

ПРИРОДНО-РЕАБИЛИТАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС «ГНЕЗДО»: ФЛОРА, РАСТИТЕЛЬНОСТЬ, ДЕНДРОХРОНОЛОГИЯ

III. ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С.П. Арефьев

Дендрохронология рассматривает дерево как природный датчик-самописец, точнее как комплексную станцию сбора многолетней информации о разнообразных параметрах среды в занимаемом им пространстве, наземном и подземном. Древесные кольца на срезе ствола во многом подобны CD-диску, на котором эта информация записана, а задача дендрохронолога – считать ее и расшифровать. Современная дендрохронология предоставляет для этого большой арсенал методов (Methods., 1990; Шишов и др. 2015; и др.). Вместе с тем, большинство подобных исследований сосредоточено в районах с экстремальными климатическими условиями, где годовые кольца деревьев проявляют высокую чувствительность к природным факторам и в наименьшей степени загрязнены различными шумами, обычными для плотно заселенных территорий с благоприятным климатом. В силу этого дендрохронологические наработки по югу Тюменской области не так уж велики (Полюшкин и др., 1977; Арефьев, 1997, 2013, 2015; Агафонов, 2011). Дендрохронологические исследования уникального припышминского природного комплекса, включающего современную и древнюю долину р. Пышмы с крупными сосновыми массивами, произрастающими на дюнах, системы озер, другие природные и исторические объекты в настоящее время только начинается (Арефьев, Зах, 2017).

Материал и методы

Для изучения динамики экосистем в районе природно-реабилитационного комплекса «Гнездо» отобраны дендрохронологические образцы с двух участков, отличающихся по положению, строению древостоя, рекреационной нагрузке. Первый участок – лесной, это постоянная пробная площадь, описанная в предыдущей главе. Поскольку живой напочвенный покров на нем представлен в основном труднопроходимыми колючими зарослями малины, регулярное антропогенное вмешательство сведено до минимума. Древесный ярус сложен сосной обыкновенной с примесью березы повислой. На некоторых стволах имеются следы низовых пожаров, последний из которых датируется 1996 г. Часть деревьев в аномально жаркий 2012 г. была поражена энтомофагами и в 2014 г. удалена в ходе выборочной санитарной рубки, большая, наиболее крупномерная часть древостоя сохранилась и к 2017 г. находилась в удовлетворительном состоянии. Второй участок – береговой, расположен на краю высокой террасы долины Пышмы, на территории бывшего пионерского лагеря, примыкающей к территории Комплекса. Участок активно используется для рекреации, живой напочвенный покров трансформирован и сложен антропофильными видами, местами отсутствует, имеется плотная тропиноподобная сеть. Древесная растительность представлена наиболее старыми крупными деревьями сосны обыкновенной толщиной ствола до 83 см, отдельно стоящими или образующими разреженный парковый древостой. Лесная среда, характеризующаяся более мягким автономным микроклиматом, на этом участке развита слабо или практически отсутствует.

На каждом участке для анализа отобраны керны из 7 наиболее крупных господствующих деревьев, флуктуации радиального прироста которых в наименьшей мере обусловлены ценотическими факторами и определяются, в первую очередь, гидротермическим режимом биотопа. На первом участке взята сосна и береза, на втором – только сосна наиболее старого поколения (по 7 деревьев, всего 21). Из каждого дерева с помощью бурава Пресслера на высоте 0,5 м керны взяты по двум противоположным радиусам, что составило репрезентативный материал для 3 обобщенных хронологий по 14 радиусов в каждой. После зачистки и контрастирования мелом поперечной поверхности

кернов ширина колец была измерена под микроскопом, полученные с отдельных радиусов древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) подвергнуты процедуре перекрестной датировки (Methods..., 1990).

В силу использования деревьев одного возраста и одного ценотического статуса обобщенные хронологии абсолютной ширины колец (радиального прироста), включающие возрастную компоненту прироста, рассчитаны по средней арифметической. Для стандартизации ДКХ (приведения их к наиболее общему виду путем вычета возрастной составляющей) ряды прироста с каждого отдельного радиуса преобразованы путем расчета соотношений ширины смежных колец (центрированный коэффициент чувствительности):

$$k_{t+1} = (w_t - w_{t+1}) / (w_t + w_{t+1}),$$

где k – коэффициент чувствительности, w – ширина кольца в год t . После обобщения индивидуальных рядов чувствительности k средней арифметической проводилась их кумуляция с формированием ряда кумулянт (c) и восстановление относительной ширины колец $\hat{w} = 10^c$, не содержащей искажений, вызываемых концевыми эффектами. По ряду относительной ширины колец \hat{w} рассчитывали индексы ширины колец методом негативной экспоненты \dot{w} (Methods..., 1990) и методом двойного экспоненциального сплайна (Грешилов и др., 1997), дающего далее наиболее тесную связь с климатическими факторами в случае трудно формализуемых рядов (Арефьев и др., 2017):

$$EMA_t = (\hat{w}_t + EMA_0) / 2 \dots EMA_t = (\hat{w}_t + EMA_{t-1}) / 2, EMA_0 = \hat{w}_1; \ddot{w}_t = \dot{w}_t / DMA_t,$$

где EMA – скользящее среднее первого порядка, DMA – скользящее среднее второго порядка с конца ряда EMA , \ddot{w} – индекс ширины кольца.

Для оценки устойчивости радиального прироста использовали преобразованный центрированный коэффициент чувствительности

$$s = -/k|+1,$$

где s – устойчивость прироста, изменяющаяся в пределах от 0 до 1 (Арефьев, 1997). Высокие значения показателя устойчивости соответствуют минимальным изменениям ширины колец от года к году в благоприятных стабильных условиях роста, низкие – резким изменениям ширины колец, приуроченным к неблагоприятным погодно-климатическим условиям роста, воздействию нарушающих факторов (пожары, патогены). Такая устойчивость процессов роста деревьев рассматривается как физиологическая. Выделяется также устойчивость структуры древостоя, определяемая его адаптацией к механическим (ветровым) нагрузкам. Наибольшей механической устойчивости соответствует равномерная ненарушенная структура сомкнутого древостоя и, соответственно, низкий годичный уровень коэффициента вариации v ширины колец составляющих его деревьев. В качестве показателя механической устойчивости древостоя используется величина $-v$.

Для выявления цикличности трудно формализуемых ДКХ, характерных для подтаежной зоны Тюменской области, использована разновидность метода линейных фильтров (Бокс, Дженкинс, 1974), основанная на скользящей корреляции ряда дендрохронологических параметров, например ширины колец w , с линейным рядом их дат t . Использован коэффициент корреляции Пирсона $r = r(w;t)$, изменяющий свое значение и знак соответственно наклону ряда в окне скользящего. Значение r соотносится с конечной датой окна скользящего, рассчитывается два ряда r , от начала и от конца исходного ряда, а затем их среднее (или минимальное) значение \check{r} , в результате ряды w и \check{r} имеют равную протяженность. Величина окна является фильтром для выделения в исходной ДКХ разных частотных компонент. Брали фильтры длиной 3, 5, ... 21 год. Метод применяли для оценки цикличности рассмотренных выше дендрохронологических параметров: абсолютной и индексированной ширины колец, устойчивости роста деревьев. Для определения длины (периода) циклов использовали автокорреляцию и спектральный анализ Фурье в пакете Statistica 10. Для оценки связи радиального прироста деревьев с климатическими показателями использовали модели множественной регрессии в том же пакете. Оценивали множественную регрессию индексов прироста \dot{w} и \ddot{w} по месячным показателям температуры воздуха и количества осадков в год прироста t и в предшествующий ему год $t-1$. Делали

пошаговую сепарацию значимых компонентов регрессии исходного 17-месячного массива с мая предыдущего года по август года образования кольца. Использовали данные по метеостанции Тюмень [http://Aisori.meteo.ru/ClimateR] с 1965 по 2016 гг.

Динамика прироста и устойчивости древостоев

Наиболее длинный кольцевой ряд, протяженностью 150 лет (с 1867 г.) получен для сосны с **берегового участка** (рис. 1). С учетом высоты отбора кернов на стволе, начало ее роста приходится приблизительно на 1860 г. Таким образом, сосна в районе Комплекса принадлежит к самому старому поколению деревьев, встречающемуся в окрестностях г. Тюмени по данным наших многолетних исследований (Арефьев, 2009, 2002). Ее превосходит лишь дерево сосны возрастом около 250 лет, произрастающее в районе пос. Метелево, а также единичные тугорослые сосны, возрастом около 200 лет произрастающие на рямовых болотах Тарманской системы.

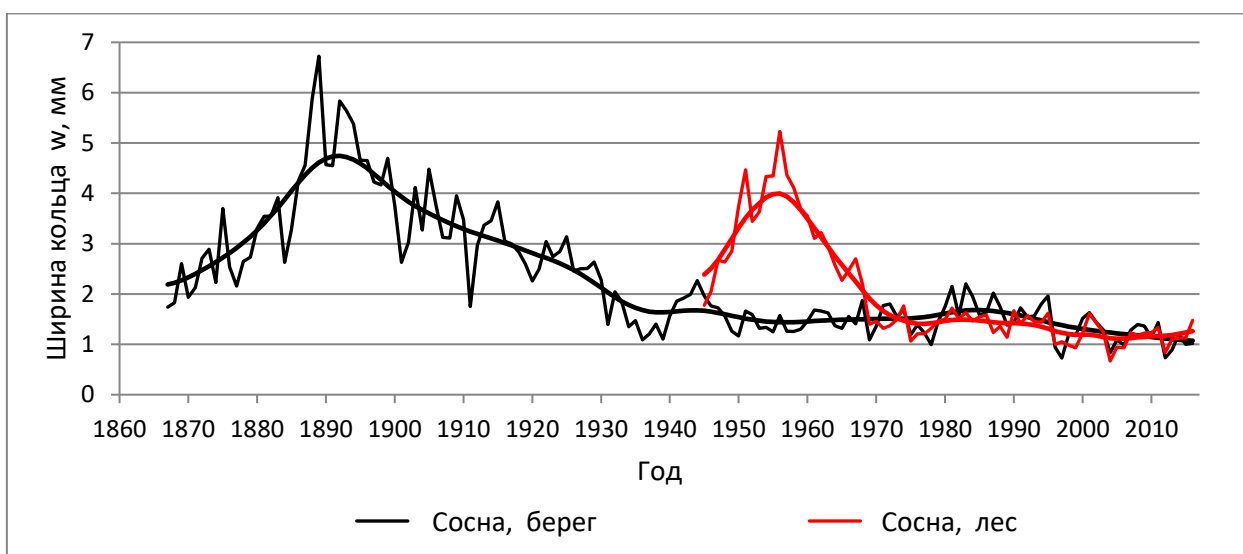


Рис. 1. Хронологии абсолютного радиального прироста сосны на участках.

В первые 25 лет жизни радиальный прирост сосны на береговом участке был сравнительно низким, что указывает на ее произрастание в сомкнутом молодняке. В 1884 г., судя по резкому падению прироста, произошел беглый низовой пожар, вследствие которого выжившие деревья, получив дополнительные ресурсы пространства и зольного питания, затем намного усилили свой прирост. Максимума прироста (около 6 мм) они достигли в 1890 г. в возрасте 30 лет, вступив к этому времени в фазу начала семеношения. По мере усиления роли генеративных фитогормонов ширина колец постепенно уменьшалась, в фазе стационарного роста с возраста около 70 лет она флуктуировала на уровне 1-2 мм.

Сравнительно высокие в целом показатели прироста, длительно сохранявшиеся в начале XX столетия, свидетельствуют о редкостойном характере насаждения. Его поддержанию способствовали как периодические низовые пожары, распространявшиеся из поймы Пышмы, так, очевидно, и постоянная выборочная вырубка сопутствующих лиственных пород на нужды окрестного населения, для которого участок всегда находился в зоне ближайшего доступа. Судя по сильному долговременному уменьшению механической устойчивости древостоя, произошедшей после 1915 г., причиной тому могли быть мобилизационные рубки периода Первой мировой войны. О пожарах свидетельствуют резкие падения прироста в 1901 и 1911 гг. с последующим его скорым увеличением. После аналогичного падения прироста в 1931 г. такого восстановления не

произошло. Напротив, до конца 1930-ых годов, известных в более южных районах Западной Сибири и Казахстана как «саранчовые годы» (Формозов, 2013), наблюдается депрессия, очевидно, вызванная энтомо вредителями, в массе поражавшими леса в этот засушливый период.

С угасанием вспышки активности энтомо вредителей в 1940 г. начинается восстановление выживших сосен, по 1949 г. их прирост был относительно высоким. Обычно увеличение прироста деревьев старшего поколения в окрестностях Тюмени в этот период связывается с массовой вырубкой лесов в военные годы, этим же объясняется тот факт, что появление самого массового поколения деревьев в окрестностях города приходится именно на 1940-е годы. Однако, судя по данному случаю, причиной обновления лесов в этот период могло быть и их массовое повреждение энтомо вредителями в 1930-е годы.

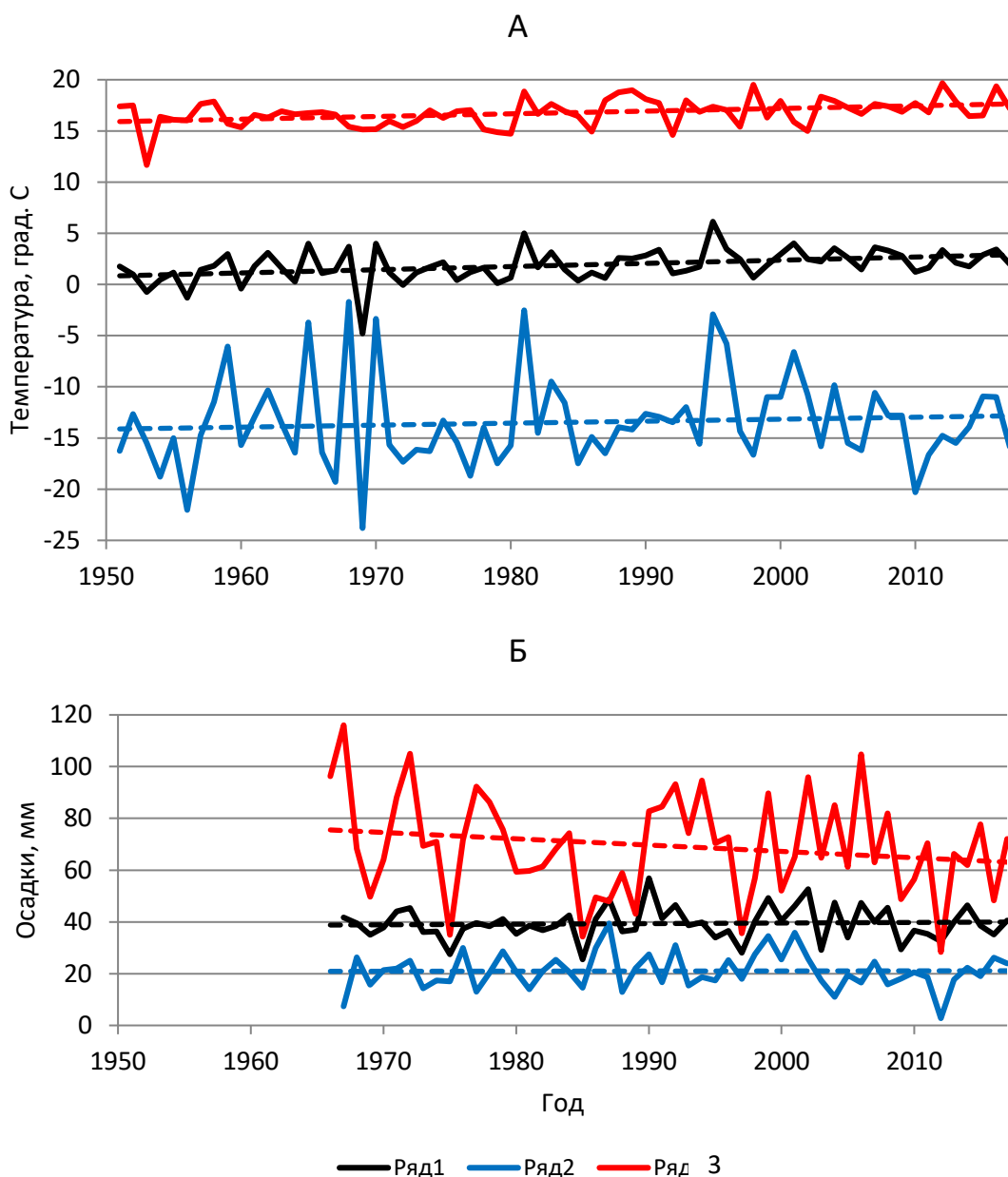


Рис. 2. Многолетняя динамика температуры воздуха (А) и количества осадков (Б) по метеостанции Тюмень. Показатели годовые (1), зимние (2), летние (3).



Рис. 3. Динамика площадей пожаров и поврежденных патогенами лесов на юге Тюменской области.

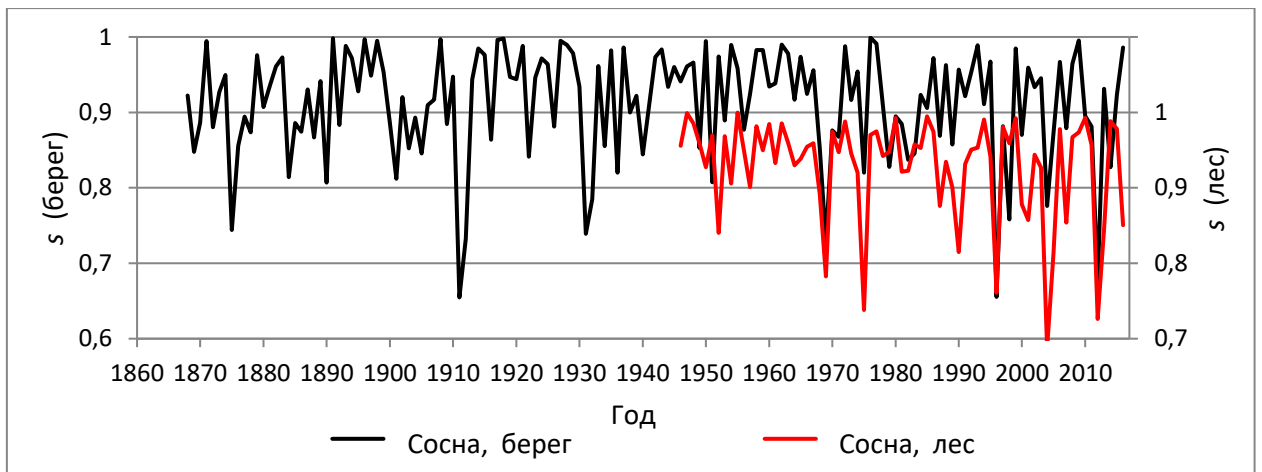


Рис. 4. Хронологии физиологической устойчивости сосны на участках.

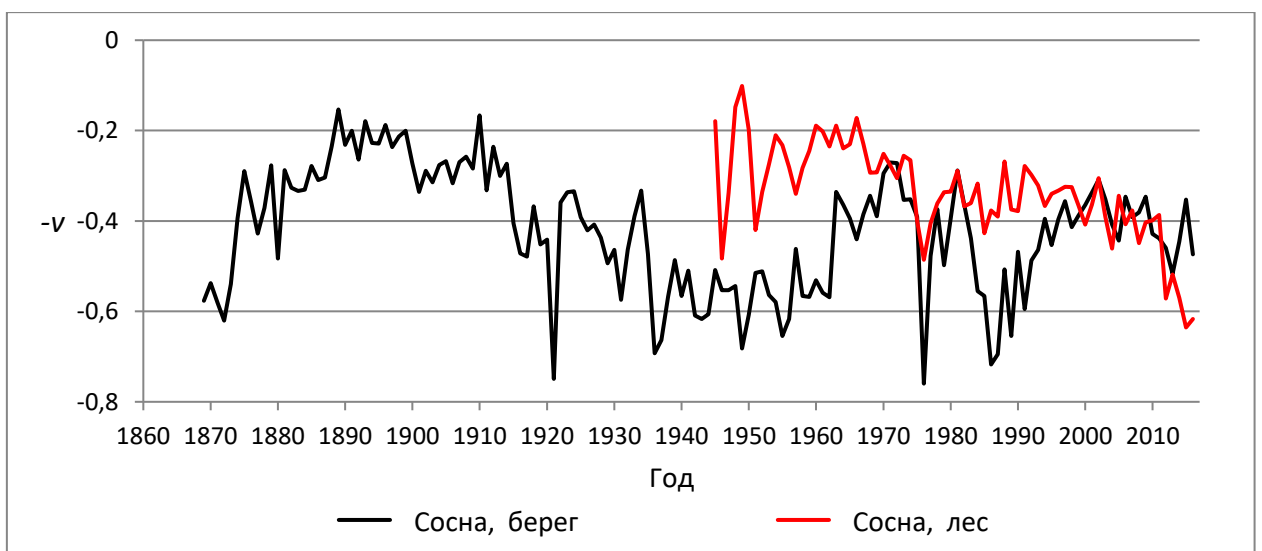


Рис. 5. Хронологии механической устойчивости сосны на участках.

Следующая, меньшая по силе вспышка активности энтомовредителей отмечается в засушливо-теплый период 1950-х гг. (рис. 2, 3). Крупная аномалия роста сосны приходится на 1968 г. Она была вызвана аномально высоким уровнем половодья, достигшим, очевидно, верхней надпойменной террасы и подтопившим корневую систему сосен, произрастающих на береговом участке. На втором, лесном участке, повышение уровня вод сказалось на прирост в меньшей степени.

В последние десятилетия отмечено уменьшение физиологической устойчивости береговой сосны, ее критические значения пришлись на засушливо-теплые годы: 1996-1998, 2004, 2012. Вместе с тем, подобные аномалии отмечались и ранее, поэтому тренд уменьшения физиологической устойчивости на этом участке за последние 150 лет почти не выражен (рис. 4). Механическая устойчивость древостоя за это время претерпевала существенные периодические изменения, но в целом уменьшалась (рис. 5). Наиболее устойчивая структура древостоя на береговом участке существовала до 1915 г. Тогда он представлял собой более или менее сомкнутое молодое, а затем средневозрастное смешанное насаждение, быстро восстанавливавшее свою полноту после беглых низовых пожаров и не представлявшее большого интереса в плане заготовки древесины.

К началу Первой мировой войны высота древостоя (I класс бонитета) достигла порядка 18-20 м, что уже позволило вести в нем выборочную рубку с изъятием значительной части деревьев. Оставшиеся сосны, получив дополнительные ресурсы для роста, но будучи неадаптированными к усилившимся ветровым нагрузкам оказались под угрозой слома или вывала. Для возвращения в устойчивое состояние они ускоренно наращивали не только нормальную, но и аномальную креневую древесину, образующуюся в виде широких темных колец с подветренной стороны ствола.

Продолжительность восстановления механической устойчивости древостоя определяется величиной изъятия деревьев и, соответственно, величиной сомкнутости. В спелых древостоях она может достигать порядка 10 лет и более. При сильном изреживании оставшиеся деревья уже не могут самостоятельно восстановить сомкнутость полога и остаются в состоянии не вполне восстановленной механической устойчивости до выхода в верхний ярус молодого поколения деревьев (если таковое имеется). С 1915 г. устойчивость структуры берегового древостоя в целом падала, достигнув минимума в 1940-ых годах, затем отмечается ее восстановление до начала 1970-х годов; так и не достигнув прежнего уровня, она вновь упала к 1986 г. Последующее восстановление древостоя достигло максимума в 2002 г., к настоящему его механическая устойчивость немного снизилась. Можно заключить, что сосна на береговом участке, пройдя длительную адаптацию к существованию в парковом насаждении, в целом находится в удовлетворительном состоянии.

На лесном участке сосна значительно моложе, нижняя дата ее ДКХ приходится на 1945 г., с учетом высоты отбора кернов на стволе дата начала роста сосны оценивается приблизительно 1940 годом, что соответствует отмеченному выше времени начала восстановления береговой сосны после вспышки активности энтомовредителей. Т.е. по своей возрастной группе сосна является спелой, достигшей оптимальной фазы развития. Отсутствие на участке экземпляров большего возраста (в окружающем лесу они изредка встречаются) может свидетельствовать о меньшей устойчивости сосны в этом менее дренированном биотопе. Действительно, судя по рис. 1, абсолютный прирост (производительность) сосны на лесном участке заметно меньше, чем на береговом как в фазе активного роста, на и в стационарной фазе. При этом максимума радиального прироста (около 5 мм в 1956 г.) сосна достигла здесь в два раза быстрее – в возрасте 15 лет. В возрасте 30 лет (1970 г.) ее прирост сравнялся с приростом береговой сосны, после чего динамика прироста сосны на обоих участках приняла в целом одинаковый вид. Лишь после аномальных условий 2012 г., сопровождавшихся гибелью части древостоя на лесном участке, оставшиеся деревья дали заметно более высокий прирост.

Оценка физиологической устойчивости сосны на лесном участке (рис. 4) дает в основном те же даты ее критических значений, что и на береговом (1968, 1975, 1996, 2004, 2012 гг.). При этом у нее не выражена аномалия 1998 г., но четко проявляется аномалия 1989-1990 гг. присутствующая в динамике пожаров и вредителей (рис. 3) Устойчивость прироста сосны на лесном участке имеет отчетливую тенденцию к уменьшению. На аналогичном временном отрезке с 1946 г. такую же тенденцию она имеет и на берегу, однако, как отмечалось выше, на более длительном временном фоне с 1867 г. физиологическая устойчивость береговой сосны остается почти неизменной.

Механическая устойчивость сосновой части древостоя на лесном участке не имеет столь значительных периодических колебаний, как на берегу (рис. 5). То есть, факторы, ее определяющие, были разными на двух этих участках. Очевидно, на берегу определяющим был антропогенный фактор (периодические рубки, в частности связанные с устройством пионерского лагеря и других объектов). В лесу изменение структуры древостоя шло эволюционно под воздействием в основном естественно-климатических и ценологических факторов – конкурентного угнетения и элиминации неустойчивых к этим факторам деревьев, усиливающейся при низовых пожарах и поражении энтомофитов (рис. 3). В целом выявлено постоянное снижение механической устойчивости лесного древостоя на протяжении его существования, особенно после аномально сухого лета 2012 г. Это согласуется с выявленной ранее тенденцией уменьшения устойчивости кедровых, сосновых и березовых древостоев на юге лесной зоны Западной Сибири, в частности в окрестностях Тюмени в XX-XXI столетиях (Арефьев, 1997, 2015). При этом длительно адаптированные к более жесткому погодно-климатическому режиму парковые редколесья оказываются более устойчивыми. Это можно объяснить, в частности, формированием у деревьев более толстой коры, устойчивой к пирогенному фактору, меньшим контактом деревьев, что препятствуют быстрому распространению патогенов.

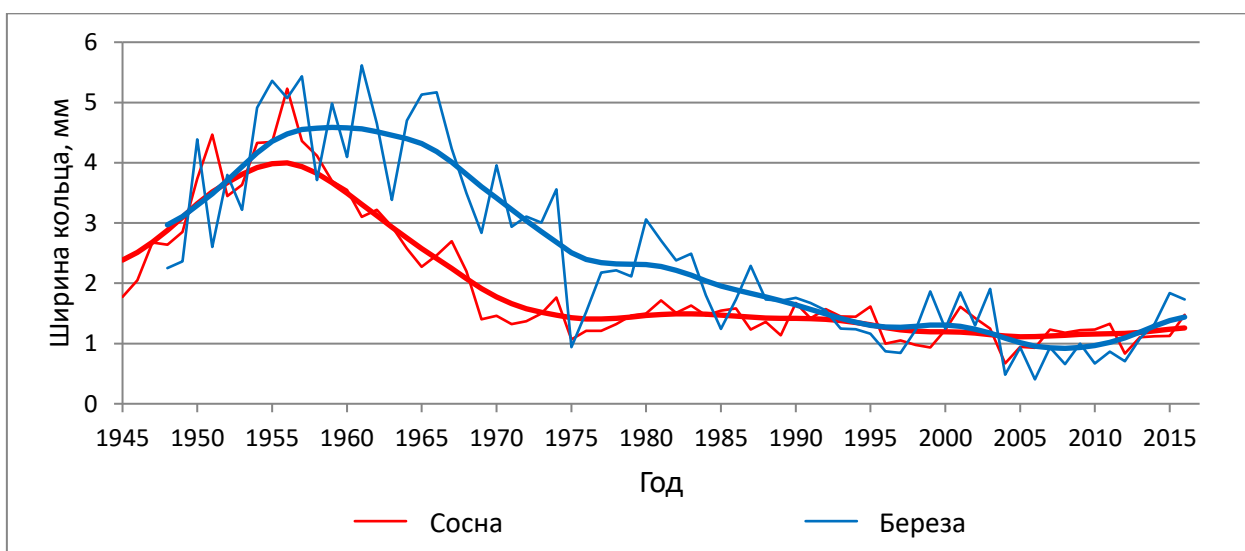


Рис. 6. Хронологии абсолютной ширины колец древесных пород на лесном участке.

Отчасти близкая, но отличающаяся картина наблюдается в ДКХ березы с лесного участка (рис. 6-8). Эта порода представлена единичными крупными деревьями, сохранившимися в проплешинах, образовавшихся после гибели части древостоя в 1975 и 1996 гг. Начало ДКХ датируется 1949 г., но, очевидно, береза, как и сосна, стала расти здесь с начала 1940-х годов. С 1990-х гг. береза по возрастной группе является перестойной. Переход мелколиственных пород деревьев в эту группу, характеризующуюся преобладанием деструктивных процессов в силу старения, происходит раньше, чем у сосны. В данном случае прирост березы достиг своего максимума на 6 лет позже (5,6 мм в

1961 г.), чем у сосны, и с этого времени на протяжении 30 лет (до 1993 г.) он был на 0,5-1,5 мм больше, чем у сосны. В 2004-2012 гг. стареющая береза давала уже меньший прирост. Однако после 2012 г. ее прирост вновь существенно превзошел прирост сосны, что может быть связано с устойчивостью березы к патогену, поразившему сосну в этот период.

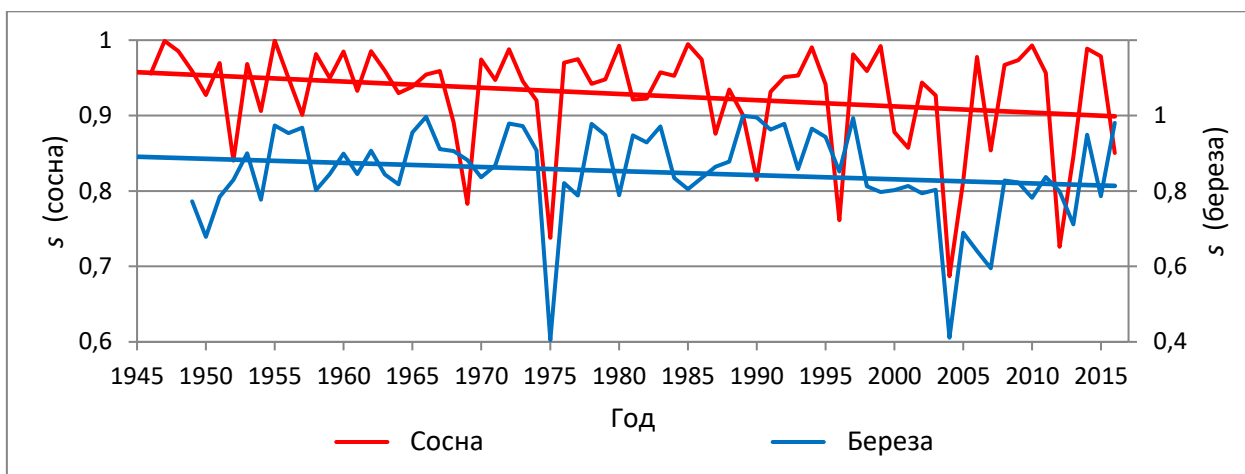


Рис. 7. Хронологии физиологической устойчивости древесных пород на лесном участке.

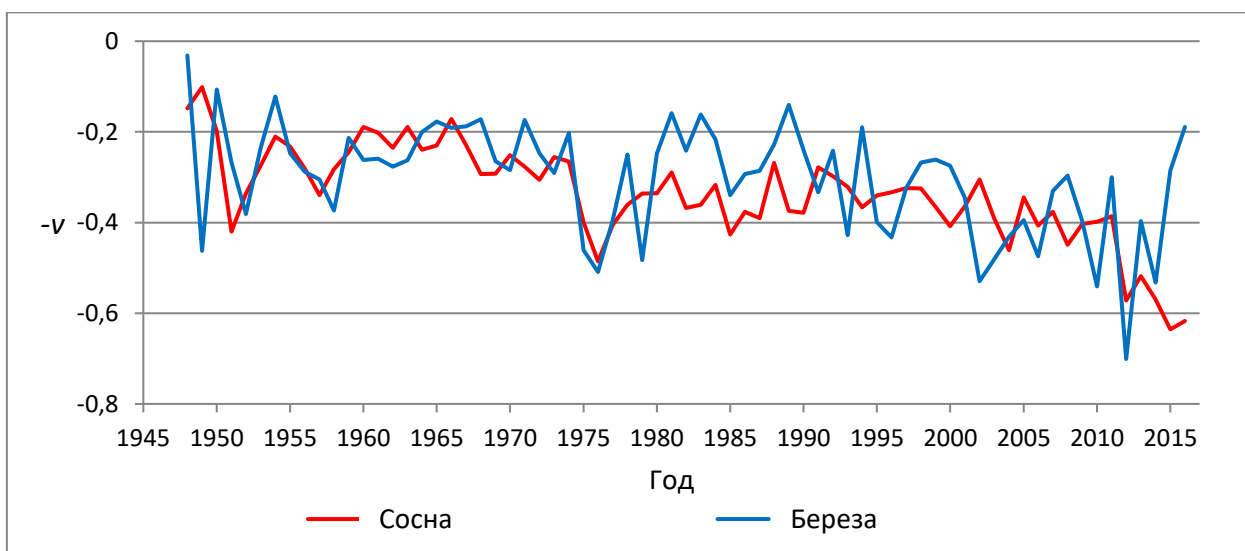


Рис. 8. Хронологии механической устойчивости древесных пород на лесном участке.

Физиологическая устойчивость березы в отличие от сосны увеличивалась после засухи 2004 г., а механическая устойчивость – после засухи 2012 г. (рис. 6-7). В целом же за весь период роста наблюдается примерно одинаковый тренд уменьшения устойчивости роста и структуры как сосновой, так и березовой части древостоя, что показывает неблагоприятную тенденцию климатических условий их существования.

Дендрохронологический анализ цикличности природных процессов

Рассмотрение хронологий радиального прироста деревьев показало присутствие в нем абиотических, ценологических и антропогенных составляющих, последние из которых своей нерегулярностью усложняют выявление климатических и природно-циклических закономерностей. Это особенно относится к ДКХ сосны с берегового участка, представляющей наибольший интерес в силу значительной продолжительности ряда.

Стандартизация ее абсолютного прироста методом негативной экспоненты (рис. 9) показывает длительную депрессию прироста, продолжавшуюся с 1930-ых до начала 1970-ых годов. Она проявляется при расчетах \dot{w} как по всему ряду, так и при отбрасывании восходящей и максимальной части ряда, не подчиняющихся экспоненциальной зависимости. Многолетнее увеличение прироста с 1970-ых годов, демонстрируемое этим методом, связано с антропогенным фактором и не позволят судить об изменениях природного фона. Стандартизация прироста методом двойного экспоненциального сплайна, нивелирующим многолетние изменения ширины колец (как антропогенные, так и природно-обусловленные) во много свободна от этих недостатков, что позволяет использовать ряды \dot{w} при расчете климатической регрессии, но не позволяет судить о многолетних трендах и циклах.

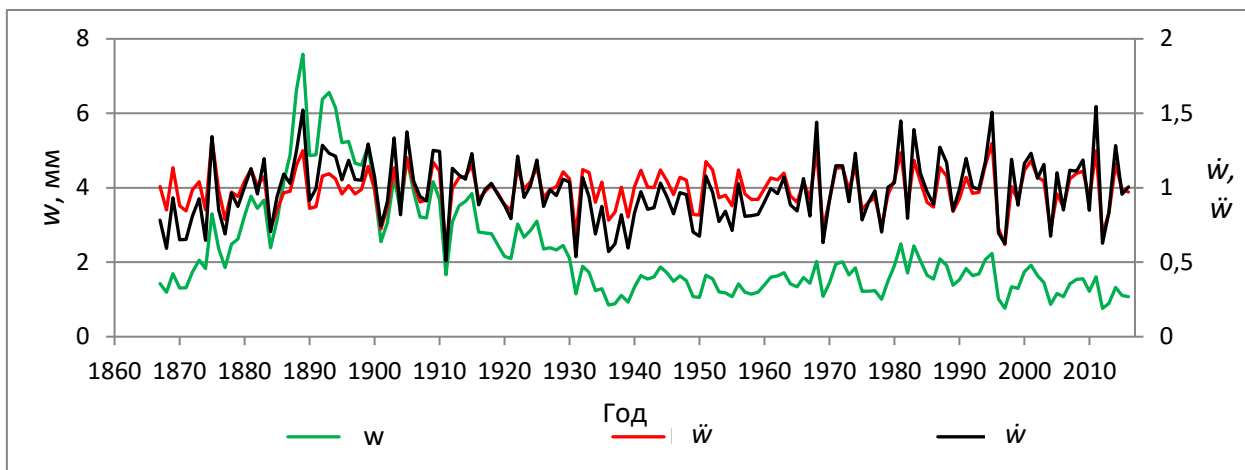


Рис. 9. Береговой участок. Хронология абсолютной ширины колец сосны (w) и ее стандартизация методами негативной экспоненты (\dot{w}) и двойного экспоненциального сплайна (\ddot{w}).

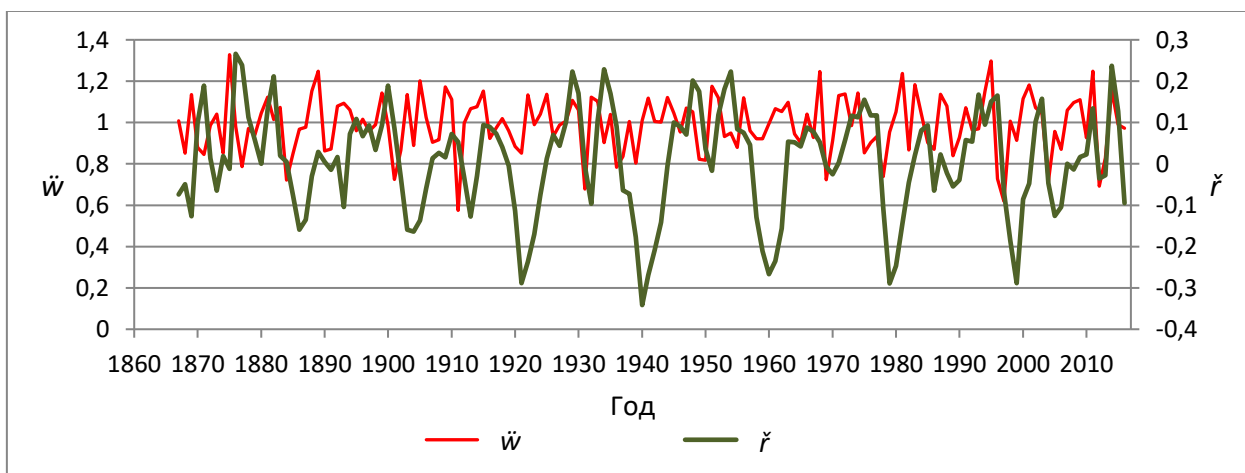


Рис. 10. Береговой участок, сосна. Лунный денлинционный цикл, выявленный скользящей корреляцией $\check{r}(\dot{w};t)$ с фильтром 19 лет по ряду индексов \dot{w} экспоненциального сплайна прироста.

Применяемые при анализе трудно формализуемых рядов линейные фильтры во многом восполняет этот недостаток. Преобразование хронологии индексов \dot{w} в хронологии скользящей корреляции \check{r} с использованием 19-летнего фильтра показало наличие в приросте береговой сосны четкого природного цикла протяженностью в среднем 18,6 лет, практически не нарушаемого разнообразными антропогенными вмешательствами и не заметного в исходных рядах (рис. 10). Цикл этот широко известен в различных природных

явлениях, в частности в океанологии, как лунный деклинационный прилив, образующийся в результате гравитационного взаимодействия Луны и Солнца (Максимов, 1970; Яворский, 1975, Шиятов, 1986). Цикл проявляется в колебаниях уровня природных вод, а также некоторых форм атмосферной циркуляции, определяющих климато-гидрологический режим биотопа. Его минимумы, приходящиеся чаще на конец неблагоприятных периодов роста береговой сосны отмечены в 1869, 1886, 1904, 1921, 1940, 1960, 1980, 1999, 2017 гг. Кроме того, наибольшая амплитуда этого цикла приходится на конец самой глубокой депрессии прироста сосны 1930-х гг., связанной с засухой и активизацией энтомовредителей; в обе стороны от 1940 г. амплитуда цикла уменьшается, что показывает наличие более масштабного векового цикла воздействия факторов аналогичной природы.

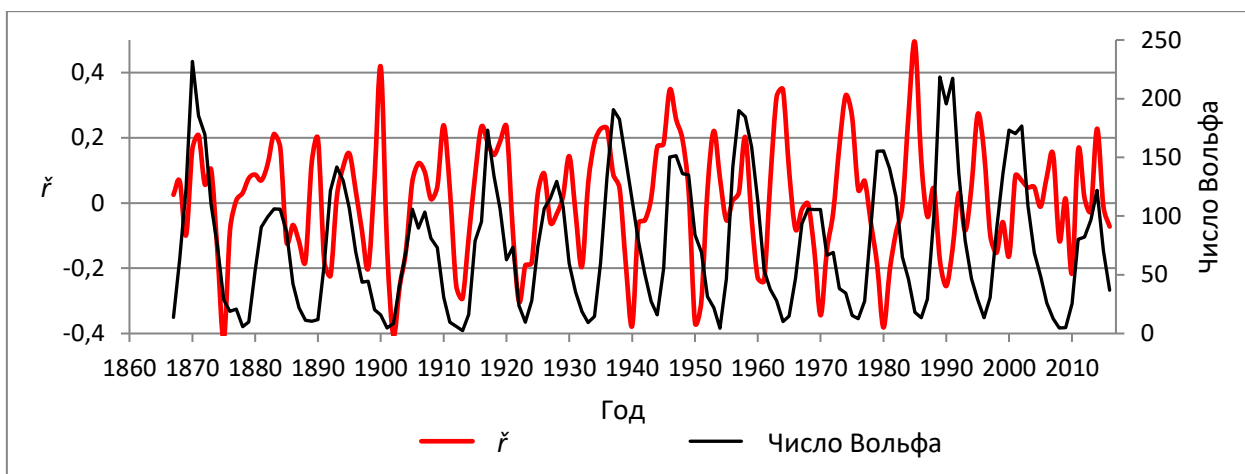


Рис. 11. Береговой участок, сосна. Цикл со средней длиной 9,8 лет, выявленный скользящей корреляцией $\hat{r}(\hat{w};t)$ с фильтром 11 лет и его соотношение с циклом солнечной активности.

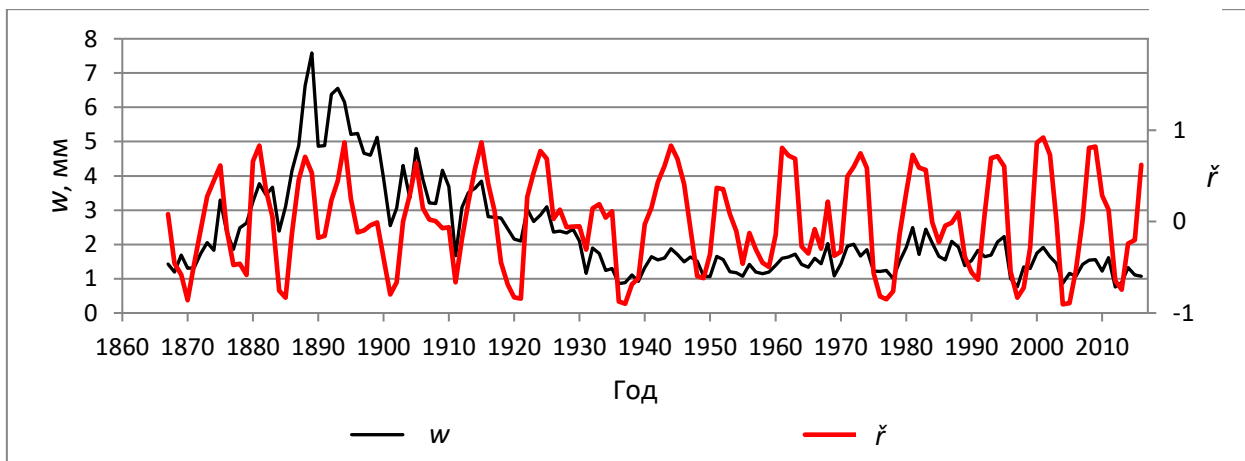


Рис. 12. Береговой участок, сосна. Хронология абсолютной ширины кольца w и ее скользящая корреляция $\hat{r}(\hat{w};t)$ с фильтром 5 лет (циклы длиной около 7,1 и 9,8 лет)

Изменение длины фильтра позволяет выявить другие природные циклы. Фильтр в 11 лет показывает наличие цикла со средней длиной 9,8 лет, особенно четко проявляющегося в средней части ряда (рис. 11). Этот цикл близок к известному 11-летнему циклу солнечной активности и, возможно является производным от него. До 1930-х годов эти циклы в значительной степени совпадают и максимумы прироста береговой сосны приходятся на максимумы солнечной активности. Затем их синхронность уменьшается

вплоть до полной асинхронности в период 1960-1990-х годах. Последние по времени максимумы обоих циклов вновь накладываются друг на друга. Можно предположить, что реакция деревьев на солнечную активность в рамках ее 11-летнего цикла изменяется в зависимости от погодно-климатических условий, в частности, во благоприятные периоды она положительная, а в засушливые – отрицательная.

Выявление природных циклов посредством линейных фильтров возможно и на рядах абсолютной ширины кольца (рис. 12). При этом использование коротких фильтров позволяет четко определить циклы, по своей длине близкие к длине фильтра. Так, 5-летний фильтр проявляет в приросте береговой сосны циклы длиной 7,1-7,5 и 9,8 лет, достоверно подтверждаемые методом Фурье (рис. 13). Фильтр длиной 3 года достоверно проявляет циклы длиной 4,8; 5,8-6,0 и 7,1 лет. Примечательно, что цикл длиной 5,8-6,0 лет, возникающий в результате действия приливообразующих сил Луны и Солнца (Яворский и др., 1979), выявлен нами как основной при дендрохронологической реконструкции формирования бугра-предшественника ямальской газовой воронки (Арефьев и др., 2017).

При использовании более длинных фильтров цикличность на основе рядов абсолютной ширины кольца несколько искажается на отрезке возрастного пика прироста, однако выявленный выше лунный деклинационный цикл (18,6 лет) хорошо проявляется фильтрами длиной от 7 до 13 лет. Фильтрами длиной 9-21 год достоверно выявляется малый цикл Брикнера длиной 27-30 лет, однако преобладают более длинные квази-циклы возрастной природы. Автокорреляция с использованием небольших (до 31 года) перекрывающихся участков также дает квази-циклы большей длины, которые могут свидетельствовать и о действительном присутствии циклов такой продолжительности (рис. 13).

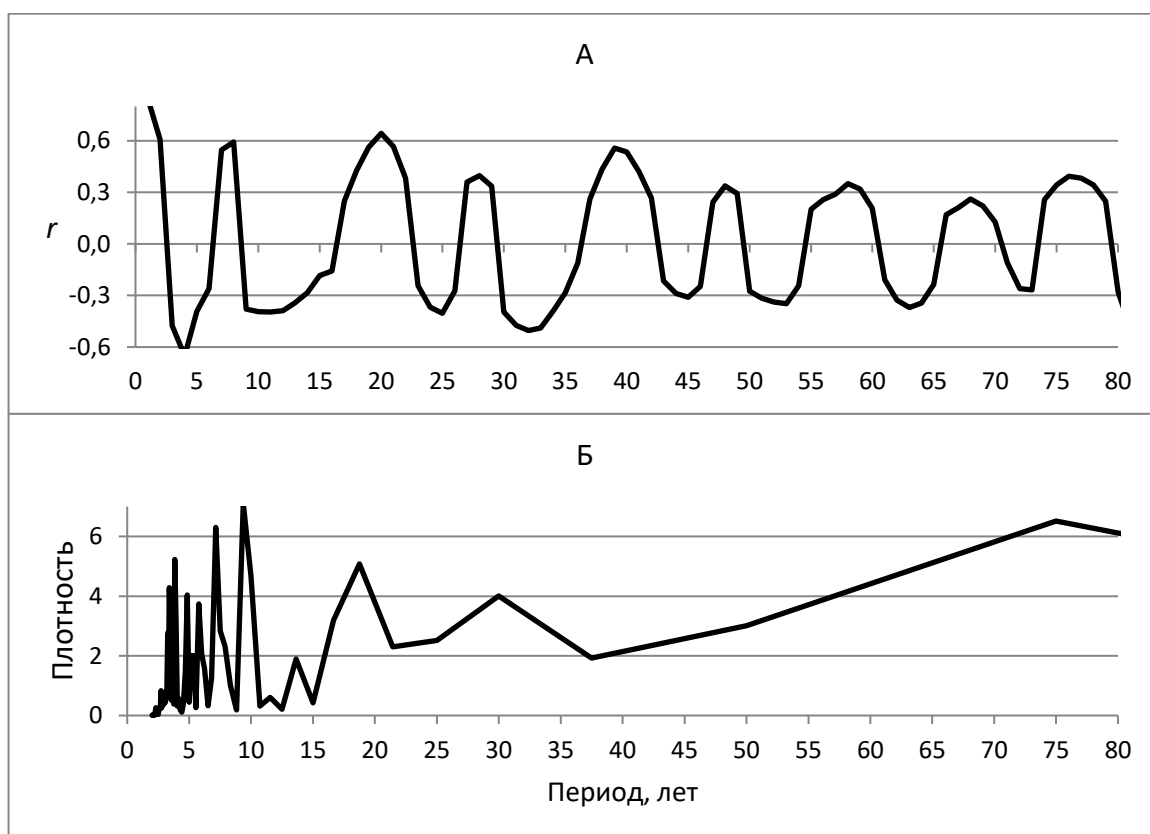


Рис. 13. Береговой участок, сосна. Циклы, выявленные при скользящей корреляции ряда абсолютной ширины колец $\check{r}(w;t)$ с фильтрами от 3 до 21 года с использованием автокорреляции (А) и спектрального анализа Фурье (Б).

При усреднении всех значений скользящей корреляции \check{r} с фильтрами от 3 до 21 года воспроизводится ряд, по форме близкий к исходному ряду ширины колец, но с очень

ослабленной возрастной составляющей; на стационарном отрезке (с 1940 г.) исходный и усредненный регрессионный ряды практически конгруэнтны (рис. 14).

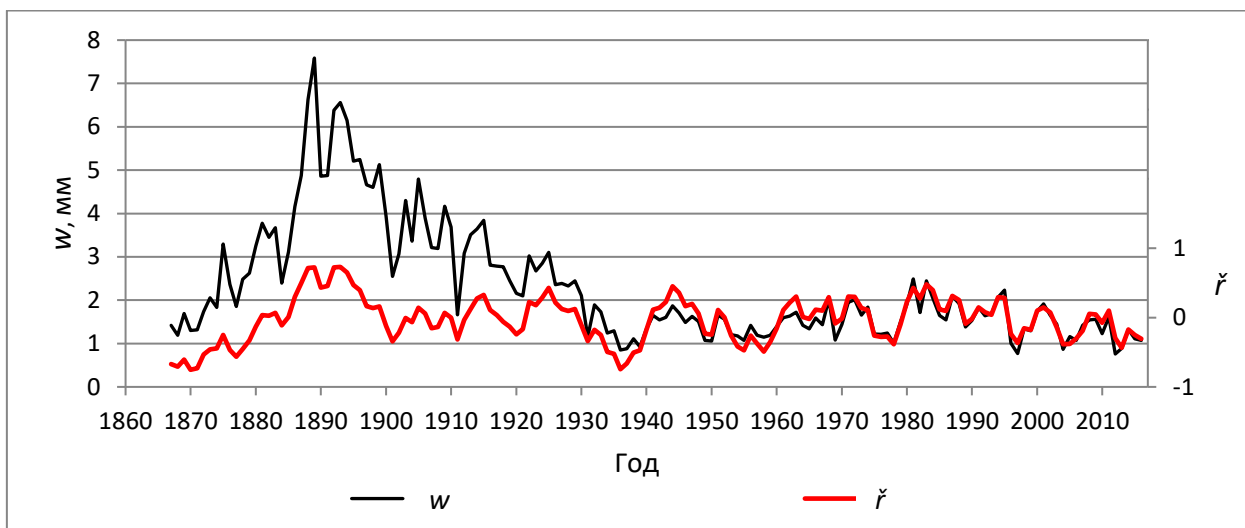


Рис. 14. Береговой участок, сосна. Хронология абсолютной ширины кольца и ее усредненная скользящая корреляция $\tilde{r}(w;t)$ с фильтрами 3, 5, ... 21 год.

Ряды устойчивости роста деревьев s , в основе которых положено соотношение ширины колец двух смежных лет, практически не содержат возрастной компоненты прироста и мало подвержены многолетнему влиянию антропогенных факторов. Это в принципе позволяет использовать их для определения природных циклов устойчивости без дополнительных преобразований, однако метод линейных фильтров демонстрирует их с наибольшей четкостью. Устойчивость прироста деревьев в значительной степени связана с величиной прироста и во многих случаях может рассматриваться в качестве ее косвенного показателя: чем выше устойчивость прироста, тем выше и прирост (рис. 15).

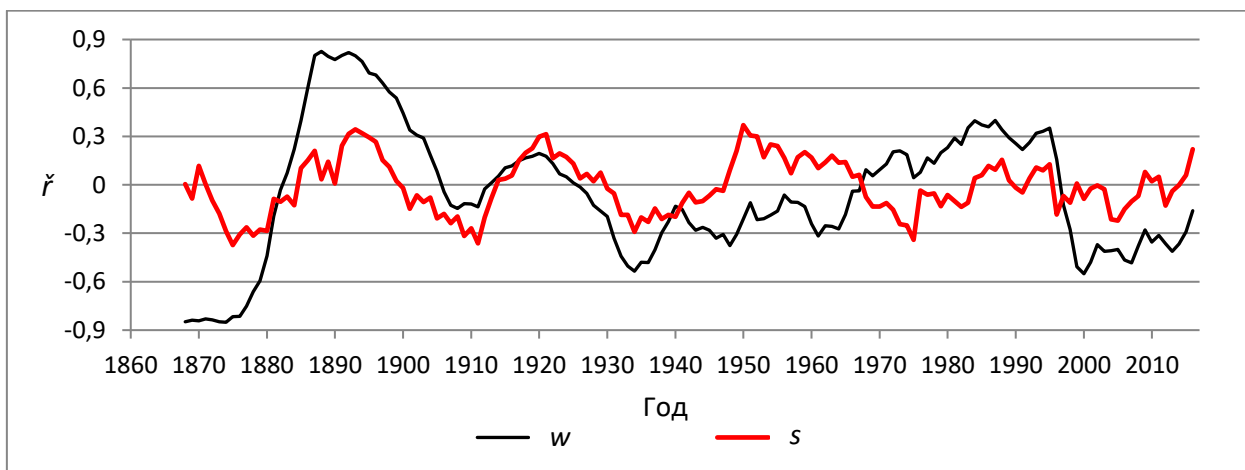


Рис. 15. Береговой участок, сосна. Цикл длиной 30 лет, выявленный скользящей корреляцией \tilde{r} с фильтром 21 год по рядам абсолютной ширины кольца (w) и устойчивости прироста (s).

Из рисунка 15 видно, что до 1940-х годов многолетние изменения ширины колец w и устойчивости прироста s практически полностью соответствовали друг другу в рамках 30-летнего цикла (малый цикл Брикнера), период возрастного пика прироста в 1880-1889-х

гг. совпадал с периодом максимальной физиологической устойчивости. В дальнейшем, с 1940-ых гг. синхронность этих параметров уменьшилась, что можно объяснить воздействием нерегулярных антропогенных факторов. Однако она не перестала проявляться, в целом корреляция между рядами прироста и устойчивости составила 0,43. При этом 30-летняя цикличность значительно более четко прослеживается по ряду устойчивости, нежели по ряду прироста, что показывает меньшую чувствительность ряда устойчивости к случайным нерегулярным флуктуациям.

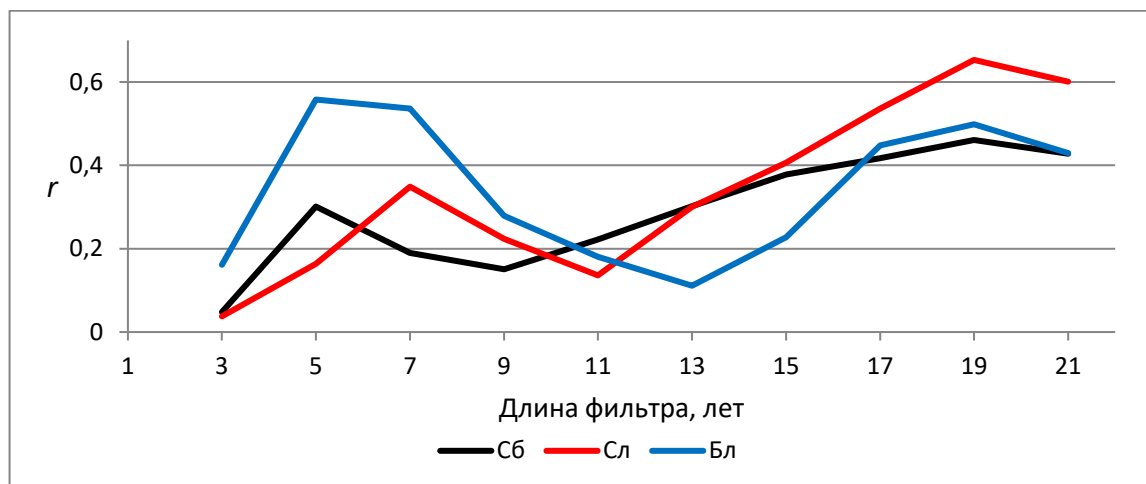


Рис. 16. Изменение синхронности рядов величины прироста деревьев w и устойчивости прироста s в зависимости от длины фильтра, используемого при расчете скользящей корреляции \check{r} . Сб – сосна с берегового участка, Сл – сосна с лесного участка, Бл – береза с лесного участка.

В целом синхронность рядов прироста и его устойчивости прироста возрастает с увеличением длины фильтра, используемого при выявлении цикличности (рис. 16). Максимальная синхронность во всех исследованных случаях отмечается при 19-летнем фильтре скользящей корреляции \check{r} . Это показывает целесообразность использования параметра устойчивости прироста s для выявления наиболее длительных внутривековых и вековых циклов, что обычно проблематично при работе с ДКХ юга лесной зоны. Вместе с тем повышенная синхронность этих параметров наблюдается и при использовании 5-7-летних фильтров, что показывает близость циклов прироста и его устойчивости в соизмеримом с длиной фильтра временном интервале. В интервале 9-15 лет величина прироста и его устойчивость характеризуются разной цикличностью. Это может быть связано с разными условиями, необходимыми для роста деревьев, с одной стороны, и активизации патогенов (например, энтомовредителей), с другой, при том, что низкая устойчивость прироста деревьев на юге лесной зоны обычно сопряжена с их поражением вредителями и болезнями.

Как и в случае рядом абсолютной ширины колец, исходный ряд устойчивости s практически полностью воспроизводится рядом усредненных значений скользящей корреляции $\check{r}(s;t)$ для фильтров длиной от 3 до 21 года (рис. 17). Использование 19-летнего фильтра выявляет 29-30-летний цикл устойчивости прироста, а 11-летнего – цикл длиной 15,5-17,5 лет, выраженный в колебаниях целого ряда климатических, гидрологических, циркуляционных характеристик (Максимов, 1970) и древесно-кольцевых хронологиях (Douglass, 1936; Штятов, 1986) (рис. 18-19).

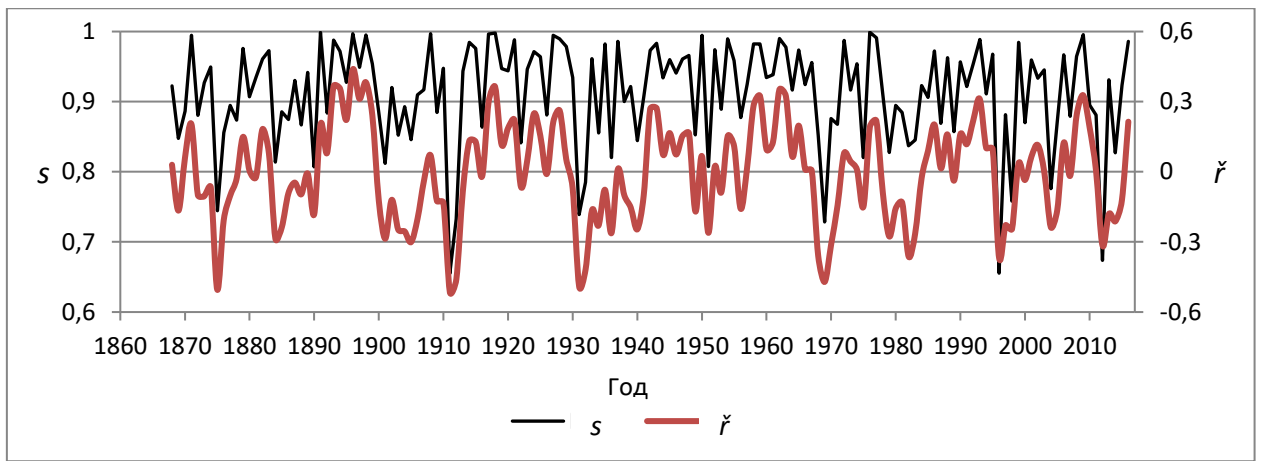


Рис. 17. Береговой участок. Хронология устойчивости прироста s сосны и ее усредненная скользящая корреляция $\check{r}(s;t)$ с фильтрами 3, 5, ... 21 год.

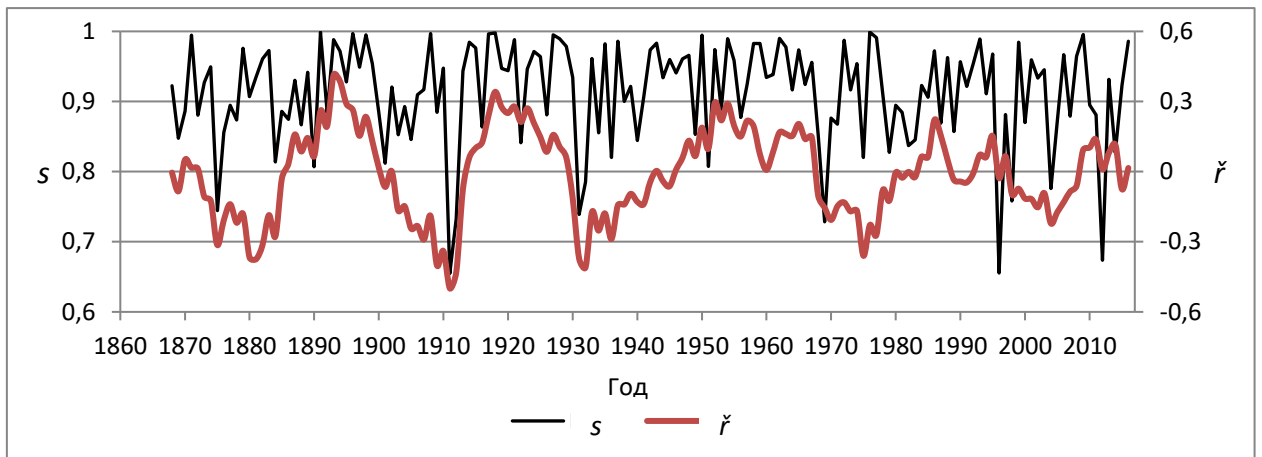


Рис. 18. Береговой участок. Хронология устойчивости прироста s сосны и ее скользящая корреляция $\check{r}(s;t)$ с фильтром 19 лет (доминирует цикл длиной 29-30 лет).

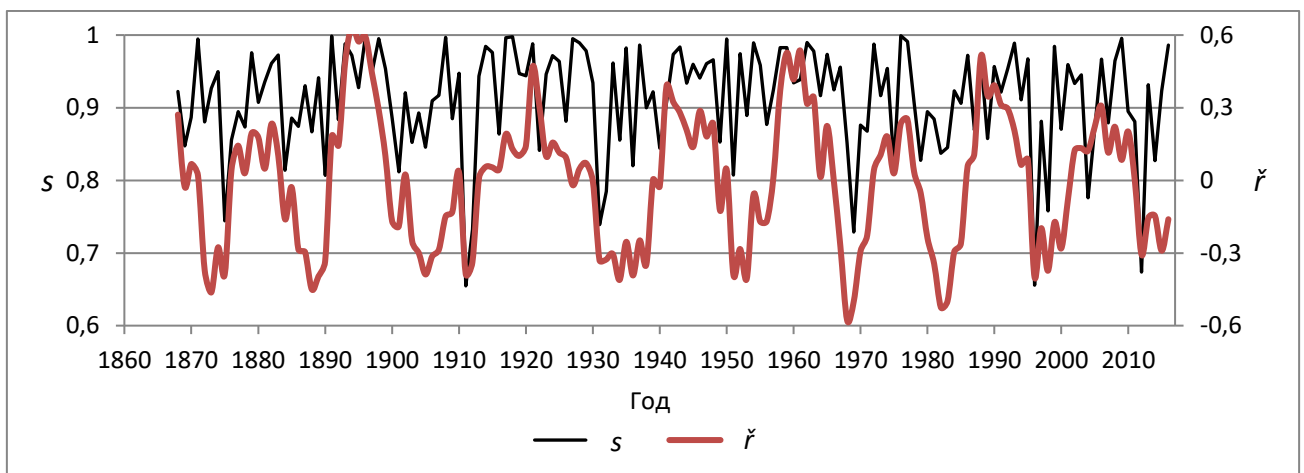


Рис. 19. Береговой участок. Хронология устойчивости прироста s сосны и ее скользящая корреляция $\check{r}(s;t)$ с фильтром 11 лет (доминирует цикл длиной 15,5-17,5 лет).

Аналогичная цикличность выявлена и на сравнительно короткой хронологии устойчивости роста сосны с лесного участка (рис. 20). С 5-летним фильтром скользящей корреляции установлен цикл длиной около 7 лет, с 11-летним – цикл длиной около 17 лет, с 19-летним – цикл длиной 29-30 лет. На хронологии устойчивости роста березы с использованием фильтров в 5, 15 и 19 лет выявлены циклы длиной, соответственно, около 7, 15 и 29-30 лет (рис. 21).

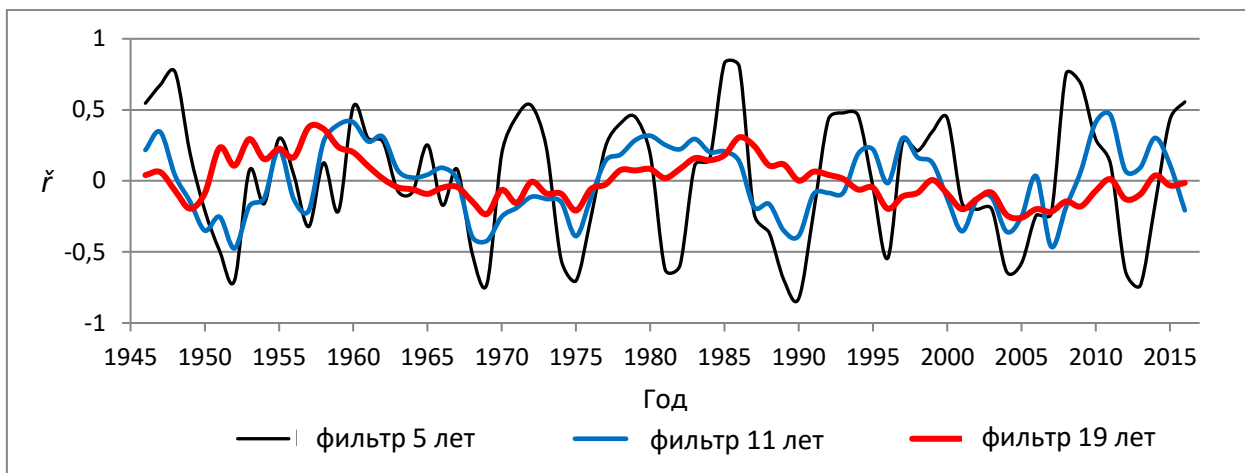


Рис. 20. Лесной участок, сосна. Скользящая корреляция ряда устойчивости прироста $\hat{r}(s;t)$ с фильтрами 5, 11 и 19 лет.

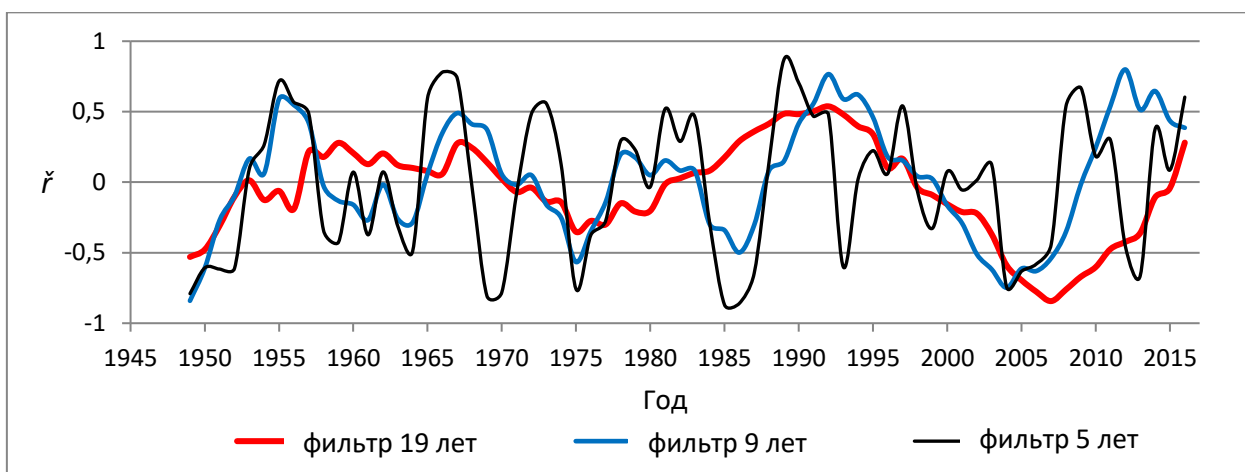


Рис. 21. Лесной участок, береза. Скользящая корреляция ряда устойчивости прироста $\hat{r}(s;t)$ с фильтрами 5, 15 и 19 лет.

Таким образом, анализ рядов прироста и его устойчивости методом линейных фильтров с использованием скользящей корреляции показал наличие наиболее устойчивых природных циклов, длиной 29-30; 18,6; 15,5-17,5; 9,8; 7,1-7,5; 5,8-6,0 лет, определяющих состояние биотопов и древесных растений-эдификаторов. Использование коротких 3-5 летних фильтров позволило выявить циклы еще меньшей длины.

Регрессионный дендроклиматический анализ

На юге лесной зоны Западной Сибири прирост деревьев обычно характеризуется невысоким уровнем связи с климатическими факторами (Агафонов, 2011). Причиной тому как значительное разнообразие этих факторов в отсутствии жесткого климатического лимитирования прироста, так и влияние на него разнообразных неклиматических факторов,

в т.ч. абиотических (изменчивость уровня грунтовых и поверхностных вод, пожары и др.), биотических (ценотические, вредители, болезни), антропогенных (рубки, пожары и др.). В результате кольцевые ряды образуют сложную гармонику, сильно «зашумленную» случайными факторами и трудно поддающуюся формализации. Поэтому при поиске дендроклиматических закономерностей нами было рассмотрено два варианта индексов прироста: \dot{w} (негативной экспоненты) и \ddot{w} (двойного экспоненциального сплайна). Для анализа были использованы месячные показатели средней температуры воздуха (с 1951 г.) и количества осадков (с 1965 г.) за 17 месяцев с мая года $t-1$, предшествовавшего году образования кольца, по сентябрь года t образования кольца.

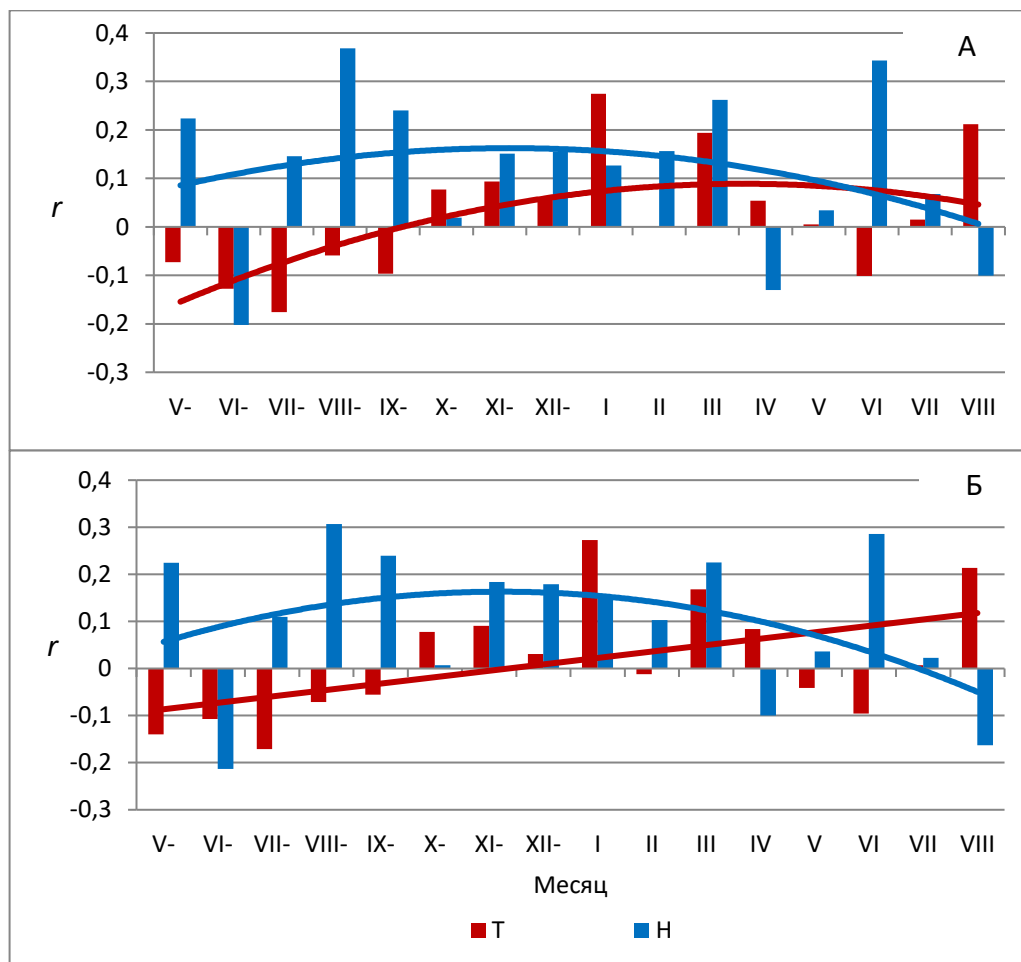


Рис. 22. Парная корреляция прироста сосны на береговом участке со средней месячной температурой воздуха (Т) и количеством осадков (Н) в год образования кольца и предыдущий период. А – индексы экспоненциального сплайна \ddot{w} , Б – индексы негативной экспоненты \dot{w} .

Расчет коэффициентов парной корреляции между рядом индексов прироста береговой сосны с рядом каждого из этих месячных климатических параметров дал практически одинаковую картину для обоих рассматриваемых индексов, при этом для индексов \dot{w} значения корреляции оказались немного выше (рис. 22). Полагаем, что такая оценка дендроклиматических связей наиболее целесообразна с точки зрения своей однозначности и физического смысла, в то время как поиск значимых частных связей в многофакторных регрессионных моделях часто приводит к неоднозначным результатам и более полезен в качестве математического механизма оценки равнодействующей силы влияния климатических факторов.

Наибольший, хотя и не высокий уровень парной корреляции прироста сосны отмечен с количеством осадков в марте и июне года образования кольца и, особенно, в августе предыдущего года (соответственно, 0,34, 0,26 и 0,37 при критическом уровне значимости 0,25). Корреляция с температурой воздуха в целом ниже и не превышает 0,27 (это значение приходится на январь). Остальные корреляции не достигают достоверного уровня, однако показательны на уровне устойчивых тенденций.

Показательно, что влияние температуры воздуха и количества осадков на прирост оказалось во многом противофазно. Это особенно четко прослеживается в летний период года образования кольца с мая по август. Известный в регионе феномен «майско-июньской засухи» закономерно характеризуется положительной связью прироста сосны с температурой воздуха и отрицательной связью с количеством осадков. Причем, судя по абсолютному значению коэффициента корреляции, при засухе количество осадков в большей степени влияет на ширину кольца, нежели температура воздуха. В несколько меньшей степени подобная ситуация распространяется на май и июль. В августе же ситуация меняется на противоположную: большое количество осадков влияет на прирост отрицательно, а высокая температура воздуха – положительно.

Высокие летние температуры воздуха предыдущего года в целом уменьшают ширину кольца года, а последующие относительно высокие температуры воздуха сезона покоя с октября по март (особенно в январе), напротив, приводят к ее увеличению. Очевидно, относительно теплые зимы на береговом обдуваемом участке способствуют лучшей сохранности корневой системы сосны, чувствительной к промерзанию почвы (Николаев, Скачков, 2012). Об этом же свидетельствует положительная связь прироста береговой сосны с количеством осадков в предыдущий снежный период года: высокий снежный покров защищает корневую систему от глубокого промерзания и аномально низких температур.

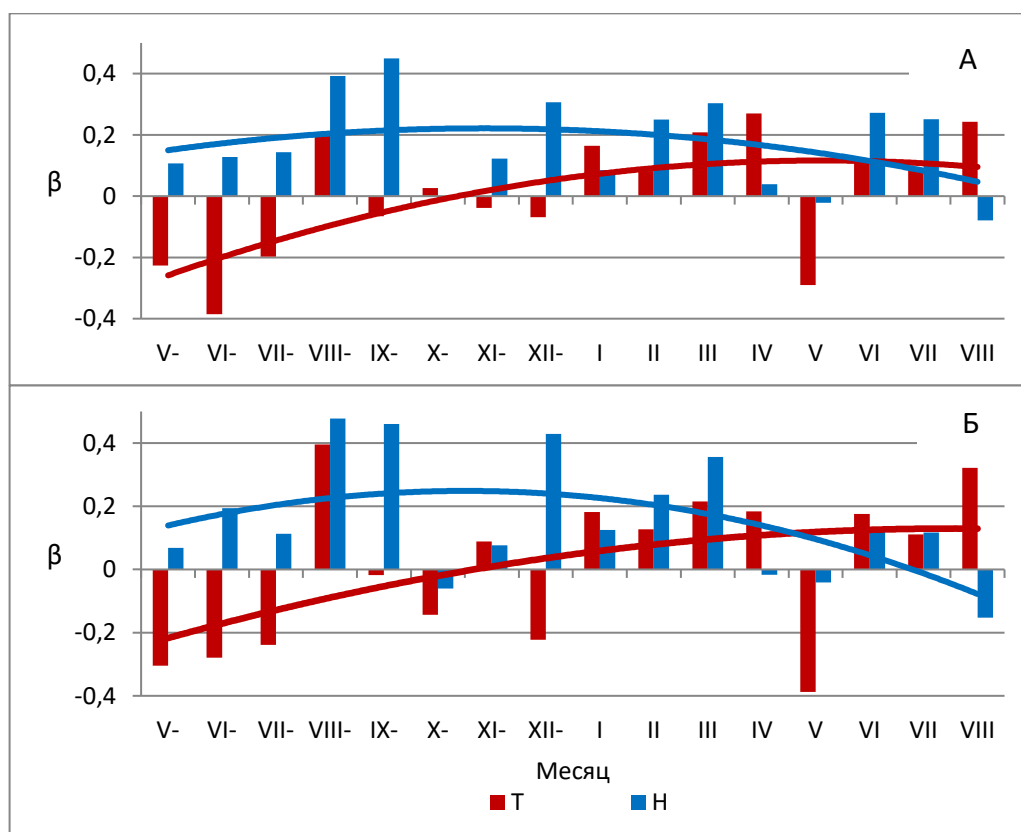


Рис. 23. Нормированные коэффициенты β множественной регрессии прироста сосны на береговом участке по средней месячной температуре воздуха (Т) и количеству осадков (Н) в год образования кольца и предыдущий период. А – индексы \dot{w} экспоненциального сплайна, Б – индексы \dot{w} негативной экспоненты.

Оценка связи прироста береговой сосны с названными климатическими факторами посредством нормированного коэффициента β в рамках модели множественной регрессии также не показала существенных различий для двух рассматриваемых индексов прироста \dot{w} и \ddot{w} (рис. 23). Близкими оказались и оценки связи пророста с климатическими факторами, сделанные в рамках парной и множественной корреляции (рис. 22-23). Однако сведение моделей множественной регрессии до значимых компонентов показало существенные отличия их состава для рассматриваемых индексов прироста (рис. 24). Для обеих моделей значимыми оказались температура воздуха в августе года образования кольца и количество осадков в августе, сентябре и декабре предыдущего года. То есть, совпало 8 из 20 значимых компонентов. В некоторых случаях несовпадения значимые факторы близки. Так, если для индекса \ddot{w} значима температура воздуха в июне предыдущего года ($\beta = -0,48$), то для индекса \dot{w} – в смежных с ним мае и июле ($-0,37$ и $-0,42$).

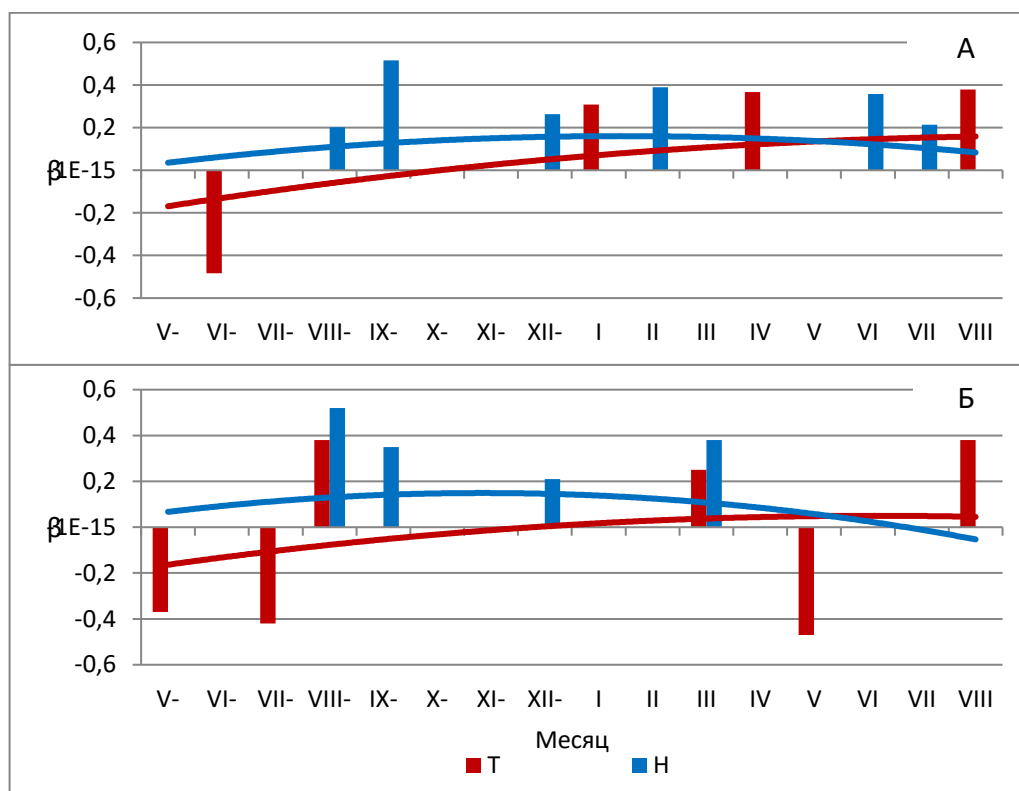


Рис. 24. Значимые нормированные коэффициенты β множественной регрессии прироста сосны на береговом участке по средней месячной температуре воздуха (Т) и количеству осадков (Н) в год образования кольца и предыдущий период. А – индексы \dot{w} экспоненциального сплайна, Б – индексы \ddot{w} негативной экспоненты.

В других случаях несовпадение объясняется, вероятно, тем, что программа выбирает из нескольких близких по силе факторов то их сочетание, которое дает наиболее достоверную модель множественной регрессии. При этом значимые на более ранних шагах факторы на завершающем этапе моделирования могут выпадать, значимость же оставшихся увеличивается. Так для индексов \dot{w} влияние температуры воздуха в мае года образования кольца на начальном шаге построения регрессионной модели было вторым по значимости ($\beta = -0,29$), на конечном шаге этот фактор отсутствует, но он сохраняется на конечном шаге регрессии ряда индексов \dot{w} ($\beta = -0,47$). В целом в конечной модели регрессии по индексу прироста \dot{w} преобладают факторы температуры воздуха, в модели по индексу \ddot{w} – факторы количества осадков. Обе модели в высокой степени достоверны ($p = 0,000$), но величина множественной корреляции во втором случае выше (соответственно, R

$= 0,80$; $R_{adj} = 0,62$ и $R = 0,85$; $R_{adj} = 0,65$), что позволяет использовать при дальнейшем анализе индексы \dot{w} двойного экспоненциального сплайна рядов прироста.

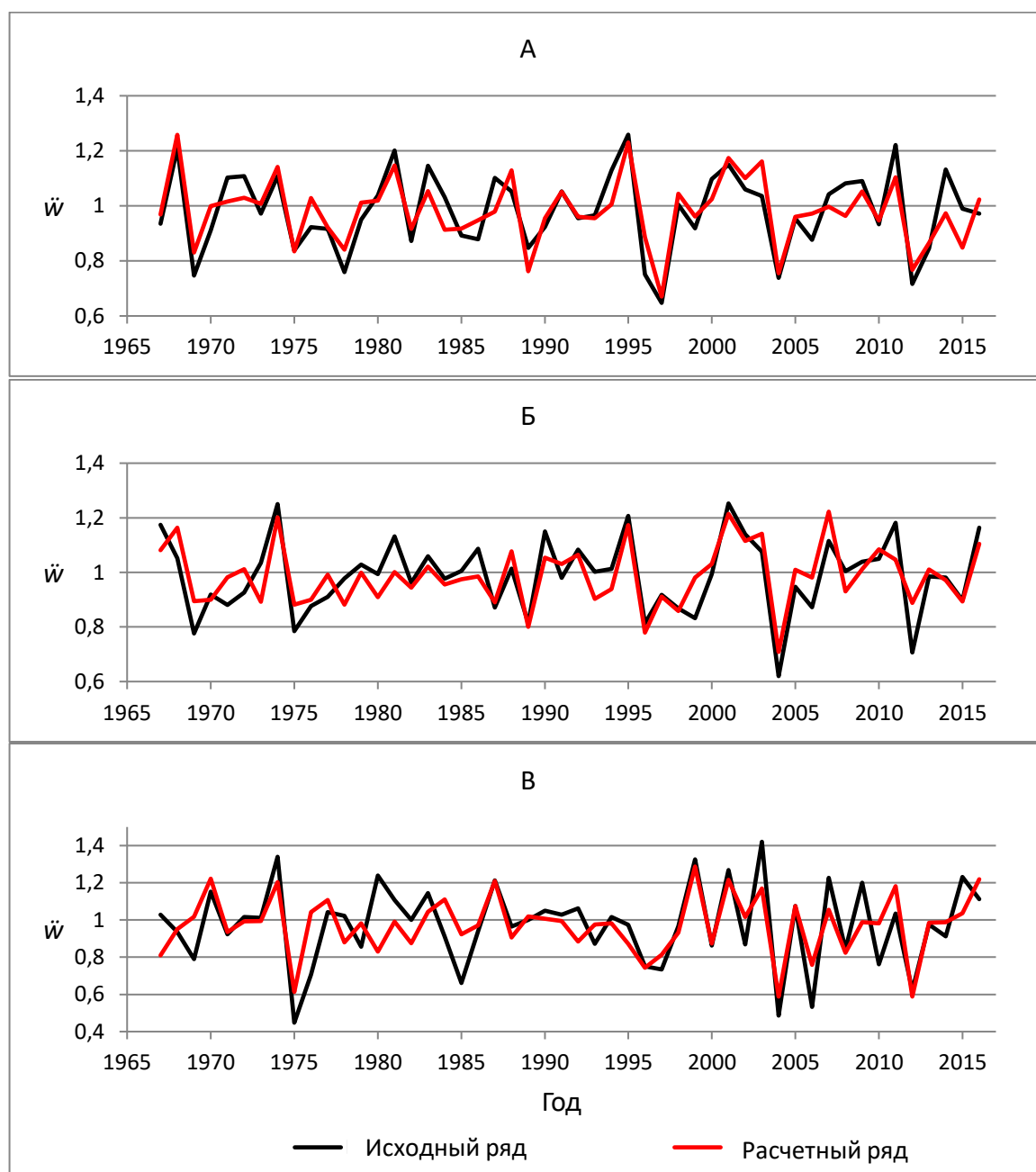


Рис. 25. Аппроксимация индексов \dot{w} ширины кольца уравнениями регрессии по месячным показателям температуры воздуха и количества осадков в период с мая предыдущего года по август года образования кольца. А – сосна на береговом участке, Б – сосна на лесном участке, В – береза на лесном участке.

Наиболее высокие показатели регрессии рядов прироста \dot{w} по рассматриваемым климатическим факторам рассчитаны для объединенной хронологии сосны с берегового и лесного участков ($R = 0,87$; $R_{adj} = 0,70$). Для сосны с лесного участка они ниже ($0,82$; $0,61$), для березы рассчитан средний уровень регрессии ($0,74$; $0,46$). Полученные уравнения регрессии позволяют с высокой точностью аппроксимировать ряды индексов радиального прироста древесных пород на участках (рис. 25). Однако они не позволяют достоверно судить о динамике какого-либо отдельного среднемесячного или среднегодового фактора.

Таблица

Параметры моделей регрессии индексов множественной регрессии индексов прироста \dot{w} деревьев на участках по средней месячной температуре воздуха (Т) и количеству осадков (Н) в год образования кольца и предыдущий период

Ряд	М, Ф	Корреляция				Значимые компоненты регрессии по месяцам, β																	
		R	R ²	R _{adj}	p	V-	VI-	VII-	VIII-	IX-	X-	XI-	XII-	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
Сб	О	.72	.52	.44	.000	.24	–	.23	.42	–	–	.36	–	–	–	–	–	–	.43	–	–.27	.29	
	О					–	–	–	.20	.52	–	–	.26	–	.39	–	–	–	.36	.21	–	–	
	Т	.85	.72	.65	.000	–	–	–	–	–	–	–	–	.31	–	–	.37	–	–	–	–	.38	–
	Т	.33	.11	.08	.020	–	–	–	–	–	–	–	–	.26	–	–	–	–	–	–	–	.19	–
Сл	Т	.57	.32	.28	.000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	.22	.31	–	–	–	–	.29	–
	Т					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	.40	–	–	–	–
	О	.82	.67	.61	.000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	.38	–	–	–	–	.37	–
	О	.63	.40	.33	.000	–	–	–	.30	.29	–	–	–	–	–	–	–	–	.33	.42	–	–	–
						–	–	–	.25	.27	–	–	–	–	–	–	–	–	.24	.34	–	–	–
																	.29						
Бл	О	.66	.44	.36	.000	–	–	.25	–	–	.26	.38	.25	.35	–	–	–	–	.29	–	–	–	–
	О					–	–	–	–	–	–	.38	.26	.34	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Т	.74	.54	.46	.000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	.28	–
	Т	.41	.17	.13	.010	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	.22	–
									.32	.31													
									.28	.26													
Число значимых компонентов						1	1	2	4	5	3	3	3	4	1	1	4	2	8	1	7	1	

М – модель регрессии, Ф – фактор регрессии, Сб – сосна с берегового участка, Сл – сосна с лесного участка, Бл – береза с лесного участка, О – количество осадков, Т – температура воздуха

В целом высокие значения индексов прироста связываются с прохладно-влажными условиями, а низкие – с засушливо-теплыми. Отклонения расчетных значений индекса прироста от фактических свидетельствуют о воздействии неучтенных данной моделью факторов, вероятнее всего, патогенных или антропогенных.

В таблице представлены основные параметры регрессии индексов прироста деревьев \dot{y} на участках в разных факторных моделях: по температуре воздуха и количеству осадков «ТО» и отдельно по температуре воздуха «Т» и количеству осадков «О» за означенный выше период с мая предыдущего года по август года образования кольца. Все модели достоверны на уровне значимости p не менее 0,01. Во всех случаях наиболее точны модели «ТО». Прирост сосны в таких моделях на обоих участках положительно связан с количеством осадков в августе-сентябре предыдущего года и в июне текущего года, а также с температурой воздуха в апреле. Однако на берегу, где автономная лесная среда отсутствует, число факторов, детерминирующих прирост сосны, больше, чем в лесу: ее прирост дополнительно зависит от температуры воздуха в предыдущем июне ($\beta = -0,48$) и январе (0,31), от количества осадков в зимние месяцы (0,26-0,39) и в июле текущего года (0,21).

Факторы прироста сосны и березы на одном и том же лесном участке заметно разнятся. Одинаково (положительно) влияют только осадки в июне и температура воздуха в августе текущего года. При этом прирост березы в отличие от сосны положительно отзывается на количество осадков в начале зимы (ноябрь-январь) и отрицательно на температуры сентября-октября предыдущего года. Отклик лесной сосны на температуру воздуха в сентября, а также в августе предыдущего года, напротив, отрицательный. В целом береза проявляет большую чувствительность к осенне-зимним условиям, сосна – к весенне-летним.

В модели «О» наибольший уровень связи индексов прироста с осадками без учета температуры воздуха определен для сосны с берегового участка ($R = 0,72$; $R_{adj} = 0,44$). Если в модели «ТО» значимы осадки 6 месяцев, то в данном случае – 7, из которых совпадают август предыдущего года и июнь года образования кольца, осадки которых оказывают положительное влияния на прирост. Остальные значимые месяцы модели «О» также чаще приходятся на периоды вегетации года образования кольца и предыдущего года и оказывают положительное влияние (кроме осадков августа года кольца, $\beta = -0,27$); положительное влияние оказывают также осадки декабря.

Значимые для сосны факторы в этой модели оказываются смещенными на 1 месяц назад по сравнению с моделью «ТО». Если в последней значимы осадки августа и особенно сентября ($-0,52$) предыдущего года, то в модели «О» значимы осадки июля и особенно августа ($-0,42$), подобная же ситуация отмечается для ноября-декабря и июня-июля в год образования кольца. То есть, как уже отмечалось выше, значимые дендроклиматические факторы при множественной регрессии во многом зависят от выбора модели регрессии и могут иметь не столько физический, сколько математический смысл для расчета наиболее точного уравнения. Вместе с тем, показательно, что только для береговой сосны значимыми оказались климатические параметры сентября в год образования кольца, из чего логично предположить, что вегетационный сезон сосны в редколесье на побережье южной экспозиции длится дольше, чем в отдаленном от берега сомкнутом древостое.

Влияние осадков на прирост сосны на лесном участке, судя по модели регрессии «О» ($R = 0,63$; $R_{adj} = 0,33$), меньше, чем на береговом, и оно менее разнообразно (значимы осадки 5 месяцев, на берегу – 7). Значимые месяцы моделей «О» и «ТО» для сосны с лесного участка совпадают в 4 из 5 случаев, а наибольшее влияние в обоих моделях оказывают осадки в июне. В модели «О» дополнительно отмечается отрицательное влияние осадков в апреле.

Влияние осадков на прирост березы на лесном участке, судя по модели «О» ($R = 0,66$; $R_{adj} = 0,36$), в целом такое же, как и на прирост сосны, хотя месяцы выпадения осадков, его, его определяющих, в большинстве случаев не совпадают. Общим для обеих пород является

положительный отклик на осадки в июне в год образования кольца. Значимые месяцы моделей «О» и «ТО» для березы с лесного участка совпадают в 5 из 6 случаев, а наибольшее влияние в обоих моделях оказывают осеннее-зимние осадки с ноября по январь (β до 0,38). В модели «О» дополнительно отмечается положительное влияние осадков в октябре.

Судя по модели «Т» влияние температуры воздуха на прирост деревьев на обоих участках характеризуется меньшим уровнем по сравнению с влиянием осадков. Несколько неожиданно, что самые низкие значения рассчитаны для сосны на береговом участке ($R = 0,33$; $R_{adj} = 0,08$) с его наиболее жестким гидротермическим режимом. При том, что именно в данном случае установлено наиболее сильное влияние осадков ($R = 0,72$), это может подчеркивать определяющий характер наличия снежных и дождевых осадков по сравнению с температурой на рост сосны в припышминских борах. Модель «Т» демонстрирует невысокие значимые отклики прироста береговой сосны на температуру воздуха только для двух месяцев: января и августа в год образования кольца. Эти месяцы представлены и в модели «ТО», но отклик на температуру воздуха при учете количества осадков в ней намного более сильный, дополнительно в ней выявляются сравнительно сильные отклики на температуру воздуха в июне предыдущего года ($-0,48$) и в апреле года образования кольца ($0,37$).

Наибольшее влияние температуры на прирост без учета осадков, судя по модели «Т» определено для сосны с лесного участка ($R = 0,57$; $R_{adj} = 0,28$). При этом и число значимых месяцев вдвое больше, чем в предыдущем случае, совпадение с ним отмечено только для отклика на температуру воздуха в августе. Отклик прироста сосны с лесного участка на температуру воздуха в моделях «Т» и «ТО» совпадает в 3 из 4 случаев, при этом модель «Т» показывает положительное влияние не только апрельской, но мартовской температуры.

Невысокий уровень влияния на прирост температуры воздуха, судя по модели «Т», определен для березы с лесного участка ($R = 0,41$; $R_{adj} = 0,13$). Совпадает с сосной только положительный отклик на температуру августа. Отклик прироста березы на температуру воздуха в сентябре и октябре отрицательный. Отклик прироста березы на температуру воздуха в моделях «Т» и «ТО» совпадает во всех 3 случаях.

Подсчет общего числа значимых откликов прироста деревьев на температуру воздуха и количество осадков по 3 факторным моделям регрессии на 2 участках за 17 месяцев, показал, что 32 отклика из 51 приходятся на температуру воздуха (63 %), оставшиеся 19 (37 %) – на количество осадков (табл.). Критическими для роста деревьев по числу значимых откликов являются июнь (8) и август (7) в год образования кольца, причем в июне прирост деревьев определяет недостаток осадков (6), а в августе – недостаток тепла (6). Следующими по значимости являются условия сентября (5) и августа (4) предыдущего года, января (4) и апреля (4) года образования кольца.

Таким образом, настоящие дендрохронологические исследования показали, что на 70-летнем фоне с конца 1940-х годов по настоящее время определяется неблагоприятная тенденция состояния исследованных сосново-березовых древостоев. Однако на более длительном историческом отрезке с конца 1860-х годов такая тенденция по сосне не прослеживается. Несмотря на то, что деревья старшего поколения сосны испытывали перманентное и периодически сильное антропогенное воздействие, в их кольцевых хронологиях отчетливо проявляется ряд известных внутривековых природных циклов, определяемых солнечной активностью и приливообразующими силами Луны и Солнца. В современных условиях эти циклы продолжают определять динамику лесных экосистем в районе исследований, усиливая или ослабляя действие антропогенных факторов. Непосредственная значимость климатического фактора в формировании прироста деревьев проявляется и в его тесной множественной связи с месячными показателями температуры воздуха и количества осадков в год образования годичного кольца и предыдущий год. Анализ откликов прироста на погодные-климатические условия разных месяцев показал

наличие критических для деревьев сезонов, обусловленных, прежде всего, дефицитом осадков.

Список литературы

Агафонов Л.И. Древесно-кольцевая индикация гидролого-климатических условий в Западной Сибири: Дисс. ... докт. биол. наук / ИЭРиЖ УрО РАН. Екатеринбург, 2011. 231 с.

Арефьев С.П. Оценка устойчивости кедровых лесов Западно-Сибирской равнины // Экология. 1997. № 3. С. 149-157.

Арефьев С.П. Дендрохронологическая реконструкция и оценка состояния экосистемы города // Тюмень начала XXI века. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. Гл. 7.2. С. 221-230.

Арефьев С.П. О максимальном возрасте деревьев на территории Тюменской области // AUS SIBIRIEN – 2009»: научно-информационный сборник. Тюмень: ИПЦ «Экспресс», 2009. С. 9-10.

Арефьев С.П. Климатические факторы в древесно-кольцевых хронологиях города Тюмени // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2013. № 12. С. 34-42.

Арефьев С.П., Воронцов Б.М. Сибирский тракт: «екатерининские» березы Тюмени // AUS SIBIRIEN – 2015: научно-информационный сборник. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2015. С. 18-22.

Арефьев С.П., Зах В.А. Древесно-кольцевые хронологии как показатель колебания уровня воды в Андреевской озерной системе в начале XIX — XXI в.в. // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2017. № 4(39). С. 161-171.

Арефьев С.П., Хомутов А.В., Ермохина К.А., Лейбман М.О. Дендрохронологическая реконструкция процесса формирования газового бугра на месте Ямальской воронки // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 5. С. 107-119.

Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: перевод с англ. М.: Мир, 1974. Вып. 1, 2. 406 с.

Грещилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. М., Радио и связь, 1997, 112 с.

Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 446 с.

Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев в Центральной Якутии // Журн. Сиб. федерального ун-та. Сер. Биология, 2012, № 5. С. 43–51.

Полюшкин Ю.В., Ларионов Н.В., Мартынов Б.Д. Периодичность засух и колебаний прироста деревьев на юге Тюменской области // Долгосрочные прогнозы природных явлений. Новосибирск: Наука, 1977. С. 83-92.

Формозов А.Н. Степные озера и водоплавающие птицы северного Казахстана и юга Западной Сибири // Русский орнитологический журнал. 2013. Т. 22. Экспресс-выпуск 879. С. 1301-1315.

Шишов В.В., Тычков И.И., Попкова М.И. Методы анализа дендроклиматических данных и их применение для территории Сибири. Красноярск: ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2015. 210 с.

Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.Ж Наука, 1986. 137 с.

Яворский Н.Х. Астро-динамико-статистическое прогнозирование климатических условий, в которых возможно формирование засух и переувлажнений // Вопросы агрономии. Фрунзе, Киргиз. с.-х. ин-т, 1975. С. 118–125.

Яворский Н.Х., Яворский Е.Н., Яворский В.Н. Теоретически возможные циклы в выпадениях осадков за счет влияния на них атмосферных приливов // Вопросы агрономии. Фрунзе, Киргиз. с.-х. ин-т, 1979. С. 131–137.

Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Ed. by E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London, Kluwer Acad. Publ., 1990. 364 p.

Douglass A.E. Climatic cycles and tree growth: A study of cycles. Wash.: Carnegie Inst., 1936. V. 3. 171 p.