

15. Жукинский В.Н., Оксьюк О.Н., Олейник Г.Н. Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. – 1981. – Т. 17, № 2. – С. 38–49.
16. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши / О.Н. Оксьюк, В.Н. Жукинский, Л.П. Брагинский [и др.] // Гидробиол. журн. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 62–76.
17. Методы химических исследований океана / под ред. О.К. Бордовского, В.Н. Иваненкова. – М.: Наука, 1978. – 270 с.
18. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справ. мат-лы / Т.В. Гусева, Я.П. Молчанова, Е.Н. Заика [и др.]. – М.: Эколайн, 2000. – 61 с.
19. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М.: Изд-во Минздрава РФ, 2007. – 223 с.
20. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно-допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ федерального агентства по рыболовству № 20 от 18.01.2010 г. – М.: Изд-во ВНИРО, 2010. – 153 с.
21. Грезе В.Н. Кормовые ресурсы рыб реки Енисея и их использование // Изв. ВНИИОРРХ. – М.: Пищепромиздат, 1957. – Т.41. – 226 с.
22. Емельянова Л.М., Башенхаева Н.В. // Круговорот вещества и энергии в водоемах: тез. докл. V Всесоюз. лимнол. совещ. – Иркутск, 1977. – С. 99.
23. Продукционно-гидробиологические исследования Енисея. – Новосибирск: Наука, 1993. – 195 с.



УДК 630*561.24

В.В. Сима́нко, А.В. Бенькова, А.В. Шашкин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «СКОЛЬЗЯЩИХ ФУНКЦИЙ ОТКЛИКА» ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАДИАЛЬНЫЙ РОСТ ДЕРЕВЬЕВ

Предложен метод расчета и анализа «скользящих функций отклика» для выявления влияния климатических факторов на радиальный рост деревьев на основе расчета средних скользящих коэффициентов корреляции. Определен оптимальный временной период («окно») длительностью в 20 дней, при котором скользящие функции отклика показали более тесную корреляцию индексов радиального прироста с климатическими переменными (температурой и осадками).

Ключевые слова: функции отклика, «скользящие функции отклика», «скользящие средние», индексы радиального прироста, климатические факторы.

V.V. Simanko, A.V. Benkova, A.V. Shashkin

THE APPLICATION OF “SLIDING RESPOND FUNCTION” METHOD FOR REVEALING CLIMATIC FACTOR INFLUENCE ON TREE RADIAL GROWTH

The calculation and analysis method of “sliding respond functions” for revealing the climatic factor influence on tree radial growth based on calculation of correlation average “sliding” coefficients is proposed. The optimal time period (“window”) with the length of 20 days where “sliding respond functions” showed the closest correlation of radial growth indices with climatic variables (temperature and precipitation) is determined.

Key words: respond functions, “sliding respond functions”, “sliding average”, radial growth indices, climatic factors.

Введение. Степень изменчивости годового прироста, обусловленную климатическими изменениями, принято оценивать, используя эмпирический подход, а именно построение и анализ стандартных функций отклика нормированной ширины годовых колец (индексов) на влияние климатических факторов. Это орто-

гональные уравнения множественной регрессии, в которых индексы годовых колец являются зависимыми, а климатические переменные – независимыми [10, 12, 14].

Обычно в качестве климатических переменных используются стандартные метеорологические данные, такие как среднемесячные температуры и месячные осадки. Однако решение дендрозокологических и физиологических задач требует другого подхода, не привязанного к разбиению вегетационного периода на календарные месяцы. При решении такого рода задач в литературе появились варианты поиска статистических связей индексов прироста со среднедекадными и средними за пять дней климатическими переменными [5, 15, 18].

Между тем динамика сезонного радиального роста деревьев в большинстве случаев не установлена, и в связи с этим трудно судить о длительности и положении в пределах вегетационного периода реального временного интервала, когда климатические условия оказывают наиболее сильное влияние на размеры годовичного кольца. Поэтому использование усредненных за заданный промежуток времени климатических переменных не всегда дает положительный результат [2]. В данной работе предлагается не только способ поиска и определение длительности временного интервала в пределах вегетационного сезона, когда влияние климатических условий на размеры годовичного кольца наибольшее, но и выявление преимущества метода «скользящих функций отклика».

Материалы и методы исследований. В разных климатических условиях начало, окончание и продолжительность вегетационного сезона различны, а фенологические наблюдения, по которым определяются эти характеристики, зачастую отсутствуют. Поэтому нами был взят в рассмотрение временной период с 1 апреля по 30 октября текущего года, охватывающий сезоны вегетации на территории Сибири [3]. В качестве климатических переменных использованы данные по среднесуточным температурам воздуха и суточным осадкам, измеренным в течение ряда лет. Расчет «скользящих средних» климатических переменных проводился за разные промежутки времени (в пределах так называемых «окон»). В работе использованы «окна» продолжительностью 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 дней для того, чтобы на основе анализа результатов выбрать оптимальное окно. «Окно» любой продолжительности начиналось с 1 апреля, и после расчета средних значений температуры воздуха и осадков в «окне» последнее сдвигалось на 5 дней вперед (проводился «сдвиг окна с «шагом» в 5 дней»), и вновь рассчитывались средние, и так до 30 октября. Оказалось, что «скользящие средние» климатических переменных лучше, чем среднемесячные, отражают внутрисезонную изменчивость погодных условий. Это наглядно представлено на рисунке 1 на примере сравнения внутрисезонной динамики «скользящей средней» температуры воздуха, рассчитанной с окном в 20 дней и шагом в 5 дней, с динамикой суточной и среднемесячной температуры соответствующего сезона.

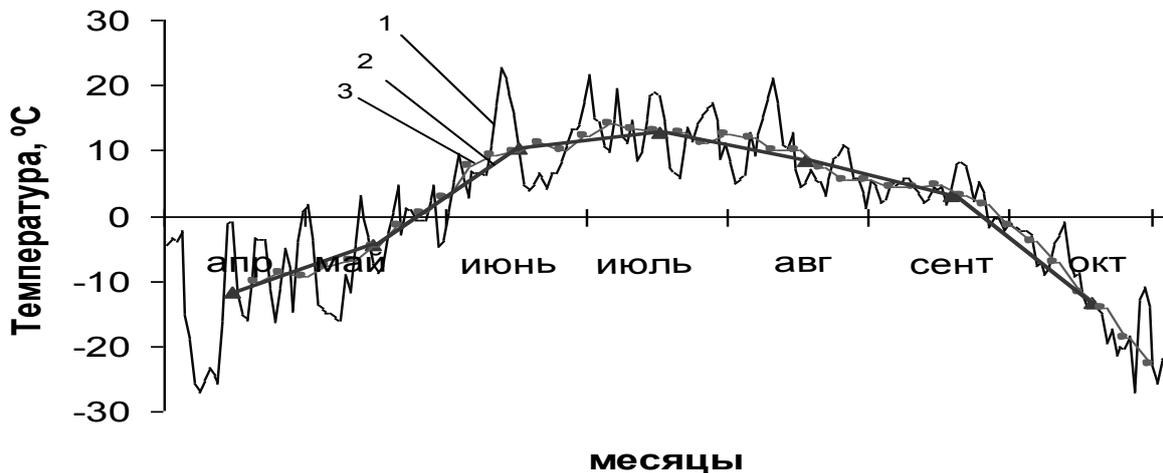


Рис. 1. Температура воздуха в апреле – октябре 1990 года по метеостанции Хатанга:
1 – среднесуточные данные; 2 – среднемесячные данные; 3 – «скользящие средние» с «окном»
в 20 дней и шагом в 5 дней

Корреляционная связь между индексами радиального прироста и значениями температуры воздуха и осадков отдельных месяцев за длительный период времени (в календарных годах) называется «стандарт-

ной функцией отклика индексов прироста». Корреляционную связь, рассчитанную между индексами радиального прироста и «скользящими средними» упомянутых климатических переменных, мы назвали «скользящей функцией отклика».

Преимущество «скользящих средних» перед стандартными, построенными с использованием среднемесячных значений температуры воздуха и осадков, продемонстрировано на нескольких примерах. Для исследования были выбраны очень холодные и очень засушливые местообитания на территории Сибири, то есть где, как было установлено ранее дендрохронологическими исследованиями, преимущественно один климатический фактор лимитировал радиальный рост [4, 5, 7, 11].

Объекты и места исследований. Места выбраны вблизи метеостанций Хатанга, Чокурдах, Тура, Улан-Удэ. Условные обозначения мест: KOT, COKU, TURA, ULAN.

I. KOT. Долина р. Котуй (п-ов Таймыр, 70°52' с.ш., 102°58' в.д.). Субарктический термический режим, сплошное распространение многолетней мерзлоты, средняя температура января минус 29,6°С, июля – плюс 12,5°С, среднегодовая температура минус 13°С, очень низкие значения годовых осадков (247 мм/год), сравнительно высокая влажность воздуха в первой половине сезона. Вегетационный сезон длится около 60–65 дней, с середины июня до середины августа. Преобладает лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.).

II. COKU. Долина р. Индигирка (Северо-Восточная Якутия, 70°62' с.ш., 147°88' в.д.). Климат суровый, резко континентальный, обусловлен тем, что район располагается преимущественно в пределах арктического и субарктического климатических поясов. Сплошное распространение многолетней мерзлоты. Среднегодовая температура – минус 13,4°С, средние температуры января – минус 33,9°С, июля – плюс 10,6°С. Годовая норма осадков около 200 мм. В течение летних месяцев выпадает основная сумма осадков (65–75% годовой суммы). Вегетационный сезон длится около 60–65 дней. Преобладает лиственничное редколесье, образованное лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.)

III. TURA. Нижнее течение р. Кулингдакан (база Эвенкийского опорного экспедиционного пункта ИЛ СО РАН вблизи пос. Тура, 64° 27' с.ш., 100°23' в.д.). Климат семигумидный, резко континентальный. По данным метеостанции Тура за период 1936–2009 гг., средняя температура января составляет минус 36,0°С, июля плюс 16,5°С, среднегодовая температура – минус 9,0°С, среднегодовое количество осадков 366 мм, длительность безморозного периода – 100 дней. Вегетационный период длится в среднем 69–80 дней. Объектом исследования явились лиственничники кустарничково-зеленомошные, образованные лиственницей Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.).

IV. ULAN. Находится вблизи г. Улан-Удэ (51°83' с.ш., 107°60' в.д.). Климат резко континентальный, с большими годовыми и суточными колебаниями температуры воздуха и с неравномерным распределением атмосферных осадков по сезонам года. Лето короткое, в первой половине засушливое с отдельными суховеями. Число дней с осадками составляет 155 дней в году. В среднем выпадает 265 мм осадков в год, основное их количество приходится на лето; на июль и август приходится 60–70 % годовой нормы. Средняя годовая температура воздуха – минус 0,1 °С. Средняя температура июля плюс 15–20 °С, января – минус 20–30 °С. Объект исследования – лиственничники *Larix sibirica* Ledeb. Вегетационный период длится в среднем 120 дней.

Суточные климатические данные для метеостанций Хатанга (с 1950 по 2008 г.), Чокурдах (с 1950 по 1989 г.), Тура (с 1936 по 2009 г.), Улан-Удэ (с 1935 по 1989 г.) взяты с сайта [ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily/](http://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily/).

Результаты и обсуждения. Корреляция R индексов радиального прироста деревьев со «скользящими средними» температурами и осадками за указанные выше периоды представлены в виде контурных диаграмм (рис. 2) для каждого местообитания. Более темные оттенки соответствуют более высоким коэффициентам корреляции. Области с «точками» соответствуют отрицательным значениям. Каждое значение на диаграмме соответствует усреднению климатических данных за N дней вперед, начиная с указанного дня года.

Установлено, что для всех участков при длительности временного «окна» от 15 дней связь индексов радиального прироста с температурой воздуха (рис. 2, а) становится сильнее ($R > 0,40$ – $0,50$, при $P < 0,05$) по сравнению с менее продолжительными промежутками времени (5 или 10 дней), хотя есть и исключения. Например, на участке II, где главным образом температура двух летних месяцев июня–июля определяет изменение радиального прироста [1] независимо, какова длительность «окна», выявлена сильная связь радиального прироста с температурой воздуха 155–185 дня ($R > 0,50$). Ширина годичного кольца оказалась очень чувствительной к изменению температуры в этот период времени и в значительной степени определила рост годичного кольца.

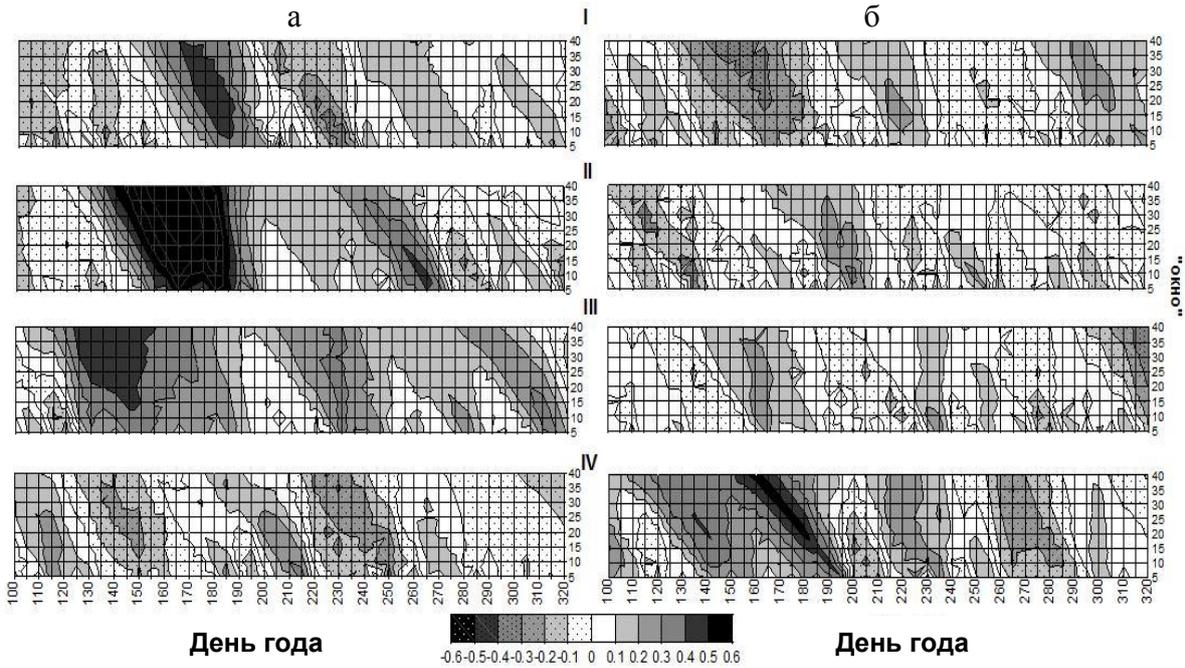


Рис. 2. Контурная диаграмма скользящих 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40-дневных функций отклика индексов радиального прироста деревьев на температуру (а) и осадки (б) (со сдвигом на 5 дней):
 I – KOT (*Larix gmelinii*), II – COKU (*Larix cajanderi*), III – TURA (*Larix gmelinii*), IV – ULAN (*Larix sibirica*).
 Значимые коэффициенты корреляции ($R=0,23 \div 0,31$)

При рассмотрении более длительных временных интервалов (25–40 дней) может отмечаться снижение достоверных значений коэффициента корреляции, например на участке I в середине августа или на участке II в начале сентября. Достаточно высокие достоверные коэффициенты корреляции ($R > -0,30 - -0,40$, при $P < 0,05$) индексов прироста для деревьев с участка I с осадками появляются только с «окном» длительностью 20 дней (рис. 2, б). При увеличении «окна» область становится шире по временной шкале, из-за чего возникает ложный эффект климатического сигнала, содержащегося в хронологии. Так, для участка IV (рис. 2, б) при увеличении «окна» от 30 до 40 дней область сигналов сливается и становится шире. Это связано с тем, что при выборе слишком продолжительного временного «окна» в его пределы попадают периоды, наиболее значимые для роста деревьев. В связи с чем связь индексов радиального прироста с климатическими факторами будет сильной на протяжении длительного периода времени.

Таким образом, 20-дневные скользящие функции отклика показали более тесную корреляцию индексов прироста с климатическими переменными и отличались лучшим разрешением по сравнению со стандартными функциями отклика. Кроме того, 20 дней – это достаточно длительный временной интервал в процессе формирования годичного прироста, так что климатический сигнал в этих пределах вполне могут регистрировать древесно-кольцевые хронологии. При дальнейшем сравнительном анализе мы использовали только 20-дневные скользящие функции отклика. Тем не менее этот период не универсален, он зависит от района исследования, а также от поставленной задачи.

Функции отклика индексов радиального прироста на изменение климатических факторов (рис.3)

На северных широтах июнь-июльские температуры всегда считались эффективными для роста деревьев [8, 9, 11, 13, 17], это подтверждают функции отклика среднемесячных данных температуры на радиальный прирост (см рис. 3, а, кривая 1). По стандартным функциям отклика (рис. 3, а) выявлена достоверная прямая связь радиального прироста у деревьев, произрастающих на участках I с июльской температурой ($R=0,37$), на II – с температурой июня-июля ($R=0,70$, $R=0,62$), а на участке III – со среднемесячной температурой июня ($R=0,41$). У деревьев на участке IV достоверной связи с температурой летних месяцев не обнаружено.

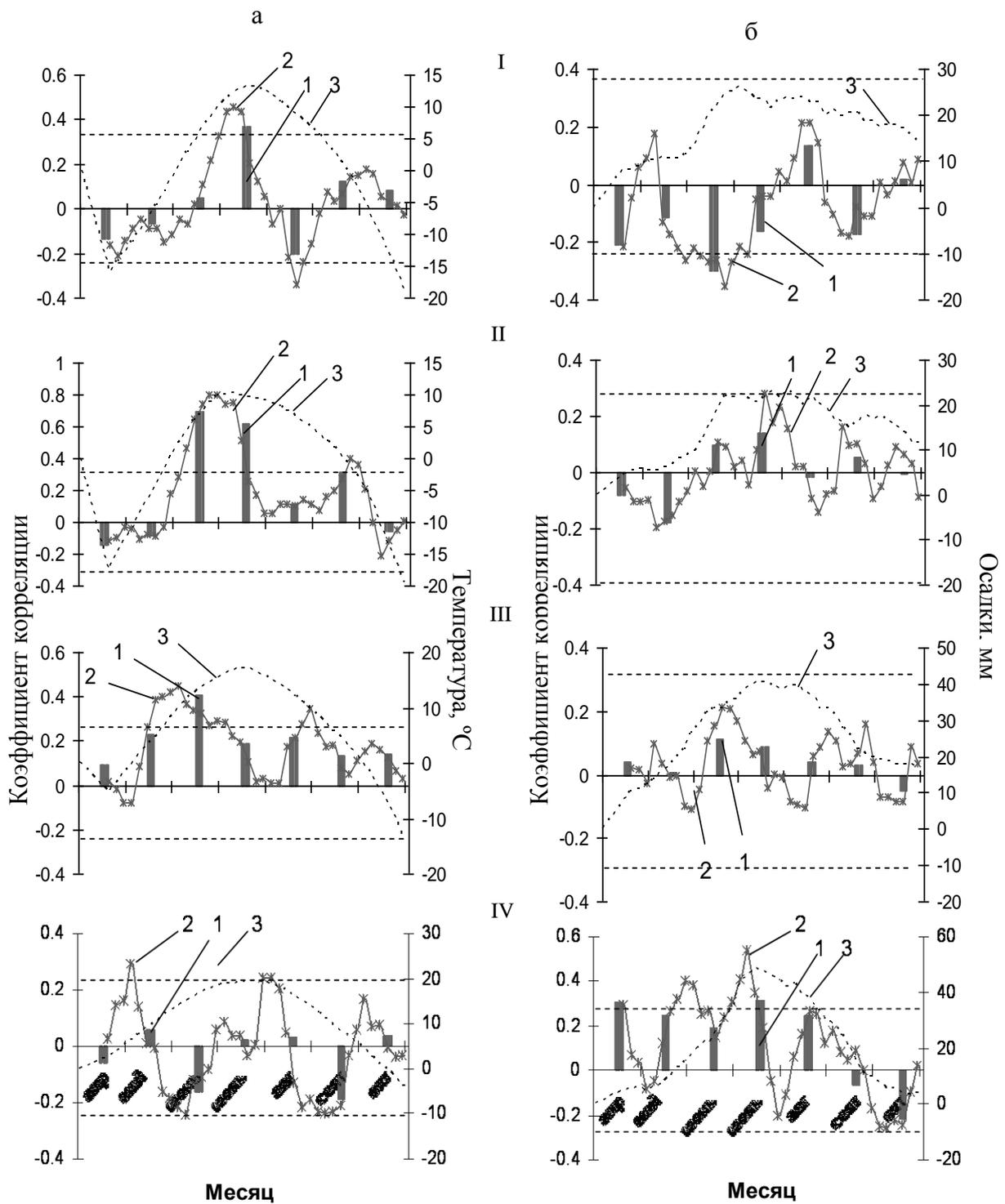


Рис. 3. Функции отклика индексов радиального прироста деревьев, произрастающих на участках I – КОТ, II – СОКУ, III – ТУРА, IV – УЛАН, на температуру воздуха (а) и осадки (б): 1 – «стандартные», с использованием среднемесячных данных; 2 – «скользящие» 20-дневные функции отклика; 3 – среднемноголетние значения температуры (а) и осадков (б); пунктирной линией на графиках отмечена граница значимости коэффициентов корреляции

Радиальный прирост на участке I связан с осадками июня (связь довольно слабая $R=-0,30$), а на участке IV, где осадки являются лимитирующим фактором, прирост оказался чувствителен к осадкам апреля, июля ($R=0,31$, $R=0,32$) (рис. 3, б).

Преимущество же 20-дневных скользящих функций отклика (см рис. 3, кривая 2) перед стандартными функциями отклика (см рис. 3, кривая 1) очевидно: границы области со значимыми коэффициентами корреляции сдвигаются и становятся шире, демонстрируют более тесную связь индексов радиального прироста с температурой воздуха и осадков. Так, для участка I посредством скользящих функций отклика выявлено положительное влияние температуры воздуха на ширину годичных колец в период с середины июня по начало июля (см. рис. 3, а, I, кривая 2); для участка III радиальный прирост деревьев достоверно и положительно коррелирует с температурой мая–июня и середины августа (рис. 3, а, III, кривая 2), а для участка IV – начало мая, конец июля, первая декада августа (рис. 3а, IV, кривая 2).

С использованием «скользящих средних» было выявлено положительное влияние осадков в конце мая ($R=0,40$) и в начале июля ($R=0,54$) на радиальный прирост деревьев с участка IV и отрицательное влияние осадков в период с 4 по 19 июня ($R=-0,35$) на ширину годичных колец деревьев с участка I [2], хотя стандартные функции отклика эту связь не выявили.

Таким образом, достоинство «скользящих функций отклика» заключается в том, что, во-первых, можно более точно определять период наибольшего влияния климатических факторов и, во-вторых, выявить различный отклик радиального прироста на климатические переменные в тех местах, в которых сроки начала вегетации разные. Так, авторами статьи [2] было показано, что важно учитывать значение именно микроэкологических условий для роста деревьев, произрастающих в экотоне верхней границы леса. Авторы статьи показали, что если взять участки вдоль топоэкологического профиля, находящиеся в разных микроусловиях, но расположенные близко к друг другу, вдоль склона: в верхней части, в средней и нижней (около воды), – то выявить разницу в реакции у деревьев на температуру и осадки возможно только используя метод «скользящих функций отклика». Тогда как «стандартные функции отклика» заметной разницы в реакции у деревьев выявить не смогли [2].

Необходимо отметить, что, используя метод «скользящих функций отклика», можно сделать вывод о том, что в большинстве случаев радиальный прирост начинает коррелировать с температурой воздуха в начале вегетации. Опираясь на результаты фенологических наблюдений Т.В. Карбаиновой [6] и Прислана [16], именно температура воздуха в начале вегетационного сезона и, соответственно, в начале сезона радиального роста, включающего в себя предсезонную реактивацию камбия, создает условия для будущего роста и определяет ширину годичного кольца. В холодных и засушливых местах даже незначительное изменение климатических факторов в течение сезона роста может отразиться на радиальном приросте деревьев.

Метод «скользящих функций отклика» оказался наиболее эффективным для выявления разницы реакции роста деревьев на изменение температуры или осадков: 1) в местах, где лимитирующие факторы сменяют друг друга в течение одного и разных сезонов роста; 2) в местах с разными микроклиматическими условиями в пределах одного экотопа и/или экотона.

Заключение. Предложен метод расчета и анализа «скользящих функций отклика» для выявления влияния климатических факторов на радиальный рост деревьев на основе расчета средних скользящих коэффициентов корреляции. В местах обитания, где лимитирует радиальный рост один климатический фактор, определен оптимальный временной период («окно») длительностью в 20 дней, при котором скользящие функции отклика показали более тесную корреляцию индексов радиального прироста с климатическими переменными (температурой и осадками) и отличались лучшим разрешением по сравнению со стандартными функциями отклика. Выявлено, что 20 дней – это достаточно длительный временной интервал в процессе формирования годичного прироста, так что климатический сигнал в этих пределах вполне могут регистрировать древесно-кольцевые хронологии. С помощью использования «скользящих функций отклика» можно более точно определять период наибольшего влияния климатических факторов. Метод «скользящих функций отклика» оказался наиболее эффективным для выявления разницы реакции роста деревьев на изменение температуры или осадков: 1) в местах, где лимитирующие факторы сменяют друг друга в течение одного и разных сезонов роста; 2) в местах с разными микроклиматическими условиями в пределах одного экотопа и/или экотона.

Литература

1. Бенькова А.В. Моделирование динамики нетто-продуктивности хвойных в пределах циркумполярного кольца и средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.28. – Красноярск, 2003. – 19 с.
2. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр / В.Е. Бенькова, А.В. Шашкин, М.М. Наурзбаев [и др.] // Лесоведение. – 2012. – № 4. – С. 73–84.
3. Буторина Т. Н. Биоклиматическое районирование Красноярского края. – Новосибирск: Наука, 1979. – 231 с.
4. Ваганов Е.А., Шиятов В.С., Мазена С.В. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. – Новосибирск: Наука, 1996. – 244 с.
5. Ваганов Е. А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
6. Карбаинова Т.В. Сезоны года в Таймырском заповеднике. Исследование природы Таймыра. – Красноярск: Изд-во ИЛ СО РАН, 2006. – Вып. 2. – С. 157–168.
7. Хантемуров Р.М., Сурков А.Ю., Горланова Л.А. Изменения климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале // Экология. – 2008. – № 5. – С. 323–328.
8. Лиственничники лесотундры и климатические тренды / В.И. Харук, К.Дж. Рэнсон, С.Т. Им [и др.] // Экология. – 2006. – № 5. – С. 323–331.
9. Шиятов С.Г. Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособие. – Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. – Ч. 1. – 80 с.
10. Шиятов С.Г. Колебания климата и возрастная структура древостоев лиственничных редколесий в горах Полярного Урала. Растительность тундр и пути ее освоения. – Л., 1967. – С. 271–278.
11. Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia / K.R. Briffa, V.V. Shishov, T.M. Melvin [et. al.] // Physiological Transactions of Royal Soc. B. – 2008. – Vol. 363. – № 1501. – Suppl. 12. – P. 2271–2284.
12. Cook E., L.A. Kairiukstis. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences / eds. E.R. Cook. – IASA. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Pub, 1990. – 394 p.
13. Douglass A.E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity – Washington: Carnegie Inst., 1919. – Vol.1. – 127 p.
14. Fritts H.C. Tree-rings and climate. – London; New York; San Francisco: Acad. Press, 1976. – 576 p.
15. The importance of early summer temperature and data of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic / A. Kidryanov, M. Huges, E. Vaganov [et al.] // Trees. – 2003. – № 17. – P. 61–69.
16. Seasonal ultrastructural changes in the cambial zone of beech (*Fagus sylvatica*) grown at two different altitudes / U. Schmitt, G. Koch, J. Gričar [et. al.] // IAWA J. – 2011. – Vol. 32. – № 4. – P. 443–459.
17. Schweingruber F.H. Tree Rings and Environment. Dendroecology. – Birmensdorf, WSL/FNP, Bern, Stuttgart, Vienna Haupt Publ., 1996. – 609 p.
18. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia / E.A. Vaganov, M.K. Hughes, A.V. Kirdyanov [et al.] // Nature. – 1999. – V. 400. – № 8. – P. 149–15.

