограмму* (КСП).

Такая модификация общепринятого метода спектрального анализа позволяет:

1) исследовать стабильность положения выявленного периода на периодограмме. То есть модификация дает независимость обнаруженного значения скрытой периодичности от параметров исходного временного ряда, которые могут влиять на результат применяемого математического метода обработки, в частности от его длины, так как длина отфильтрованного компонента меньше длины исходного ряда;

2) обнаруживать в исходном сигнале более короткие периоды с малыми значениями амплитуд. Это происходит за счет устранения из исходного сигнала тренда и более мощных долгопериодических составляющих, которые дают основной вклад в дисперсию сигнала. Таким образом, в дисперсию отфильтрованной высокочастотной составляющей сигнала вносят вклад только слабые короткопериодические компоненты, а за счет нормировки спектральной мощности вклад этих компонентов в комбинированную периодограмму становится соизмеримым со вкладом от более длительных и мощных составляющих сигнала.

Поиск числа и значений периодов гармоник полигармонической части исходного сигнала организовывается при помощи так называемого пробного периода, значения которого перебираются из диапазона возможных значений, заданного физическими условиями изучаемого явления.

В этом случае точность расположения на периодограмме пиков (точность выявления скрытых периодичностей) определяется селективностью метода (интегральным преобразованием Фурье, а точнее, его дискретным аналогом) и величиной шага, заданного на периодограмме по оси пробных периодов. Для КСП это: $\Delta T \approx 2 \cdot T^2 / N$ [Серебренников, Первозванский, 1965], где ΔT – величина шага периодограммы для текущего значения пробного периода T и длины N исходного ряда.

Отсюда следует, что согласно селективным свойствам дискретного преобразования Фурье, сетка, заданная для пробных периодов, должна быть неравномерной, так как величина шага периодограммы ΔT зависит пропорционально от квадрата значения текущего пробного периода, что не очень удобно для организации алгоритма вычислений и графической интерпретации их результатов. Поэтому при вычислении значений КСП, как и в работе [Серебренников, Первозванский, 1965], используется равномерный шаг по пробным периодам. Однако в этом случае в области малых периодов разрешение периодограммы меньше, чем в области ее больших значений. Поэтому пики на КСП выглядят для малых значений пробных периодов уже, чем для больших значений. Возникает ситуация, когда шаг между соседними пробными периодами в области малых периодов больше, чем полоса пропускания по частоте, что приводит к неточному определению гармоник из этой области.

Так, например, при длине приведенного на рис. 2, б исходного временного ряда N , равной 192 точкам (или $192\Delta_t$ годам, где Δ_t – величина временного шага исходного ряда, равная одному году), и шаге по пробному периоду ΔT , равному той же величине Δ_t , разрешение на КСП до значения пробных периодов $\approx 10\Delta_t$ лет будет недостаточным, а после него – избыточным. В случае временных рядов, приведенных на рис. 3–6, где их длина более короткая (в среднем чуть более $100\Delta_t$ лет – от 106 до 125 точек), это значение составит $\approx 8\Delta_t$ лет.

Исходные временные ряды, рассматриваемые в настоящей работе, имеют временное разрешение в один год, и поэтому организация поиска периодов гармонических компонентов в них была осуществлена с этим же временным разрешением.

Результаты исследований

Спектральный анализ дендрохронологических данных

Как уже указывалось, спектральному анализу были подвергнуты данные радиального прироста сосны и ели из трех подзон тайги и лесотундры, полученные как для конкретного вида дерева в пределах ландшафтной зоны или выделенной на ней площадки, так и для наиболее продолжительных по возрасту индивидуальных дендрорядов в каждой ландшафтной подзоне.

В каждой ландшафтной подзоне выявились группы периодичностей в радиальном приросте деревьев, некоторые из которых характерны почти для всех подзон (например, период 16–18 лет), а другие выявляются лишь в отдельных подзонах. Результаты анализа обобщенных рядов и наиболее продолжительных по возрасту индивидуальных рядов показали сходную картину наличия периодичностей.

На рис. 2 в качестве примера приведены данные спектрального анализа радиального прироста ели для зоны лесотундры. Что касается всех ландшафтных подзон, то радиальный прирост деревьев характеризуется периодичностями 5–9, 10–12, 13–14, 15–19, 21–24 и 26–32 года (см. табл. 1).

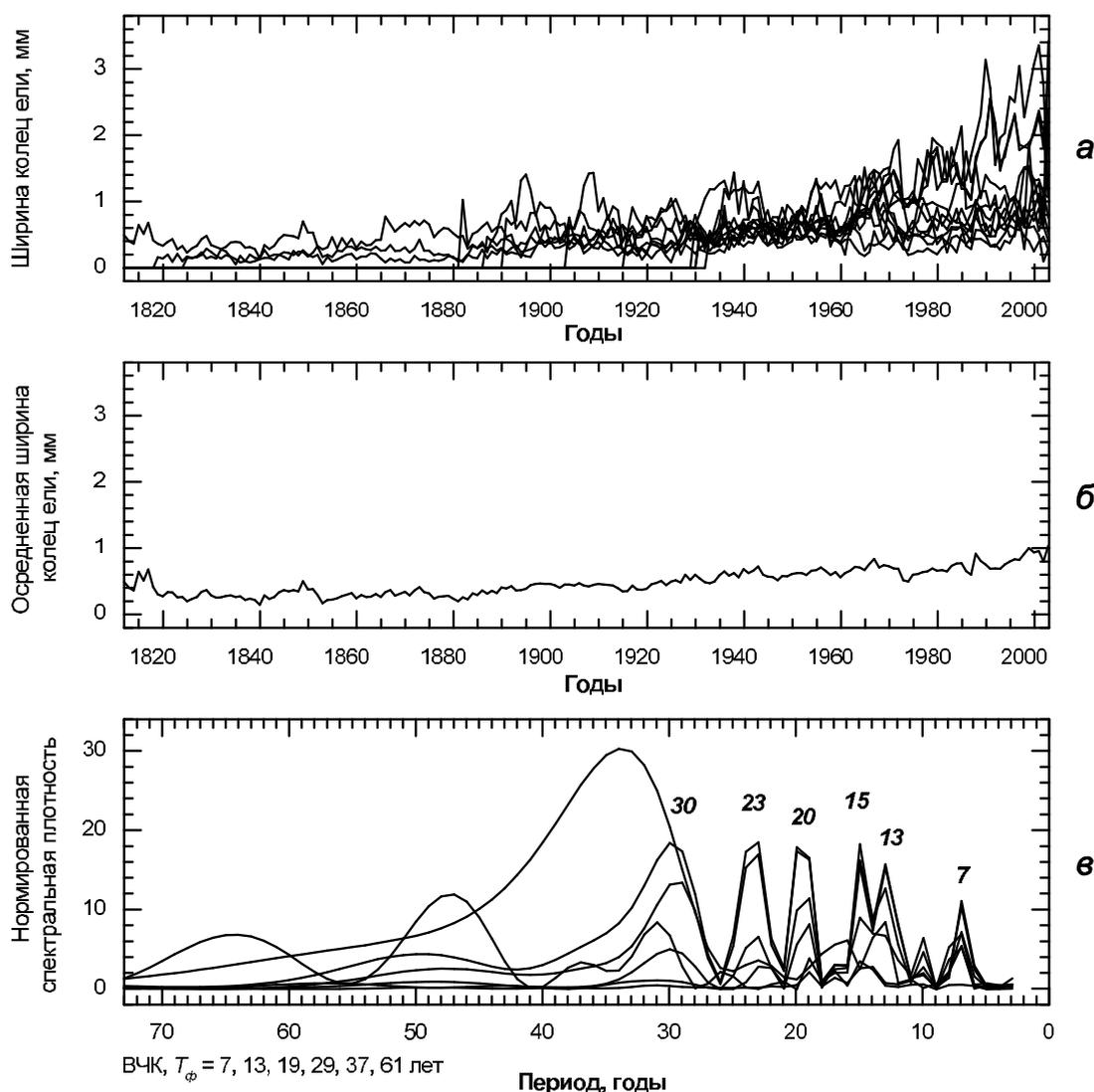


Рис. 2. Вариации ширины колец ели для зоны лесотундры (*а*, *б*) и результаты спектрального анализа их осредненного ряда (*в*)

а – исходные значения; *б* – осредненные данные

При отдельном анализе периодичностей ели и сосны, например на основе обобщенных хронологий (см. ОР в табл. 1), какие-либо существенные различия в их циклической изменчивости не выявляются, за исключением отдельных случаев. Например, для южной тайги в спектре ели присутствует 14-летняя периодичность, а у сосны она отсутствует. В северной тайге, в свою очередь, у сосны выявляется 13-летняя периодичность, а у ели – 16-летняя. Для более строгого анализа различий в циклическом отклике радиального прироста деревьев на климатические вариации необходимо иметь данные более плотной сети метеостанций.

Гидрологические и климатические данные

Как и дендрохронологические ряды, спектральному анализу подверглись гидрологические и климатические данные. Выявилось присутствие в них периодичностей, аналогичных периодичностям в радиальном приросте деревьев. Однако эти периодичности в различных гидрологических и климатических параметрах (температура, осадки, барическое давление, площадь льда в арктических морях) проявляются различным образом и, кроме того, имеют региональные особенности.

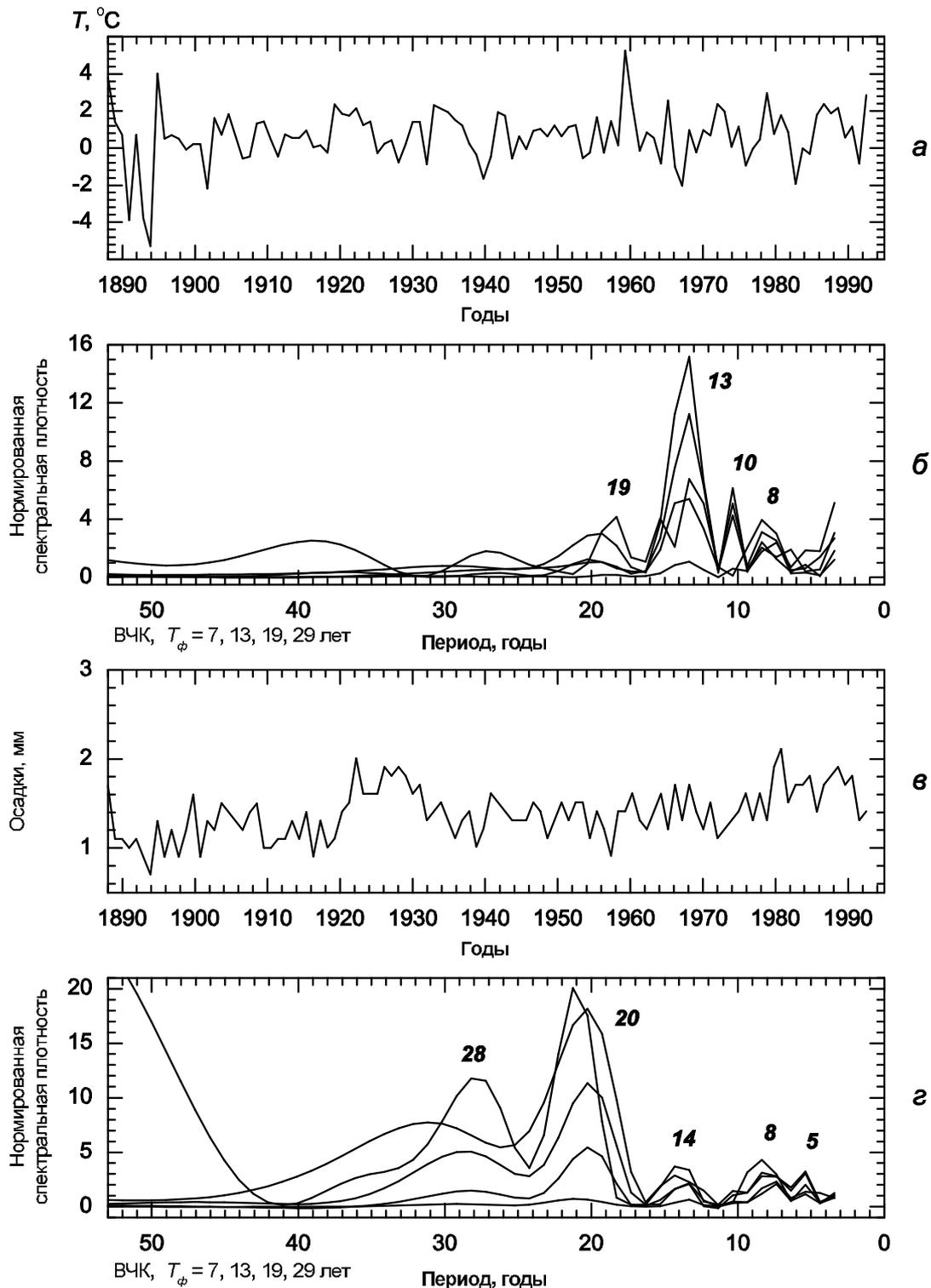


Рис. 3. Среднегодовые значения температуры воздуха (а) и значения средних за день осадков (в) в г. Сыктывкаре с 1888 по 1995 г. и результаты их спектрального анализа (б и г соответственно)

На рис. 3 приведены результаты спектрального анализа вариаций температуры и осадков в г. Сыктывкаре, расположенном в подзоне средней тайги, на рис. 4 – температурных вариаций на Кольском п-ве, на рис. 5 – вариаций площади льда в Баренцевом море, на рис. 6 – вариаций температуры и атмосферного давления в арктической зоне.

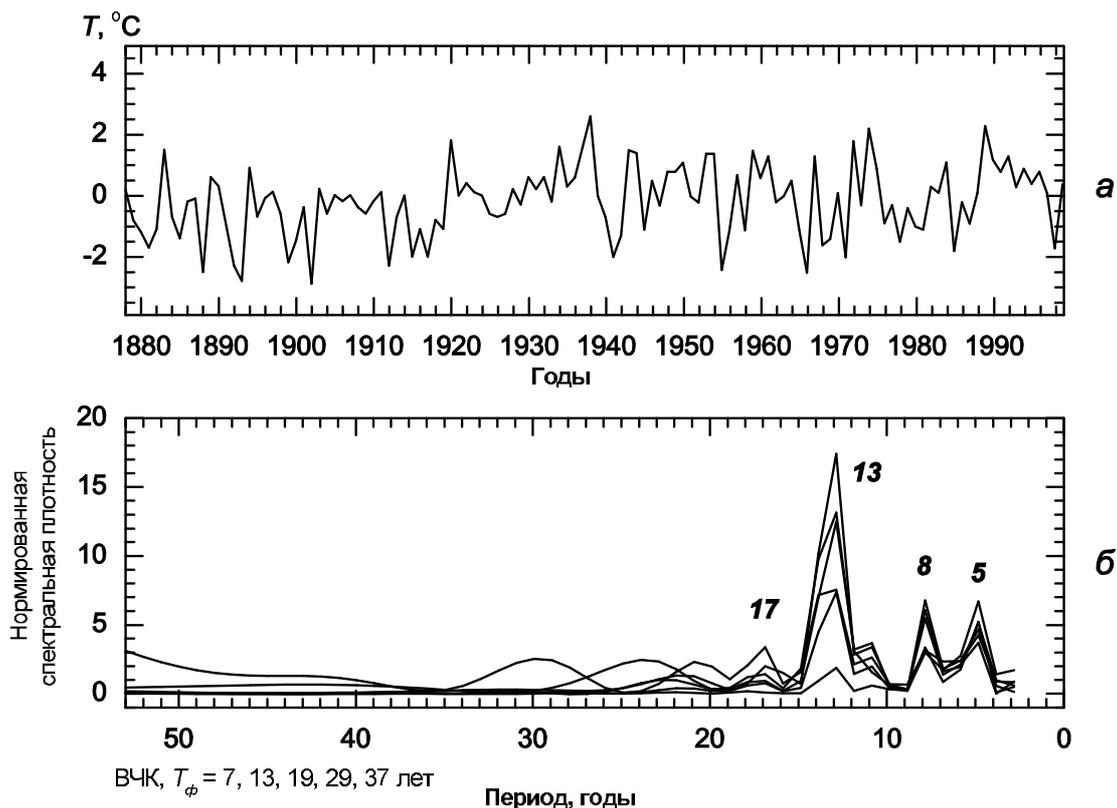


Рис. 4. Среднегодовые значения температуры воздуха на Кольском п-ове с 1879 по 1999 г. по данным метеостанции Мурманск–Кола (а) и результаты их спектрального анализа (б)

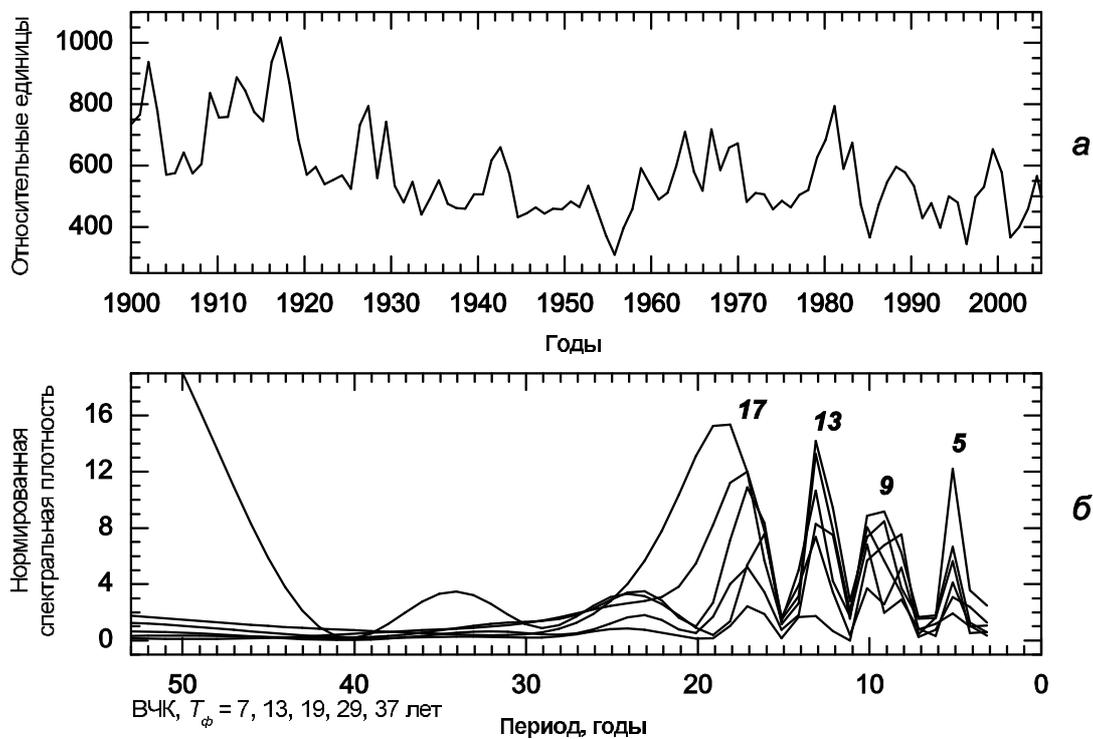


Рис. 5. Вариации площади ледового покрова в Баренцевом море с 1900 по 2005 г. (а) и результаты их спектрального анализа (б)

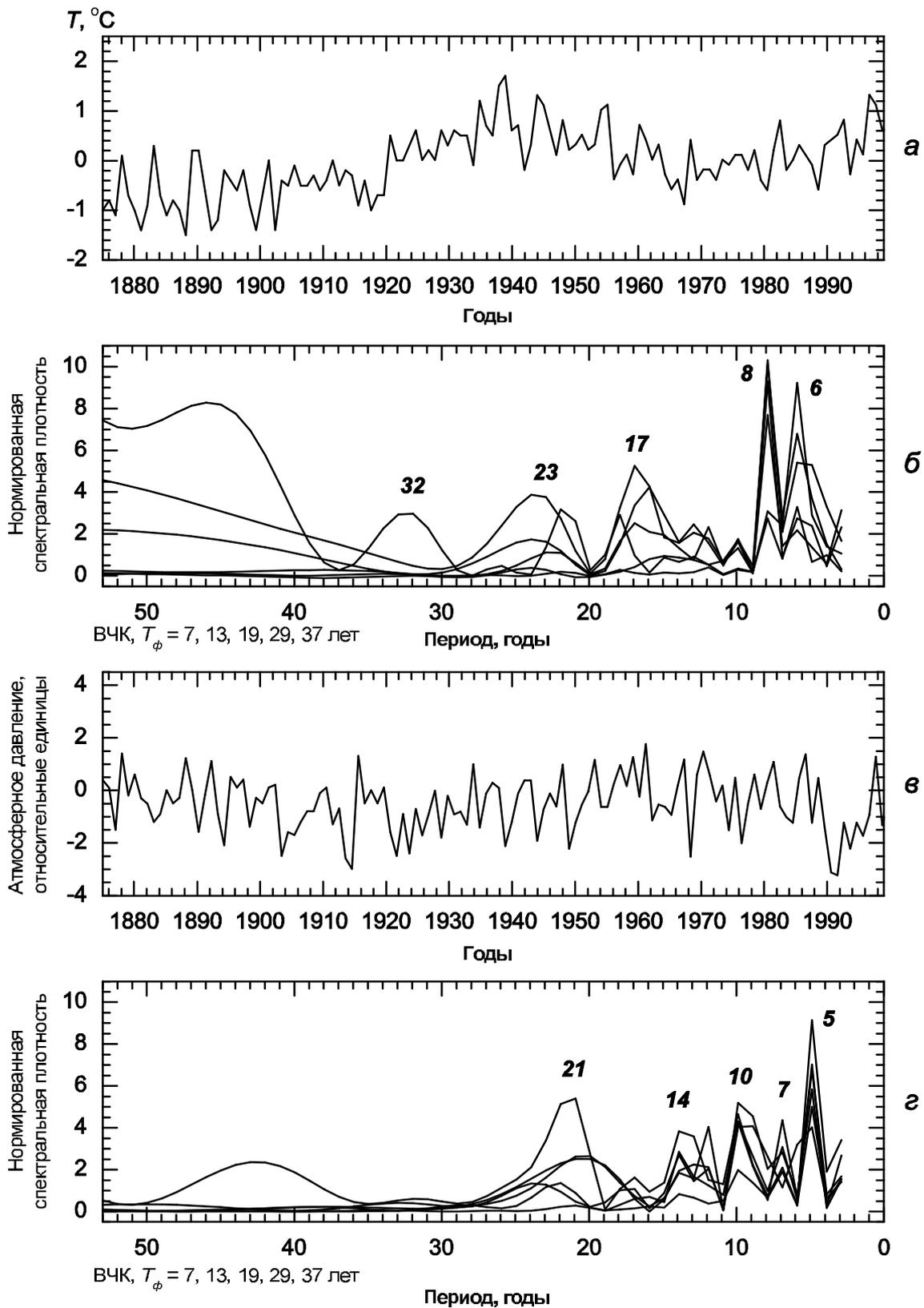


Рис. 6. Среднегодовые значения температуры (а) и атмосферного давления (в) в Арктическом регионе с 1875 по 1999 г. и результаты спектрального анализа их вариаций (б – температуры; г – атмосферного давления)

Следует подчеркнуть, что анализ изменчивости климатических условий в Северной Атлантике, а также вдоль побережья Северного Ледовитого океана (например, ежегодных вариаций площади ледового покрова в Баренцевом море) принципиально важен для понимания климатических условий на территории Республики Коми, поскольку изменчивость климатических условий в Северной Атлантике имеет отклик в глобальном масштабе и оказывает воздействие на климат рассматриваемой территории. В табл. 3 приведена обобщенная картина значений периодичностей в среднегодовых климатических данных.

Таблица 3. Выявленные квазипериоды в среднегодовых данных метеорологических станций на территории Республики Коми и осцилляциях площади льда в Баренцевом море

Регион/метеостанция, период наблюдений	Показатель	Квазипериоды, годы							
		32	23	17			8	6	
Арктическая зона, 1875–1999 гг.	Температура								
	Давление		21			10	7	5	
Баренцево море, 1900–2005 гг.	Площадь ледового покрова			17	13		9	5	
Кола–Мурманск, 1878–1999 гг.	Температура			17	13		8	5	
Сыктывкар, 1888–1995 гг.	Температура			19	13	10	8		4
	Осадки	28	20		14		8	5	
Усть-Цильма, 1895–1995 гг.	Температура			18	13	10	8	6	
	Осадки		20		15	11	8		4
Печора, 1943–1995 гг.	Температура					10	7	5	
	Осадки				13		9		4
Койнас, 1912–1995 гг.	Температура				14		9	6	
	Осадки					11	7		4
Троицко-Печорск, 1888–1995 гг.	Температура			19	13	10	8	5	
	Осадки			18	13		9	6	4

Обсуждение

Результаты анализа радиального прироста двух хвойных пород (сосна и ель) деревьев на территории Республики Коми и климатических параметров свидетельствуют, что изменчивость данных представляет собой не белый шум, а имеет четко прослеживаемые квазипериодичности (см. рис. 2–6), которые могут быть сгруппированы следующим образом: 5, 6–7, 8–9, 10–12, 13–14, 15–19, 20–24 и 26–32 года (см. табл. 1, 3).

Заметим, что в вариациях температуры в г. Сыктывкаре (см. рис. 3), а также в вариациях осадков в Усть-Цильме, Печоре, Койнасе и Троицко-Печорске проявляется период четыре года. Некоторые из выявленных периодичностей, такие как 10–12 и 20–24 года, характерны для периодов солнечной активности, а другие могут быть отражением процессов в системе атмосфера–океан. Рассмотрим выявленные периодичности подробнее.

Периодичности в диапазоне периодов 5–9 и 13–14 лет характерны как для радиального прироста сосны и ели, так и для гидрологических и климатических параметров. Они проявляются во всех подзонах в приросте деревьев и во всех проанализированных гидрологических и климатических параметрах, за исключением осредненных климатических параметров арктической зоны. Эти периодичности присущи и климатическим

осцилляциям САО и АО, в которых проявляются квазивосьмилетние и 4–5-летние колебания [Ramos da Silva, Anissar, 2005].

Влияние квазивосьмилетних колебаний САО на различные гидрологические и климатические параметры отмечены в некоторых работах [Полонский, Семилетова, 2002; Garcia et al., 2005]. Воздействие САО в диапазоне периодов 5–9 лет было выявлено при анализе интенсивности осадков на юге Западной Сибири [Безуглова, Зинченко, 2009], а 5–8-летние АО оказывают воздействие на вариации ледового режима в Балтийском море [Jevrejeva et al., 2003]. Квазивосьми- и девятилетние, а также пятилетние колебания очень четко проявляются в вариациях ледового покрова в Баренцевом море (см. рис. 5), что, вне сомнения, не может не сказываться на климатическом режиме территории Республики Коми. Эти периодичности являются основными и в температурном режиме на севере Кольского п-ва (г. Мурманск) (см. рис. 4).

Вместе с тем в колебаниях ледового режима в Баренцевом море имеются периодичности в 13 и 17 лет (см. рис. 5). Периодичность в 13–14 лет проявляется во всех ландшафтных зонах Республики Коми, а также в проанализированных климатических рядах по Мурманской обл. и северо-востоку Европейской части России. Эта периодичность отражена и в вариациях САО, а также в циклоническом режиме арктического региона [Proshutinsky, Johnson, 2001] и температурном режиме г. Мурманска (см. рис. 4).

В свою очередь, периодичность около 17 лет присуща не только вариациям ледового покрова в Баренцевом море: изменчивость в 15–19 лет проявляется во всех ландшафтных зонах Республики Коми. Она также выявлена при моделировании вариаций объема льдов в Северном полушарии в целом [Goosse et al., 2002] и в АО [Ramos da Silva, Avissar, 2005].

Таким образом, выявленные в радиальном приросте ели и сосны периодичности в 5–6, 7–9, 13–14 и 16–19 лет связаны с внутренними динамическими процессами в системе атмосфера–океан. В первую очередь они обязаны развитию САО и АО, а также вариациям площади ледового покрова в Баренцевом море и Северном полушарии в целом. Эти периодичности зарегистрированы во всех ландшафтных зонах Республики Коми и, следовательно, характеризуют климатическую изменчивость, охватывающую весь регион. Следует обратить внимание, что указанные периодичности не совпадают с фундаментальной цикличностью солнечной активности.

Рассмотрим теперь проявление в радиальном приросте деревьев периодичностей, близких к периодичности солнечной активности. Периодичность в 10–12 лет проявляется для хвойных пород деревьев во всех ландшафтных зонах на территории Республики Коми за исключением лесотундры. Она отсутствует и в вариациях температуры в Арктической зоне (см. рис. 6), а также в температурных вариациях в г. Мурманске (см. рис. 4). Заметим, что г. Мурманск расположен вблизи границы леса на Кольском п-ве, т.е. в зоне лесотундры. Развитие рассматриваемой периодичности логично связать с 11-летним солнечным циклом (цикл Швабе, Schwabe cycle), а отсутствие такой периодичности в зоне лесотундры – с региональным характером климатического отклика на солнечное воздействие.

Периодичность в 21–24 года соответствует 22–23-летнему солнечному циклу (цикл Хейла, Hale cycle). Эта периодичность обнаружена только для лесотундры и средней тайги. Она не проявляется в северной и южной тайге. Это вновь указывает на региональный характер климатического отклика на солнечное воздействие.

Климатическая периодичность в 28–33 года носит название периодичности Брюкнера. Ее физическая природа неясна. Однако она может быть интерпретирована как результат генерации комбинационных частот при одновременном воздействии солнечных 80–90-летних (цикл Гляйсберга, Gleissberg cycle) и 22-летних вариаций на сугубо нелинейную систему атмосфера–океан [Распопов и др., 2001]. Полученные в настоящей работе данные поддерживают подобную интерпретацию цикла Брюкнера: проявление 28–33-летних колебаний в зоне лесотундры и средней тайге, где также выявляются 21–24-летние колебания, и их отсутствие в северной и южной тайге, где отсутствуют и 21–24-летние колебания. Это может указывать на физическую взаимосвязь обеих групп периодичностей в климатических процессах.

С целью выявления особенностей климатического отклика Северо-Атлантического региона на долговременную изменчивость солнечной активности авторами были проведены соответствующие исследования для шести различных районов земного шара [Распопов et al., 2007]. Было показано, что на земной поверхности имеются районы как с положительным, так и с отрицательным температурным откликом на возрастание солнечной радиации. В пограничных между названными районами областях климатический отклик на изменение солнечной активности может иметь неустойчивый характер. В работе [Waple et al., 2002] проведено моделирование температурного отклика атмосферы вблизи земной поверхности на глобальное воздействие вариаций солнечной радиации в диапазоне периодов от 9 до 25 лет (рис. 7), т.е. в том же диапазоне периодов, который обсуждается в настоящей работе.

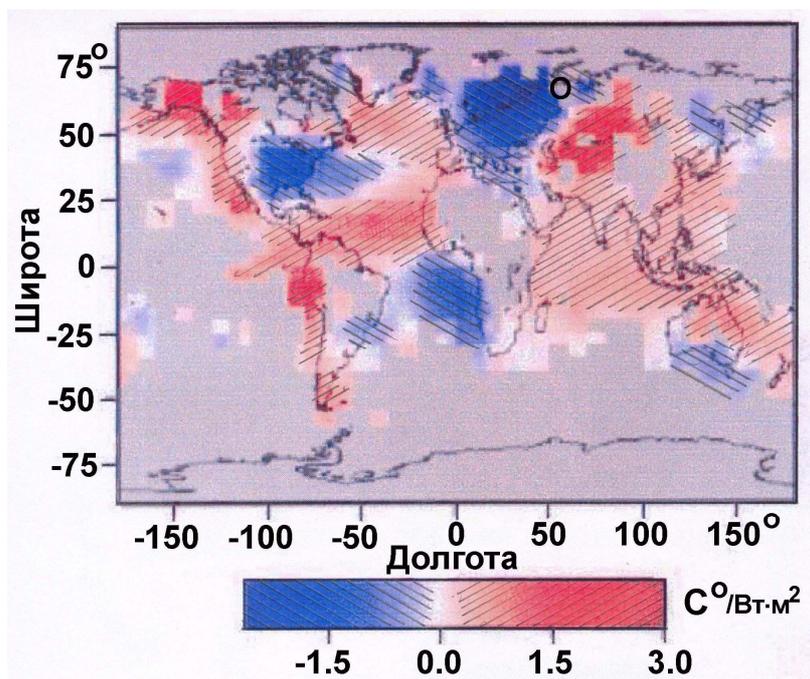


Рис. 7. Результаты моделирования температурного отклика приземной атмосферы на вариации солнечной радиации в диапазоне периодов 9–25 лет (по: [Waple et al., 2002])

Отмечено местоположение Республики Коморы

На рис. 7 видно, что при усилении солнечной радиации на значительной территории земного шара появляется положительный температурный отклик, однако в ряде регионов температурный отклик отрицательный, что связано с особенностями циркуляции атмосферы и переноса тепла в системе атмосфера–океан. На границе регионов с поло-

жительным и отрицательным откликами на изменение солнечной радиации появляются территории, где вариации солнечной радиации не ощущаются или температурный отклик на них носит неустойчивый характер. Регион Республики Коми относится именно к таким граничным районам. Пространственная изменчивость климатического отклика в Республике Коми на солнечное воздействие наряду с близостью данного региона к областям неустойчивого климатического отклика на солнечную изменчивость может быть также связана с региональными особенностями атмосферной циркуляции.

При обсуждении региональных особенностей ритмики годичного радиального прироста хвойных пород деревьев на территории Республики Коми необходимо обратить внимание на результаты работы [Соломина и др., 2009], в которой на основе вейвлет-анализа вариаций годичного радиального прироста лиственницы и ели проанализирована ритмика климатических процессов для трех регионов на севере Европейской части России за последние 300 лет. Один из регионов охватывает север Русской равнины (северные части Архангельской обл. и Республики Коми) в полосе долгот от 40° до 60° в.д. Однако в отличие от настоящей работы, в которой ставилась задача районирования территории Республики Коми по климатическим особенностям, авторы работы [Соломина и др., 2009] такой задачи перед собой не ставили. Осредненные хронологии вариаций параметров колец деревьев (максимальная плотность и ширина ранней древесины) были подвергнуты ими вейвлет-анализу, а результаты сопоставлены с результатами вейвлет-анализа климатических параметров. Вейвлет-анализ хронологии ранней древесины для севера Русской равнины выявил существование примерно 100-летнего и 55–60-летних ритмов. Кроме того, было отмечено проявление периодичностей в 30–32 года, 18–20 лет, а также 7 и 10–11 лет. Вейвлет-анализ вариаций максимальной плотности колец деревьев также выявил 10–11- и 18–20-летние периодичности. Таким образом, на примере более крупного региона были установлены примерно те же периодичности, что и для территории Республики Коми.

Отметим, что нами анализировались периодичности длительностью менее 40 лет. Вместе с тем, как видно на рис. 2, в вариациях ширины колец деревьев на территории Республики Коми присутствуют периодичности порядка 45–50 и около 65 лет, что было выявлено и для большего по размерам региона [Соломина и др., 2009]. Необходимо заметить, впрочем, что авторами указанной работы были при этом исключены некоторые локальные хронологии, коэффициенты корреляции которых с другими хронологиями были незначительны. Это означает, что климатическая изменчивость различна в различных частях региона, что и показано нами в настоящей работе.

Итак, изменчивость радиального прироста хвойных пород деревьев на территории Республики Коми испытывает на себе воздействие климатических факторов, связанных как с внутренними процессами, развивающимися в системе атмосфера–океан, так и с процессами, обязанными своим происхождением изменчивости солнечной активности. При этом периодичности солнечного воздействия и внутриатмосферных процессов не совпадают между собой, что позволяет разделить их при анализе отклика радиального прироста деревьев на климатическую изменчивость и дает возможность районировать территорию Республики Коми на зоны по отклику на периодическое солнечное воздействие.

Заключение

В результате анализа годичного радиального прироста хвойных пород деревьев, произрастающих в различных ботанико-географических зонах и подзонах на территории Республики Коми (лесотундра, северная, средняя и южная тайга), выявлено несколько групп квазипериодичностей, а именно 6–9, 10–12, 13–14, 15–19, 21–24 и 28–33

года. Анализ гидрологических и климатических данных, развития североатлантических и арктических климатических осцилляций, а также изменчивости солнечной активности позволил разделить выявленные периодичности на два класса по возможной физической природе. Ряд периодичностей (6–9, 13–14 и 15–19 лет) связаны с внутренними процессами в системе атмосфера–океан в Северной Атлантике и арктическом регионе. Так, периодичность в 6–9 лет имеет связь с циклоническими процессами в Северной Атлантике и САО и АО, а периодичности в 13–14 и 15–19 лет – с вариациями ледового покрова в Баренцевом море и Северном Ледовитом океане. Эти периодичности проявляются во всех подзонах на территории Республики Коми.

Второй класс периодичностей можно интерпретировать как результат глобального воздействия солнечной активности. Периодичности в 10–12 лет и 21–24 года соответствуют солнечным циклам Швабе и Хейла, а периодичность Брюкнера (28–33 года), по-видимому, является результатом нелинейного воздействия циклов Хейла и Гляйсберга на систему атмосфера–океан. В отличие от периодичностей внутреннего происхождения, которые проявляются во всех подзонах региона, воздействие периодичностей солнечного происхождения различно в различных подзонах. Так, периодичность в 10–12 лет отсутствует в зоне лесотундры, а периодичности в 21–24 и 28–33 года – в северной и южной тайге. Отсутствие указанных периодичностей можно интерпретировать как результат различий в атмосферной циркуляции на территории Республики Коми, связанных с нелинейным откликом системы атмосфера–океан на солнечное воздействие. Таким образом, на рассмотренной нами территории может быть выделено несколько районов по отклику на периодическое солнечное воздействие.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 10-05-00129-а, № 11-02-00755-а, проекта Европейской комиссии CAMBIFORRUS и гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В37.21.1248).

Литература

- Безуглова Н.Н., Зинченко Г.С. Региональные климатические проявления глобальной циркуляции атмосферы на юге Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2009. № 3. С. 83–86.
- Дженкинс Г., Ватт Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. 288 с.
- Дмитриев П.Б., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Матвеев Г.А., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Особенности рентгеновского излучения солнечных вспышек, зарегистрированных спектрометром «ИРИС» во время полета станции «КОРОНАС-Ф» // Астрономический вестник. 2006. Т. 40. С. 160–170.
- Козубов Г.М., Дегтева С.В. Морфотаксономическая характеристика и биоэкологические особенности основных лесообразующих пород // Леса Республики Коми. М., 1999. С. 71–102.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Роекнер Э. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам // Докл. РАН. 2008. Т. 419, № 5. С. 687–690.

- Мохов И.И., Роекнер Э., Семенов В.А., Хон В.Ч. Возможные региональные изменения режимов осадков в Северной Евразии в XXI веке // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. С. 702–710.
- Полонский А.Б., Семилетова Е.П. О статистических характеристиках североатлантического колебания // Морской гидрофизический журнал. 2002. Т. 3. С. 28–42.
- Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Турунен У., Линдхолм М., Колстрем Т. Нелинейный характер воздействия солнечной активности на климатические процессы // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 4. С. 407–412.
- Серебрянников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
- Соломина О.Н., Антикаева О.И., Шаталин А.Ю. Ритмы природных процессов по результатам вейвлет-анализа годовых колец деревьев на севере Европейской части России за последние 300 лет // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8, № 1. С. 51–62
- Alavi A.S., Jenkins G.M. An example of digital filtering // Appl. Statist. 1965. V. 14. P. 70–74.
- Garcia N.O., Gimeno L., Torre L. de la, Nieto R., Añel J.A. North Atlantic Oscillation (NAO) and precipitation in Galicia (Spain) // *Atmósfera*. 2005. V. 18, N 1. P. 25–32.
- Goosse H., Selten F.M., Haarsma G.J., Obsteegh J.D. A mechanism of decadal variability of the sea-ice volume in the Northern Hemisphere // *Climate Dynamics*. 2002. V. 19. P. 61–83.
- Grissino-Mayer H., Holmes R., Fritts H. International tree-ring data bank program library manual. Tucson, Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1997.
- Holmes R. Dendrochronological program library: User's manual. Tucson, Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1999.
- Jevrejeva S., Moore J.C., Grinsted A. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño – Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108: D21 4677.
- Lopatin E. Long-term trends in height growth of *Picea obovata* and *Pinus sylvestris* during the past 100 years in Komi Republic (North-Western Russia) // *Scand. J. of Forest Res.* 2007. V. 22. P. 310–323.
- Lopatin E.V., Kolström T., Spiecker H. Determination of forest growth trends in Komi Republic (North-Western Russia): combination of tree-ring analysis and remote sensing data // *Boreal Env. Res.* 2006. V. 11. P. 341–353.
- Lopatin E.V., Kolström T., Spiecker H. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-Western Russia // *Forest*. 2007. V. 4, N 1. P. 28–41.
- Lopatin E.V., Kolström T., Spiecker H. Long-term trends in radial growth of Siberian spruce and Scots pine in Komi Republic (North-Western Russia) // *Boreal Env. Res.* 2008. V. 13. P. 539–552.
- Mielikainen K., Sennov S. Growth trends of forests in Finland and North-Western Russia // *Growth trends in European forests: Studies from 12 countries*. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 1996. P. 19–27.
- Overpeck J., Hughen K., Hardy D., Bradley R., Case R., Douglas M., Finney B., Gajewski K., Jacoby G., Jennings A., Lamoureux S., Lasca A., MacDonald G., Moore J., Retelle M., Smoth S., Wolfe A., Zielinski G. Arctic environmental change of the last four centuries // *Science*. 1997. V. 278. P. 1251–1256.
- Petoukhov V., Semenov V. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115: D21111. Doi: 10.1029/2009JD013568
- Proshutinsky A.Y., Johnson M.A. Two circulation regimes of wind-driven Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 12.493–12.514.
- Ramos da Silva R., Avissar R. The impacts of the Luni-Solar oscillation on the Arctic oscillation // *J. Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L22703.

- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kuzmin A.V., Kozyreva O.V., Ogurtsov M.G., Kolström T., Lopatin E.* Regional tropospheric responses to long-term solar activity variations // *Adv. Space Res.* 2007. V. 40. P.1167–1172.
- Razuvaev V.N., Apasova E.G., Martuganov R.A.* Six- and three-hourly meteorological observations from 323 USSR stations // *ORNL/CDIAC-66. NDP-048.* 1995.
- Waple F.M., Mann M.E., Bredly R.S.* Long-term pattern of solar irradiation forcing in model experiments and proxy based surface temperature reconstruction // *Climate Dynamics.* 2002. V. 18. P. 563–778.

Сведения об авторах

РАСПОПОВ Олег Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 191023, г. Санкт-Петербург, Мучной пер., 2. Тел.: (812) 552-85-00. E-mail: oleg@or6074.spb.edu

ЛОПАТИН Евгений Валентинович (LOPATIN Eugene) – Университет Восточной Финляндии. Финляндия, г. Йюэнсуу; Dr. Head of Research, University of Eastern Finland, School of Forest Sciences, P.O. Box 111, FI-80101 Joensuu, Finland. Tel: +358 46-810-1514. E-mail: eugene.lopatin@uef.fi

КОЛСТРЁМ Тaneli (KOLSTRÖM Taneli) – Финский научно-исследовательский институт леса. Финляндия, г. Ванта; Prof., Dr. Director of Research, METLA, Finnish Forest Research Institute, P.O. Box 18, 01301 Vantaa, Finland. Tel.: +358 29-532-5011; mob.: +358 40-801-5011. E-mail: taneli.kolstrom@metla.fi

ДЕРГАЧЕВ Валентин Андреевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26. Тел.: (812) 297-79-28. E-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

ДМИТРИЕВ Павел Борисович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26. Тел.: (812) 297-79-28. E-mail: Paul.D@mail.ioffe.ru

КАЛЕ Ганс-Петер (KAHLE Hans-Peter) – Фрайбургский университет им. Альберта-Людвига, Институт роста леса. Германия, г. Фрайбург; Dr., Institut für Waldwachstum / Institute for Forest Growth, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Tennenbacher Str. 4, 79106 Freiburg, Germany. Tel.: ++49-761-203-3739. E-mail: Hans-Peter.Kahle@iww.uni-freiburg.de

СПИКЕР Генрих (SPIESKER Heinrich) – Фрайбургский университет им. Альберта-Людвига, Институт исследования леса. Германия, г. Фрайбург; Prof., Dr. Institutsdirector, Institut für Waldwachstum / Institute for Forest Growth, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Tennenbacher Str. 4, 79106 Freiburg, Germany. Tel.: ++49-761-203-3737. E-mail: instww@iww.uni-freiburg.de

SPATIAL STRUCTURE OF PERIODICITY OF CONIFER TREE RADIAL GROWTH IN THE KOMI REPUBLIC TERRITORY

O.M. Raspopov¹, E.V. Lopatin², T. Kolström³, V.A. Dergachev⁴, P.B. Dmitriev⁴,
H.-P. Kahle⁵, H. Spiecker⁵

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radiowaves Propagation (Saint-Petersburg Branch), Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

² University of Eastern Finland, School of Forest Sciences, Joensuu, Finland

³ Finnish Forest Research Institute (METLA), Vanta, Finland

⁴ Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

⁵ Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Waldwachstum / Institute for Forest Growth, Freiburg, Germany

Abstract. Spectral analysis of tree ring data sets of Siberian spruce (*Picea obovata*) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) was carried out to study the effects of climatic factors on conifer tree radial growth in the Komi Republic territory. Analyses were performed for different natural subzones in the Komi Republic: forest–tundra transition zone, northern, middle and southern taiga. The results show that several groups of periodicities can be found in tree radial growth. One periodicity is related to internal processes in the atmosphere–ocean system, the other one to fluctuations in solar activity.

Keywords: tree rings, dendrochronology, climate change, boreal forest, Komi Republic.