

УДК 630*181.65(1-924.85)

ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ 200-ЛЕТНЕГО ДРЕВОСТОЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ВОРОНЕЖСКОМ БИОСФЕРНОМ ЗАПОВЕДНИКЕ¹

© 2019 г. С. М. Матвеев^{a, b, *}, Д. А. Тимащук^{a, b}^aВоронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова
ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087 Россия^bБелгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, Белгород, 308015 Россия

*E-mail: lisovod@bk.ru

Поступила в редакцию 25.08.2017 г.

После доработки 02.03.2018 г.

Принята к публикации 05.06.2018 г.

Рассматривается воздействие климатических лимитирующих факторов (сумма атмосферных осадков, температура воздуха) на изменчивость радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) произрастающей в условиях заповедного режима на территории Воронежского государственного биосферного заповедника. Древостой сосны естественного происхождения, тип леса – сосняк травяной с дубом. Возраст древостоя – 200 лет. Проведен математический анализ силы и тесноты связи месячных сумм атмосферных осадков и среднемесячных температур воздуха (по данным метеостанций “Воронеж” и “Воронежского заповедника”) и радиального прироста сосны обыкновенной за 80-летний период. Выявлена наибольшая значимость апрельских и особенно майских сумм атмосферных осадков для формирования радиального прироста сосны обыкновенной (ранней древесины). Осадки июля–августа оказывают значительное влияние на прирост поздней древесины. Высокая корреляционная связь радиального прироста отмечена с температурами сентября и, особенно, октября текущего года ($r = 0.43$) и предыдущего года ($r = 0.40$), также выражена отрицательная связь с летними температурами. Корреляционное отношение связи метеорологических факторов и радиального прироста заметно выше, чем коэффициент корреляции, что подтверждает нелинейный характер связи. Основываясь на циклической динамике радиального прироста сосны обыкновенной (11- и 34-летняя цикличность), с использованием двух методов прогнозирования (метод сингулярно-спектрального анализа “Гусеница” и аддитивная модель прироста, описывающаяся синусоидальной функцией с заданным периодом) построены модели и дан прогноз прироста на 10-летний период. В соответствии с моделями предполагается понижение прироста в 2018–2019 гг., повышенный радиальный прирост сосны в 2021 ± 1 г., пониженный – в 2024 ± 2 года.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, радиальный прирост, метеорологические факторы, цикличность, прогноз.

DOI: 10.1134/S0024114819020074

Исследования цикличности и климатической обусловленности в динамике радиального прироста деревьев начаты в начале прошлого столетия и особенно интенсивно проводились американскими учеными (Schulman, 1941 и др.). Результаты, опубликованные А. Дугласом еще в 1936 г., показали, что во всех исследуемых группах деревьев можно выделить 11-летний цикл, характерный также для динамики солнечной активности.

Изучению влияния климатических факторов на радиальный прирост сосновых древостоев в различных по климатическим условиям регионах посвящено немало публикаций, в том числе уже в 21-м веке (Магда, Зеленова, 2002; Сафронов, Гурский, 2005; Агафонов, Кукарских, 2008; Вахнина, 2011; Малышева, Быков, 2011; Матвеев и др., 2012; Мацковский, 2013, Matskovsky et al., 2016; Matveev et al., 2017 и др.). При этом выявлено как преобладающее влияние теплового режима на динамику прироста (Ваганов и др., 1996; Манов, 2014 и др.), так и режима атмосферного увлажнения (Матвеев, 2003; Глызин и др., 2005; Матвеев и др., 2012, Вахнина, 2013 и др.). Отмечено также, что в за-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 14-17-00171) на тему: “Региональные отклики компонентов окружающей среды на изменения климата разной периодичности: юг лесостепи Среднерусской возвышенности”.

сушливых горных условиях совместное влияние теплового режима и атмосферных осадков создает неустойчивый климатический отклик (Магда, Ваганов, 2006; Магда и др., 2011).

В районах с преобладанием одного климатического фактора, лимитирующего рост древесных растений, влияние локальных условий произрастания (рельефа, мощности почвенного горизонта и состава почвы, крутизны и ориентации склонов и др.) на изменчивость радиального прироста, существенно не проявляется (Бабушкина, 2011; Оськин, Болботунов, 2015).

В динамике радиального прироста древостоев лесостепи наблюдается полициклическая, обусловленная естественным ходом солнечной активности и изменчивостью климатических факторов.

Древесно-кольцевые хронологии представляют собой временные ряды или случайные функции дискретного (натурального) аргумента, которые несут информацию о разнообразных факторах внешней среды, в том числе, и климатической природы. Причем реализации временных рядов могут состоять из значений различных характеристик годичного кольца древесного растения, каждая из которых несет определенную информацию о специфике роста древесных растений и факторов окружающей среды, влияющих на прирост (Шишов и др., 2015).

Качественный анализ обычно предваряет изучение возможного наличия в исследуемом временном ряду тренда, циклических компонент, случайной составляющей. В дендрохронологии принята линейно-агрегированная модель, отражающая формирование ширины годичного кольца (Rt):

$$Rt = At + Ct + D1t + D2t + Et, \quad (1)$$

где A – тенденция роста, вызванная нормальным процессом старения;

C – воздействие климатических факторов;

$D1$ – эндогенные воздействия, например, плодородие;

$D2$ – экзогенные воздействия, например, воздействия вредителей, загрязнение и т.д.;

E – случайная составляющая.

Из анализа этой формулы становится ясна основная задача проведения экологических исследований – выделить “след”, оставленный интересующим нас фактором (Тишин, Чижикова, 2011).

Цель нашего исследования – выявление и оценка климатического сигнала (лимитирующих факторов роста древостоев в центральной лесостепи – сумм атмосферных осадков и температур воздуха) в радиальном приросте 200-летнего соснового древостоя Усманского бора, а также моделирование и прогноз прироста (продуктивности) сосны для последующего использования при рас-

пределении во времени лесохозяйственных мероприятий и оценке динамики состояния древостоев.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проведены в условиях заповедного режима, на территории Воронежского государственного природного биосферного заповедника им. В.М. Пескова, созданного в 1923 г. Климатические характеристики взяты по данным метеостанций “Воронеж” (Погода ..., 2016) и “Воронежского заповедника” (Базильская, Булкина, 1979; Базильская, 1997, 2007), расположенных в 40 км друг от друга.

Воронежский заповедник находится на границе Воронежской и Липецкой областей и занимает северную половину островного лесного массива – Усманского бора. Географические координаты территории – $51^{\circ}52' - 52^{\circ}02'$ с.ш. и $39^{\circ}21' - 39^{\circ}47'$ в.д. В климатическом отношении территория заповедника соответствует лесостепи, хотя по некоторым показателям (продолжительность снежного покрова и др.) приближается к условиям лесной зоны. Лесные насаждения заповедника имеют особую ценность благодаря своему разнообразию (ландшафтному, типологическому, видовому, генетическому) и представляют собой уникальную информационную базу. Сосна обыкновенная является главной лесобразующей породой Усманского бора, занимает 48% общей площади покрытых лесной растительностью заповедных земель.

Пробные площади заложены в чистом сосновом древостое (кв. 487, выдел 6). Тип лесорастительных условий – свежая субурь (B_2), тип леса – сосняк травяной с дубом (ССРТ).

Дендроклиматические исследования проведены по 22 кернам древесины (по 2 керна с каждого дерева), отобранном в 2015 г. возрастным буровом на высоте 0.5–1.0 м. Для датировки и измерения ширины годичных колец использовали измерительный комплекс LINTAB-6 с пакетом прикладных программ TSAP-Win (Rinn, 1996). При оценке достоверности данных измерений ширины годичных колец критерием Стьюдента (t) получены фактические значения (tf) за каждый календарный год, превышающие стандартное значение ($t_{ст.} = 2.18$) для уровня вероятности 0.95, т.е. среднее значение прироста определено достоверно.

Стандартизация данных предусматривала индексирование данных замеров ширины годичных колец по общепринятой формуле:

$$I = if / is \times 100\%, \quad (2)$$

где I – относительный индекс в %;

if – фактическая ширина годичного кольца;

is – сглаженные значения нормы прироста, в зависимости от возраста рассчитанные в про-

Таблица 1. Статистические характеристики дендрохронологического ряда

Объект исследования	Период	Возраст	Стандартное отклонение	Среднее значение CV	Коэффициент синхронности	Среднее значение в мм	Среднее значение вероятной ошибки (Psr)	EPS	SNR
Хронология 487/6	1817–2015	199	0.409	30.9	82	2.564	8.2	0.99	73

Примечание. 487/6 – № квартала / № выдела; CV – коэффициент изменчивости; EPS – сигнал популяции; SNR – отношение сигнал–шум.

грамме TREND с применением скользящего и полиномиального сглаживаний. Основные статистические характеристики дендрохронологического ряда (средние значения, коэффициент изменчивости, стандартное отклонение, вероятная ошибка и др.) (табл. 1) рассчитаны в программах STADIA 6.0, STATISTICA 6.0.

Рассчитанные статистические характеристики дендрохронологического ряда включают также выраженный сигнал популяции (Expressed Population Signal – EPS), отражающий представительность хронологии и отношение сигнал–шум (SNR) – показатель взаимокорреляции индивидуальных хронологий использовавшихся для построения обобщенной хронологии).

$$SNR = Nr/1 - r, \tag{3}$$

где N – объем выборки, r – средний межсерийный коэффициент корреляции.

Значение рассчитанного выраженного сигнала популяции (EPS) составило 0.99, т.е. в соответствии с принятым пороговым значением, равным 0.85, хронология может считаться достаточно представительной (ширина годичных колец за каждый год адекватно отражает прирост всей совокупности). Рассчитанное отношение сигнал–шум (SNR) составило 73, т.е. обобщенная хронология содержит высокую изменчивость, объясняющуюся влиянием климатических факторов (исследуемые деревья чутко реагируют на изменение климатических условий).

С помощью пакета программ TSAP-Win рассчитаны коэффициенты сходства ширины годичных колец каждого образца со средним для обследованного древостоя значением (GLK – коэффициент синхронности, CC – коэффициент корреляции) (Шиятов С.Г. и др., 2000).

Коэффициент синхронности (GLK = 82%) по шкале С.Г. Шиятова (Шиятов, 1986) соответствует среднему уровню при колебаниях от 65–68 до 83–86%. Следует отметить, что наиболее низкие значения (ниже 70%) коэффициентов сходства (корреляции либо синхронности) каждого образца со средним значением для каждой пробной

площади отмечаются только по одному из двух радиусов дерева и никогда не бывают одновременно по обоим радиусам, при этом второй всегда выше.

Вероятная ошибка определения среднего прироста (ширины годичных колец) не превышает 10%.

Показатель силы влияния метеорологических факторов на радиальный прирост древесины рассчитывался как отношение факториальной суммы квадратов (Df) к общей сумме квадратов (Dc), дисперсионного комплекса, по формуле (4) (STATISTICA – 6.0):

$$\eta^2 = \frac{Df}{Dc}. \tag{4}$$

При этом в качестве результирующего признака использовали значения относительных индексов прироста, а в качестве независимых переменных – метеорологических факторов. Если фактическое значение F -критерия выше табличного $Ff > Fst$, признается статистическая значимость уравнения в целом.

Для оценки характеристики сигнала применена автокорреляционная функция, помогающая определить несущую частоту сигнала (лаг сигнала), скрытую из-за наложений шума и колебаний на других частотах, т.е. устранить статистическую зависимость динамики прироста от случайных процессов (Вессарт, 1978; Гриппа, Потахин, 2016).

Для выявления совмещенных экстремумов циклической динамики относительных индексов прироста и метеорологических факторов (осадки теплого периода и средняя температура воздуха), лимитирующих прирост сосны обыкновенной, проведен кросс-спектральный анализ (с применением сглаживания с помощью весов Хемминга) в программе STATISTICA 6.0.

Моделирование и прогноз радиального прироста проведены двумя различными методами: 1) методом сингулярно-спектрального анализа (ССА) “Гусеница” – анализ временных рядов, на основе преобразования одномерного временного ряда в многомерный с последующим применением к полученному многомерному временному

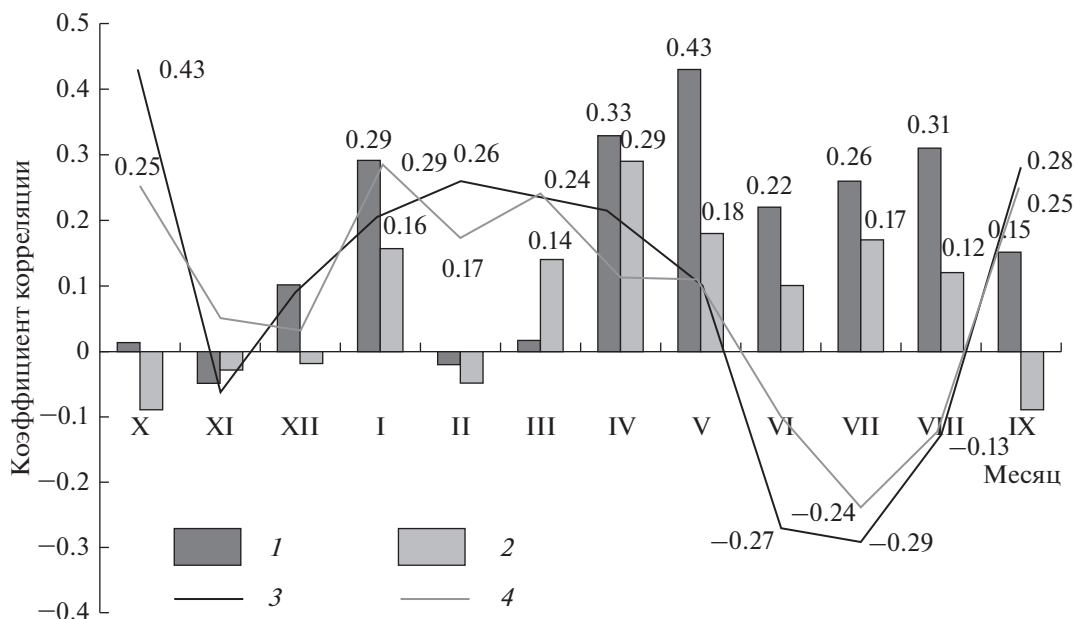


Рис. 1. Значимые коэффициенты корреляции между индексами радиального прироста сосны обыкновенной, суммами атмосферных осадков и средними температурами воздуха по месяцам года: 1 – осадки по метеостанции Воронежского заповедника; 2 – осадки по метеостанции Воронеж; 3 – температура по метеостанции Воронежского заповедника; 4 – температура по метеостанции Воронеж.

му ряду метода главных компонент (Дьяконов, 2001; Голяндина, 2004); 2) построение аддитивной модели с применением полиномиального тренда, позволяющего значительно сократить ошибку модели.

Построение прогноза на основе временного ряда предполагает предварительный его анализ: формулирование основных положений о структуре ряда, оценку случайной составляющей и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Годичный прирост древесных растений зависит от ряда внутренних (генетически обусловленные видовые и индивидуальные особенности, происхождение, возраст) и внешних (лесорастительные условия, климатические факторы, межвидовые и внутривидовые отношения, влияние вредителей и болезней) факторов. Наиболее выраженным лимитирующим фактором в Центральной лесостепи являются засухи (Таранков, 1991; Матвеев, 2003).

Объективным и широко используемым показателем увлажнения и повторяемости атмосферных засух является гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК) (Густокашина, Максютова, 2006; Страшная и др., 2011). При ГТК менее 1.0 уже наблюдаются слабые засухи, менее 0.8 – средние, менее 0.6 – сильные (Таранков, 1991; Страшная и др., 2011). Среднее значение ГТК за период 1932–2014 гг. составляет 1.19. ГТК

менее 0.6 наблюдался в 1938 и 1971 г., меньше 0.8 – в 1939, 1946, 1954, 1966, 1972, 1981, 1992, 1996, 2010, 2014 г. В 1971 г. значение ГТК было наименьшим – 0.51.

Результаты анализа динамики ширины годовых колец позволили установить надежные реперные годы с минимальным приростом: 1936, 1939, 1946, 1972, 1984, 1992, 2002, 2010, 2011, а также выявить значительное влияние засух на ширину годовых колец обследуемого древостоя, но не всегда пропорционально силе засухи.

Коэффициент изменчивости радиального прироста всех обследованных образцов варьирует в отдельные годы от 12.8 до 52.3%. Высокие коэффициенты изменчивости в 200-летнем древостое сосны обыкновенной чаще наблюдаются в годы сильных засух и, особенно – в последующие за ними (1936, 1938–1939, 1946, 1972–1973, 1992–1993, 2010–2011).

Для выявления количественного вклада климатических параметров в изменчивость прироста сосны обыкновенной нами проведен корреляционный анализ парных связей индексов годовых колец и климатических показателей (сумма атмосферных осадков и средняя температура воздуха по метеостанциям “Воронежского заповедника” и “Воронеж”) (рис. 1).

Анализ климатического отклика радиального прироста сосны на метеофакторы (суммы атмосферных осадков, средние температуры воздуха) выполнен для двух метеостанций, за период не-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между индексами радиального прироста сосны обыкновенной, суммами атмосферных осадков и средними температурами воздуха за 1932–2014 гг.*

Климатические показатели	Коэффициент корреляции, $r \pm m$	Корреляционное отношение, $\eta \pm m$
Метеостанция “Воронеж”		
Сумма атмосферных осадков	0.21 ± 0.054	0.35 ± 0.048
Средняя температура воздуха	0.11 ± 0.088	0.24 ± 0.075
Метеостанция Воронежского заповедника		
Сумма атмосферных осадков	0.33 ± 0.082	0.51 ± 0.056
Средняя температура воздуха	0.18 ± 0.077	0.31 ± 0.089

* Рассмотрели за гидрологический год.

прерывных наблюдений с 1932 по 2014 г. Поскольку коэффициент корреляции (r) между суммами атмосферных осадков по метеостанциям составляет 0.68, между значениями средних температур по тем же метеостанциям – 0.7.

Как видно на рис. 1, высокие положительные коэффициенты корреляции (по календарным месяцам) сумм выпавших осадков с индексами радиального прироста древесины наблюдаются с апреля по август (от 0.22 в июне до 0.43 в мае). Причем пиковые значения приходятся на апрель–май (формирование ранней древесины сосны происходит, соответственно, в мае и июне) и на август (формирование поздней древесины в основном в августе–начале сентября). Значительное влияние на формирование прироста сосны оказывают также осадки января ($r = 0.29$), что свидетельствует о лимитирующем значении запаса влаги. С температурами апреля–мая в формировании прироста сосны также наблюдается положительная корреляция, хотя и значительно более низкая, чем с осадками, так как температурный режим данных месяцев не является лимитирующим фактором для произрастания сосны в центральной лесостепи. Довольно высока ($r = 0.24$) корреляция прироста с температурами марта, т.е. с началом весеннего снеготаяния. Слетными температурами прирост сосны показывает умеренную отрицательную корреляционную связь (от 0.13 в августе до 0.29 в июле). Наиболее высока корреляция радиального прироста с температурами сентября текущего года (в сентябре в Воронежской области заканчивается формирование поздней древесины и происходит процесс одревеснения клеток) и, особенно, октября ($r = 0.43$ с температурами октября текущего года и $r = 0.40$ с температурами октября предыдущего года). Октябрьские температуры знаменуют переход сосны обыкновенной к периоду покоя и, очевидно, являются значимыми для одревеснения (лигнификации) клеток древесины и подготовки к периоду покоя (что подтверждается коэффициентом корреляции $r = 0.43$ с температурами октября текущего года), а также могут являться значимыми

для начала периода покоя (т.е. значимыми для будущего деления клеток в следующий весенний период), что подтверждается не менее высоким коэффициентом корреляции ($r = 0.40$) с температурами октября предыдущего года. Положительное влияние температур октября на рост древесных растений отмечалось и на севере Евразии (Шишов и др., 2015).

Результаты анализа связи индексов радиального прироста с суммой атмосферных осадков и средней температурой воздуха за гидрологический год по метеостанциям Воронежского заповедника и “Воронеж” приведены в табл. 2.

Корреляционный анализ парных связей индексов годичных колец сосны обыкновенной и метеорологических факторов выявил более высокие значения связи с данными метеостанции Воронежского заповедника. Наблюдается умеренная связь с осадками – коэффициент корреляции равен 0.33, по метеостанции “Воронеж – слабая связь ($r = 0.21$). Связь индексов прироста со средней температурой воздуха сравнительно низкая. Корреляционное отношение связи исследуемых параметров заметно выше, чем коэффициент корреляции, изменяется в пределах от 0.24 до 0.51, что подтверждает нелинейный характер связи радиального прироста и метеорологических факторов.

С целью выявления связи между ранней и поздней древесиной в отдельности и суммами атмосферных осадков за апрель–май и июль–август соответственно проведен их взаимный корреляционный анализ (табл. 3).

Данные табл. 3 свидетельствуют, что на прирост ранней древесины сосны большое влияние оказывают осадки за апрель–май, коэффициент корреляции равен 0.52. Осадки июля–августа оказывают значительное влияние на прирост поздней древесины ($r = 0.35$).

Значительную степень влияния на радиальный прирост сосны осадков за апрель–сентябрь подтвердил и дисперсионный анализ. Сила влияния среднегодовых температур осталась низкой (табл. 4).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между индексами радиального прироста ранней и поздней древесины сосны обыкновенной и суммами атмосферных осадков (метеостанция Воронежского заповедника)

Климатический показатель	Ранняя древесина		Поздняя древесина	
	коэффициент корреляции, $r \pm m$	корреляционное отношение, $\eta \pm m$	коэффициент корреляции, $r \pm m$	корреляционное отношение, $\eta \pm m$
Количество осадков за апрель–май (P4-5)	0.52 ± 0.041	0.80 ± 0.062	–	–
Количество осадков за июль–август (P7-8)	–	–	0.35 ± 0.078	0.66 ± 0.089

Примечание: “–” – расчеты не производились, в связи с тем, что формирование ранней древесины происходит за апрель–май, поздней – июль–август.

Таблица 4. Дисперсионный анализ влияния метеорологических факторов на прирост сосны обыкновенной

Фактор влияния на прирост	Показатель силы влияния $\eta^2 \pm m$	Критерий Фишера фактический (Fф)	Критерий Фишера стандартный (Fст)
Сумма осадков за апрель–сентябрь	0.59 ± 0.013	8.3	3.9
Среднегодовая температура воздуха	0.18 ± 0.036	6.3	3.9

Фактические значения критерия Фишера ($Fф = 8.3$ и 6.3) для всех рассмотренных факторов больше стандартного (критического) ($Fст = 3.9$). Можно утверждать, что влияние осадков за апрель–сентябрь на результативный признак (радиальный прирост) существенно. Стационарность относительных индексов прироста (200-летний древостой) оценили автокорреляционной функцией. Для данной древесно-кольцевой хронологии значимый период составил 15 лет. Каждое последовательное значение прироста коррелирует с предыдущим, при этом автокорреляция 1-го порядка равна 0.59 , т.е. прирост характеризуется выраженной сезонностью. Автокорреляционная функция показывает наличие значимой связи радиального прироста сосны обыкновенной текущего года с приростом двух предыдущих лет. В автокорреляционной функции незатухающие флуктуации проявляются отчетливо, что свидетельствует о квазипериодическом характере исследуемых колебаний (Вессарт, 1978).

Использование методов корреляционного, автокорреляционного, спектрального и кросс-спектрального анализов индексированных дендрохронологических рядов показывает, что влияние изменчивости климата на прирост деревьев устанавливается на уровне различных циклическостей.

Сходство в длительных изменениях радиального прироста с температурой воздуха и осадками теплого периода в исследуемом районе проявляется при анализе кросс-спектральной плотности, которая показывает значимые циклические изменения прироста древесины длительностью

2–3, 5–6, 7–8, 11, 20–26, 41 лет. Самым высоким пиком кросс-спектральной плотности рядов относительных индексов прироста сосны обыкновенной и сумм атмосферных осадков за апрель–сентябрь выделяется 11-летний (цикл Швабе-Вольфа, или солнечный). Для проведения ССА (метод “Гусеница”) выбрана величина окна, равная 11. Этот отрезок ряда содержит основную информацию о повторяющихся циклах колебаний. Результаты вычисления объединенных компонент представлены на рис. 2.

Для отбора компонент, представляющих детерминированную составляющую временного ряда, использовали критерий, основанный на величине вклада собственных чисел, соответствующих этим компонентам. Эта величина составляет 95%.

Среднеквадратическое отклонение исходного ряда (1821–2014 гг.) составило 8.94, тогда как очищенного от шумов – 7.13. Разница, равная 1.81, – среднеквадратическое отклонение выделенного шума. Согласно методу ССА произведены разложение, восстановление, аппроксимация и прогнозирование радиального прироста (рекуррентным методом) на 10 лет. Результаты прогнозирования показаны на рис. 3.

Прогноз радиального прироста сосны обыкновенной, осуществленный с помощью метода “Гусеница” на 10-летний период, показал наличие циклических колебаний с максимумами прироста в 2016 и 2021 г., понижение прироста в 2018–2019 гг. и минимум прироста в 2023 г.

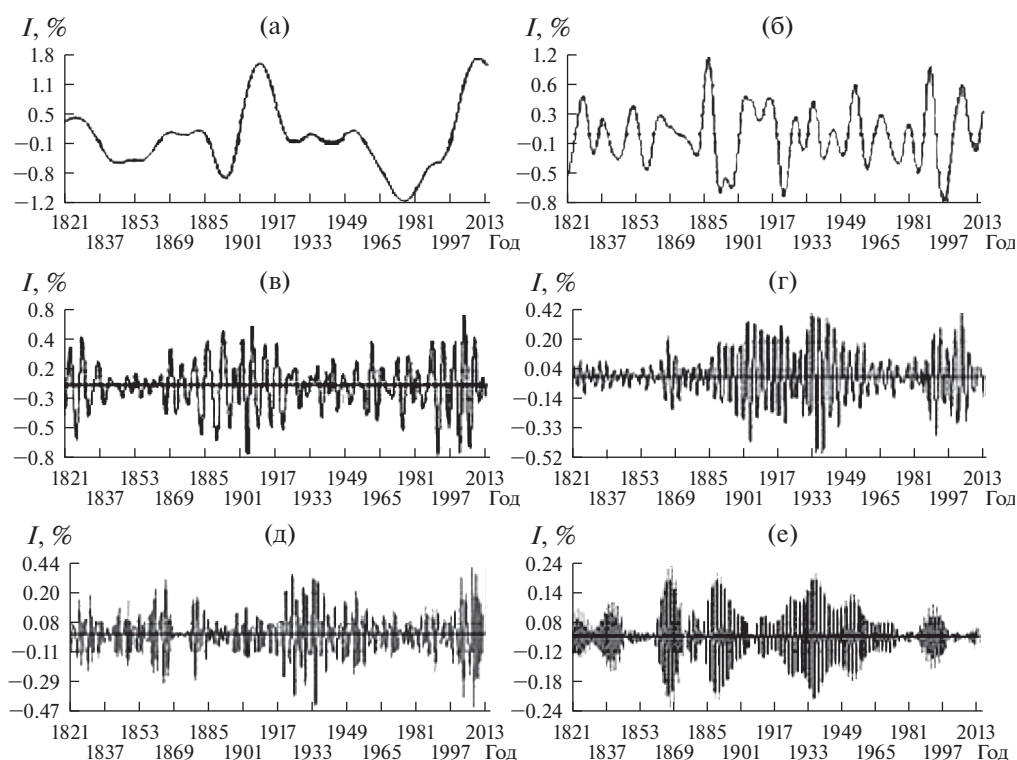


Рис. 2. Результаты декомпозиции временного ряда относительных индексов радиального прироста сосны обыкновенной (одномерные диаграммы): а – возрастающий тренд; б – 11-летняя циклическая составляющая; в, г, д, е – высокочастотные модулированные гармоники, различающиеся по амплитуде.

Для прогнозирования годовичного радиального прироста $y(x)$ нами предлагается модель, описывающаяся синусоидальной функцией и основанная на полиномиальном алгоритме. Модель показала более высокую эффективность, чем линейная, и отражает 38% изменчивости колебаний прироста. Период моделирования составляет 34 года. Основанием для выбора 34-летнего (Брикнерова) цикла в качестве периода моделирования при построении модели послужили исследования циклической динамики засух, солнечной активности и прироста древостоев центральной лесостепи. Функция описывается уравнением:

$$y(x) = \sum_{k=1}^{k=m_1} \left[a_k \cos\left(2\pi k \left(\frac{x-1}{T}\right)\right) + b_k \sin\left(2\pi k \left(\frac{x-1}{T}\right)\right) \right] + \sum_{k=0}^{k=m_2} c_k \left(\frac{x-1}{T}\right)^k, \quad (6)$$

где T – период; ak , bk , ck – коэффициенты регрессии; k – коэффициент автокорреляции исходного временного ряда; π – константа (3.1416); t – момент времени; m_1 – степень тригонометрического ряда; m_2 – степень полинома (тренда).

Для данной модели динамики прироста рассчитаны коэффициенты регрессии, приведенные в табл. 5.

По заданным и расчетным параметрам функции построена модель радиального прироста, графически представленная на рис. 4. Достоверность модели оценена F -критерием Фишера, эмпирическое значение которого 9.1 намного выше допустимого порогового 3.9. Достоверность признана значимой, что подтверждает адекватность модели.

При анализе индексов радиального прироста прослеживаются циклы разной длительности, от высокочастотных (3–5 лет) до вековых (70–90 лет), отражающие динамику благоприятных и неблагоприятных периодов климатических условий. Депрессии прироста в засушливые периоды 1891–1897, 1921, 1938–1939, 1971–1975, 1992 гг. отражены на графике глубокими минимумами. Хорошо выраженные максимумы прироста наблюдались в 1866, 1886, 1907, 1913, 1955, 1990, 2004 гг. Периодичность (циклическость) повторения сильных, с катастрофическими последствиями, засух в регионе центральной лесостепи коррелирует с циклом Брикнера (средний интервал повторяемости – 33–35 лет) (Matveev et al., 2016). Однако и 11-летний (± 2) цикл Швабе-Вольфа хорошо проявляется как в динамике засух, так и в динамике радиального прироста.

Прогноз радиального прироста сосны обыкновенной, выполненный по аддитивной модели,

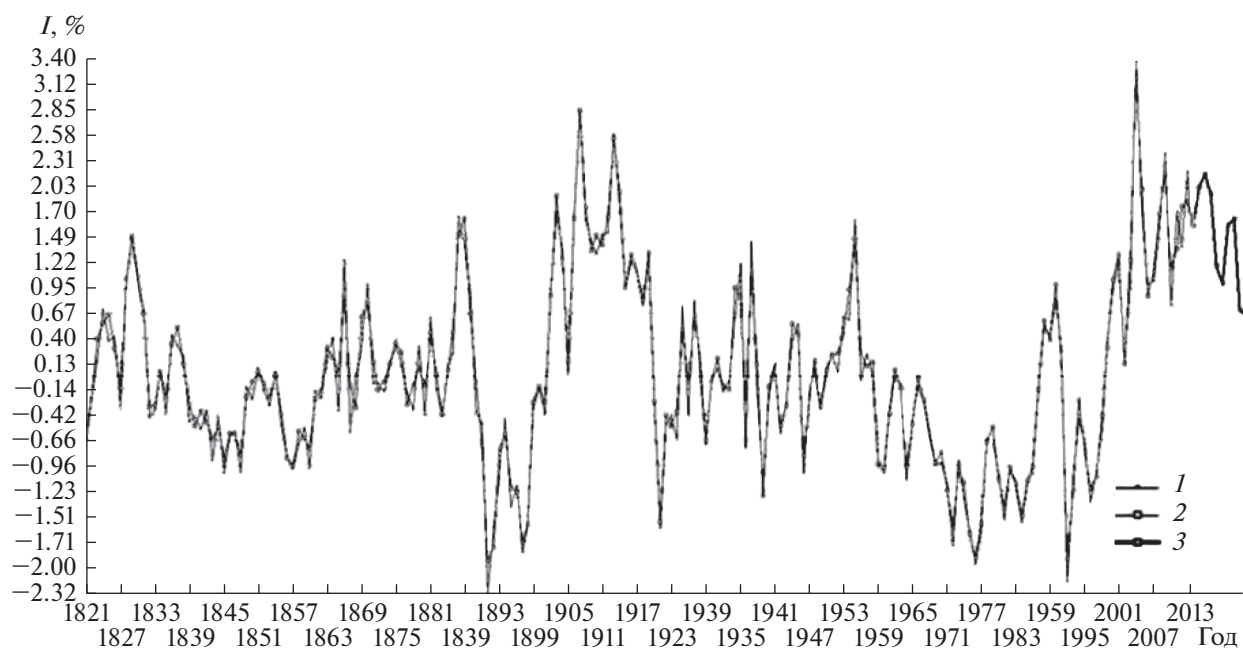


Рис. 3. Прогноз радиального прироста сосны обыкновенной на 10 лет: 1 – индекс; 2 – база прогноза; 3 – индекс (прогноз).

показал небольшое повышение в 2016 г., максимум в 2021 г., с последующим снижением прироста.

Совмещенный прогноз экстремумов радиального прироста сосны в регионе базируется на построенных нами моделях, в которых заложены как 11-летние, так и 34-летние циклические колебания. В соответствии с моделями предполагается понижение прироста в 2018–2019 гг., повышенный радиальный прирост сосны в 2021 ± 1 г., пониженный – в 2024 ± 2 года.

Заключение. Как показали проведенные исследования, наблюдаются высокие корреляционные связи (коэффициент корреляции до 0.43, корреляционное отношение до 0.80) радиального прироста сосны обыкновенной в Воронежском заповеднике с суммами атмосферных осадков апреля–мая текущего года, а также с температурами

воздуха октября текущего и предыдущего годов. Дисперсионный анализ подтвердил значительную степень влияния на радиальный прирост сосны метеорологических факторов. На прирост ранней древесины сосны большое влияние оказывают осадки за апрель–май текущего года, на прирост поздней древесины – осадки июля–августа текущего года. Отмечена также отрицательная связь прироста сосны с летними температурами воздуха. Влияние изменчивости климата на прирост деревьев устанавливается на уровне различных циклическостей. Кросс-спектральный анализ относительных индексов прироста сосны обыкновенной и сумм атмосферных осадков за апрель–сентябрь показал превалирование 11-летней (цикл Швабе-Вольфа) и 34-летней (цикл Брикнера) циклическостей.

Таблица 5. Коэффициенты регрессии временного ряда ($T = 34$ года, $m_1 = 5$, $m_2 = 1$)

K	ak	bk	ck
0	–	–	$c_0 = 3810.02442$
1	$a_1 = 2716.27446$	$b_1 = 72.3713607$	$c_1 = 365.602345$
2	$a_2 = 1203.58436$	$b_2 = -797.63215$	–
3	$a_3 = 554.666029$	$b_3 = -111.2723$	–
4	$a_4 = -52.758971$	$b_4 = -584.62092$	–
$m_1 = 5$	$a_5 = -15.227401$	$b_5 = -457.72058$	–

Примечание: K – коэффициент автокорреляции исходного временного ряда; ak , bk , ck – коэффициенты регрессии.

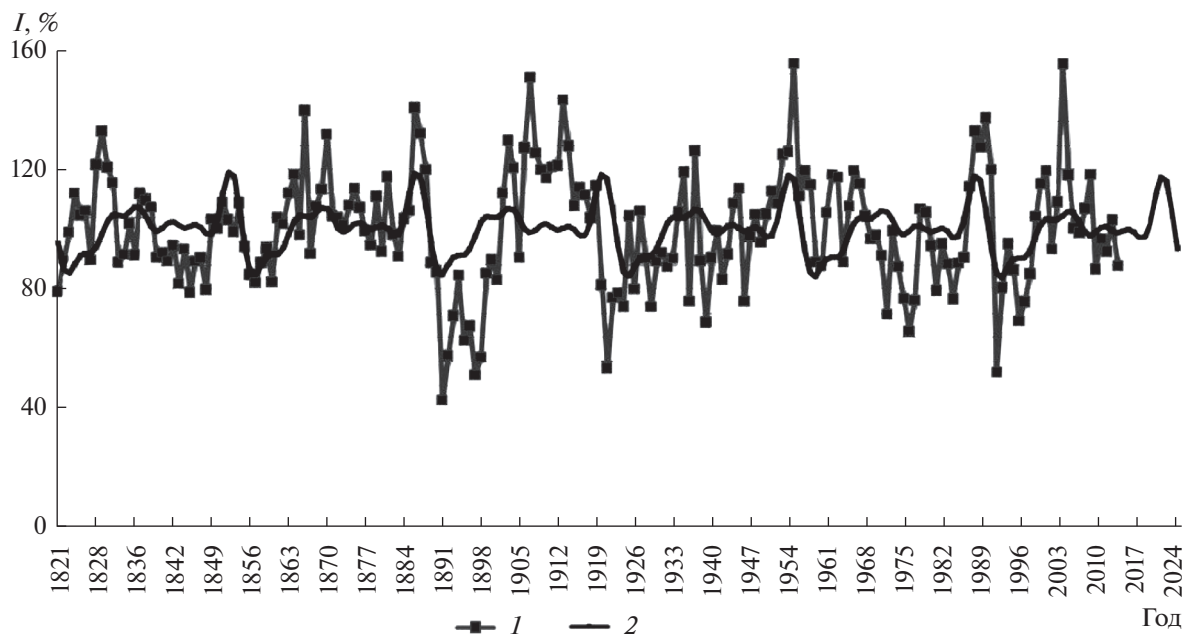


Рис. 4. Аддитивная модель и прогноз относительных индексов радиального прироста сосны обыкновенной: 1 – индексы общей ширины годичного кольца; 2 – модель и прогноз индексов прироста.

Построенные на основе циклической динамики радиального прироста сосны обыкновенной (11- и 34-летняя цикличность), с использованием двух методов прогнозирования (метод сингулярно-спектрального анализа “Гусеница” и аддитивная модель прироста, описывающаяся синусоидальной функцией с заданным периодом) модели радиального прироста сосны обыкновенной позволили осуществить прогноз динамики прироста на 10-летний период. В соответствии с моделями, предполагается понижение прироста в 2018–2019 гг., повышенный радиальный прирост сосны в 2021 ± 1 г., пониженный – в 2024 ± 2 года.

Создание адекватных моделей и прогноз прироста (продуктивности) сосновых древостоев позволит учитывать циклическую динамику продуктивности при распределении лесохозяйственных мероприятий (рубки ухода, создание лесных культур, противопожарные мероприятия) в пределах ревизионного периода, особенно при переходе к интенсивной модели лесопользования. Дальнейшая проработка результатов моделирования и прогнозирования радиального прироста сосновых древостоев поможет оценке динамики их состояния, в том числе – с учетом воздействия антропогенных нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агафонов Л.И., Кукарских В.В. Изменения климата прошлого столетия и радиальный прирост сосны в степи южного Урала // Экология. 2008. № 3. С. 173–180.

Бабушкина Е.А. Влияние климатических факторов и условий произрастания на изменчивость радиального прироста и структуры годичных колец: Автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.02.08 / Бабушкина Елена Анатольевна; [Место защиты: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН]. – Красноярск, 2011. 22 с.

Базильская И.В. Закономерности и отклонения в годовом цикле климатического режима Воронежского биосферного заповедника (по данным 1975–1996 гг.) // Труды Воронежского гос. заповедника. Воронеж: Биомик, 1997. Вып. 23. С. 5–13.

Базильская И.В. Закономерности и отклонения в годовом цикле климатического режима Воронежского биосферного заповедника (по данным 1997–2006 гг.) // Там же. Воронеж: Воронежский гос. пед. университет, 2007. Вып. 24. С. 6–21.

Базильская И.В., Булкина А.П. Закономерности и отклонения в годовом цикле климатического режима Воронежского заповедника (по данным 1932–1974 гг.) // Там же. Воронеж: Центрально-Черноземное книж. изд-во, 1979. Вып. 22. С. 3–23.

Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазена В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. Новосибирск: Изд-во Наука, 1996. 246 с.

Вахнина И.Л. Анализ динамики ширины годичных колец сосны обыкновенной в условиях Восточного Забайкалья // Известия Иркутского гос. университета. Серия: Биология. Экология. 2011. Т. 4. № 3. С. 13–17.

Вахнина И.Л. Древесно-кольцевая хронология по сосне обыкновенной в региональных условиях Восточного Забайкалья // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 30. № 1–2. С. 54–56.

- Вессарт В.В.* Некоторые результаты дендрохронологических исследований на северо-западе Кольского полуострова: Известия Русского географического общества, 1978. Т. 110. Вып. 5. С. 446–450.
- Глызин А.В., Размахнина Т.Б., Корсунов В.М.* Дендрохронологические исследования в контактной зоне “лес–степь” как источник информации о ее динамике. Сибирский экологический журнал, 2005. Вып. 1. С. 79–83.
- Голяндина Н.Э.* Метод Гусеница – SSA: анализ временных рядов: СПб: Изд-во Санкт-Петербургский гос. университет, 2004. 76 с.
- Гриппа С.П., Потахин С.Б.* Периодичность соотношения тепла и влаги в таежных геокомплексах Европейского Севера России по дендрохронологическим данным // Resources and Technology, 2016. № 13. С. 27–44.
- Густокашина Н.Н., Максютова Е.В.* Тенденции изменения засушливости в степи и лесостепи Предбайкалья // География и природные ресурсы, 2006. № 4. С. 76–81.
- Дьяконов В.* MATHCAD 8/2000: Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 592 с.
- Магда В.Н., Ваганов Е.А.* Особенности климатического отклика радиального прироста деревьев в условиях горных лесостепей Алтае-Саянского региона // Известия РАН. Серия география. 2006. № 5. С. 92–100.
- Магда В.Н., Зеленова А.В.* Радиальный прирост сосны как индикатор увлажнения в Минусинской котловине // Известия Русского географического общества. 2002. Т. 134. Вып. 1. С. 73–79.
- Магда В.Н., Блок Й., Ойдунаа О.Ч., Ваганов Е.А.* Выделение климатического сигнала на увлажнение из древесно-кольцевых хронологий в горных лесостепях Алтае-Саянского региона // Лесоведение. 2011. № 1. С. 28–37.
- Мальшева Н.В., Быков Н.И.* Дендрохронологические исследования ленточных боров юга Западной Сибири. Барнаул: Изд-во Алтайский гос. университет. 2011. 125 с.
- Манов А.В.* Зависимость радиального прироста сосны обыкновенной от климатических факторов в островном массиве бора лишайникового Печорского заполярья // Вестник института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2014. № 5 (187). С. 14–17.
- Матвеев С.М.* Дендроиндикация динамики состояния насаждений Центральной лесостепи. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. университета, 2003. 272 с.
- Матвеев С.М., Матвеева С.В., Шурыгин Ю.Н.* Повторяемость сильных засух и многолетняя динамика радиального прироста сосны обыкновенной в Усманском и Хреновском борах Воронежской области // Журн. Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2012 а. Т. 5. № 1. С. 27–42.
- Матвеев С.М., Таранков В.И., Шурыгин Ю.Н.* Дендроклиматический анализ естественных и искусственных древостоев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в свежих лесорастительных условиях Хреновского бора // Политематический сетевой электронный научный журн. Кубанского государственного аграрного университета. 2012 б. № 75. С. 772–783.
- Мацковский В.В.* Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России, М.: ГЕОС, 2013. 148 с.
- Сафонов Д.Н., Гурский А.А.* Дендрохронологические исследования в вопросах ведения хозяйства в Бузулукском бору // Известия Оренбургского гос. аграрного университета. № 1. 2005. С. 96–99.
- Страшная А.И.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра России. 2011. Т. 345. С. 171–188.
- Таранков В.И.* Лесная климатология. Воронеж: Политехнический институт, 1991. 83 с
- Тишин Д.В., Чижикова Н.А.* Дендроклиматические исследования сосны *Pinus sylvestris* L. островов Керетского архипелага Белого моря // Журн. Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2011. Т. 4. № 4. С. 378–388.
- Шишов В.В., Тычков И.И., Попкова М.И.* Методы анализа дендроклиматических данных и их применение для территории Сибири: Учебное пособие, Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2015. 210 с.
- Шиятов С.Г.* Дендрохронология верхней границы леса на Урале: М.: Наука, 1986. 136 с.
- Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В.* Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учеб.-метод. пособие: Красноярск, Красноярский гос. университет, 2000. 80 с.
- Оськин А.Ф., Болботунов А.А.* Компьютерное моделирование годичного радиального прироста деревьев // Приоритетные направления развития науки и образования: Мат. VII междунар. науч.-практ. конф. (г. Чебоксары, 4 декабря 2015 г.) / Чебоксары: ЦНС “Интерактив плюс”. 2015. № 4 (7). С. 269–270.
- Погода и климат.* Климат Воронежа [Электронный ресурс], 2016 / <http://www.pogoda.ru.net/climate/34123>, (25.06.2016).
- Matskovsky V., Dolgova E., Lomakin N. Matveev S.* Dendroclimatology and historical climatology of Voronezh region, European Russia, since 1790s // International J. Climatology. 2016. doi 10.1002/joc.4896
- Matveev S.M., Chendev Yu.G., Lupo A.R., Hubbard J.A., Timashchuk D.A.* Climatic changes in the east-european forest-steppe and effects on scots pine productivity // Pure and Applied Geophysics. 2016. V. 174. № 1. P. 427–443.
- Rinn F.* TSAP. Version 3.0. Reference manual. Computer program for time series analysis and presentation. Heidelberg, 1996. 264 p.
- Schulman E.* Some propositions in tree-ring analysis. Ecology // 1941. V. 22. № 2. P. 193–195.

Dendroclimatic Study of 200-Years-Old Stand of Scots Pine in Voronezh Nature Reserve

S. M. Matveev^{1, 2, *} and D. A. Timashchuk^{1, 2}

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies
8 Timiryazev st., Voronezh, 394087, Russia

²Belgorod National Research University
Pobedy st. 85, Belgorod, 308015, Russia

*E-mail: lisovod@bk.ru

Received 25 August 2017

Revised 2 March 2018

Accepted 5 June 2018

We considered the effect of climatic limiting factors (precipitation, air temperature) on variability of radial increment of Scots pine (*Pinus silvestris* L.) growing in protected area of Voronezh Nature Reserve. We studied a natural 200-year-old herbs pine stand with oak. Strength of relationships between monthly precipitation sums, mean monthly air temperatures on weather stations of Voronezh and Voronezh Reserve, and radial increment of Scots pine for 80 years have been mathematically analyzed. Maximal effect of April and especially May sums of precipitation on radial increment of Scots pine (early wood) have been found. Precipitation of July and August had significant effect on growth of late wood. High correlation of radial increment have been found with temperatures of September, and, especially, October of the same year ($r = 0.43$), and preceding year ($r = 0.40$). Negative relationship with summer temperatures was profound. Correlation ratio of weather factors and radial increment was markedly higher than the correlation coefficient, supporting the non-linear character of the relationships. Based on 11- and 34-years cycles in radial growth of Scots pine, and using Caterpillar SSA and additive increment model (sinusoid function with given period) the increment have been modeled and predicted for 10 years. According to the modeling we suggested decrease of increment in 2018–19, increase in 2021 \pm 1 year, and decrease in 2024 \pm 2 years.

Keywords: Scots pine, radial increment, weather factors, cycles, forecast.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation (project № 14-17-00171 “Regional feedbacks of environmental components to climate change of various periodicity in southern forest-steppe of Central-Russian Upland).

REFERENCES

- Agafonov L.I., Kukarskikh V.V., Climate changes in the past century and radial increment of pine in the Southern Ural steppe, *Russian Journal of Ecology*, 2008, Vol. 39, No. 3, pp. 160–167.
- Babushkina E.A., *Vliyanie klimaticheskikh faktorov i uslovii proizrastaniya na izmenchivost' radial'nogo prirosta i struktury godichnykh kolets. Avtoreferat diss. kand. biol. nauk* (Climate and local factors of variability of radial increment and structure of annual rings. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2011, 22 p.
- Bazil'skaya I.V., Zakonomernosti i otkloneniya v godovom tsikle klimaticheskogo rezhima Voronezhskogo biosfernogo zapovednika (po dannym 1975–1996 gg.) (Regularities and deviations in annual climate cycle of Voronezh Nature Reserve in 1975–1996), In: *Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo zapovednika (Proceedings of Voronezh Nature Reserve)* Voronezh: Biomik, 1997, Vol. 23, pp. 5–13 (207 p.).
- Bazil'skaya I.V., Zakonomernosti i otkloneniya v godovom tsikle klimaticheskogo rezhima Voronezhskogo biosfernogo zapovednika (po dannym 1997–2006 gg.) (Regularities and deviations in annual climate cycle of Voronezh Nature Reserve in 1997–2006), In: *Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo zapovednika (Proceedings of Voronezh Nature Reserve)* Voronezh: Tsentral'no-Chernozemnoe knizhnoe izdatel'stvo, 2007, Vol. 24, pp. 6–21 (368 p.).
- Bazil'skaya I.V., Bulkina A.P., Zakonomernosti i otkloneniya v godovom tsikle klimaticheskogo rezhima Voronezhskogo biosfernogo zapovednika (po dannym 1932–1974 gg.) (Regularities and deviations in annual climate cycle of Voronezh Nature Reserve in 1932–1974), In: *Voprosy meteorologii i fenologii (Issues of meteorology and phenology)* Voronezh: Tsentral'no-Chernozemnoe knizhnoe izdatel'stvo, 1979, pp. 3–23 (84 p.).
- D'yakonov V.P., *MATHCAD 8/2000: Spetsial'nyi spravochnik* (MATHCAD 8/2000: special handbook), Saint-Petersburg: Piter, 2000, 590 p.
- Glyzin A.V., Razmahina T.B., Korsunov V.M., Dendrokronologicheskie issledovaniya v kontaktnoi zone “les – step” kak istochnik informatsii o ee dinamike (Dendrochronological studies in the forest-steppe contact zone as a source of information about its time course), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, No. 1, pp. 79–83.
- Golyandina N.E., Metod “Gusenitsa–SSA”: analiz vremennykh ryadov (“Caterpillar-SSA”: a method of analysis of time series), Saint-Petersburg: VVM, 2004, 76 p.
- Grippa S.P., Potakhin S.B., Periodichnost' sootnosheniya tepla i vlagi v taezhnykh geokompleksakh Evropeiskogo Severa Rossii po dendrokronologicheskim dannym (Periodicity of warmth and humidity correlation in taiga geocomplexes of the European North of Russia, according to dendrochronological data), *Resources and Technology*, 2016, Vol. 4, No. 13, pp. 27–44.

- Gustokashina N.N., Maksyutova E.V., Tendentsii izmeneniya zasushlivosti v stepi i lesostepi Predbaikal'ya (Aridity trends in the steppe and forest-steppe of the Prebaikalia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2006, No. 4, pp. 76–81.
- Klimaticheskii monitor, (Climate display), available at: www.pogoda.ru.net (June 25, 2016).
- Magda V.N., Oidupaa O.C., Vaganov E.A., Block J., Extraction of the climatic signal for moisture from tree-ring chronologies of Altai-Sayan mountain forest-steppes, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 716–724.
- Magda V.N., Vaganov E.A., Klimaticheskii otklik prirosta derev'ev v gornyykh lesostepyakh Altae-Sayanskogo regiona (Climate response on the mountain forest-steppe in Altai-Sayany region), *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2006, No. 5, pp. 92–100.
- Magda V.N., Zelenova A.V., Radial'nyi prirost sosny kak indikator atmosfernogo uvlazhneniya v Minusinskoi kotlovine (Radial increment of pines: an indicator of air humidity in Minusinsk Hollow), *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2002, Vol. 134, No. 1, pp. 73–79.
- Malysheva N.V., Bykov N.I., *Dendrokronologicheskie issledovaniya lentochnykh borov yuga Zapadnoi Sibiri* (Dendrochronological studies of ribbon pine forests in southern West Siberia), Barnaul: AZBUKA, 2011, 125 p.
- Manov A.V., Zavisimost' radial'nogo prirosta sosny obyknovnoy ot klimaticheskikh faktorov v ostrovnom massive bora lishainikovo Pechorskogo Zapolyar'ya (Dependence of radial growth pine on climatic factors in the island massif of lichen pine forest in the Pechora polar regions), *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN*, 2014, No. 5 (187), pp. 14–17.
- Matskovskii V.V., *Klimaticheskii signal v shirine godichnykh kolets khvoynykh derev'ev na severe i v tsentre Evropeiskoi territorii Rossii* (Climatic signal in the width of annual rings of trees in the North and the Center of the European part of Russia), Moscow: GEOS, 2013, 147 p.
- Matskovsky V., Dolgova E., Lomakin N., Matveev S., Dendroclimatology and historical climatology of Voronezh region, European Russia, since 1790s, *International Journal of Climatology*, 2017, Vol. 37, No. 7, pp. 3057–3066.
- Matveev S.M., *Dendroindikatsiya dinamiki sostoyaniya nazazhdenii Tsentral'noi lesostepi* (Dendroindication of dynamics of forest health in the Central forest-steppe), Voronezh: Izd-vo VGU, 2003, 269 p.
- Matveev S.M., Chendev Y.G., Lupo A.R., Hubbard J.A., Timashchuk D.A., Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity, *Pure and Applied Geophysics*, 2017, Vol. 174, No. 1, pp. 427–443.
- Matveev S.M., Matveeva S.V., Shurygin Y.N., Povtoryaemost' sil'nykh zasukh i mnogoletnyaya dinamika radial'nogo prirosta sosny obyknovnoy v Usmanskom i Khrenovskom borakh Voronezhskoi oblasti (Recurrence of severe droughts and long-term dynamics of radial increment of the Scots pine in the Usman and Khrenovoe forests in the Voronezh region), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2012, Vol. 5, No. 1, pp. 27–42.
- Matveev S.M., Tarankov V.I., Shurygin Y.N., Dendroklimaticheskii analiz estestvennykh i iskusstvennykh drevostoev sosny obyknovnoy *Pinus sylvestris* L. v svezhikh lesorastitel'nykh usloviyakh Khrenovskogo bora (Dendroclimatology analysis of the natural forest and forest plantations of Scots pine *Pinus sylvestris* L. in dry-moist site conditions of the Khrenovoe pine forest), *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No. 75, pp. 772–783.
- Os'kin A.F., Bolbotunov A.A., Komp'yuternoe modelirovanie godichnogo radial'nogo prirosta derev'ev (Computer modeling of annual radial increment of trees), *Priorities in development of science and education, Proc. Conf.*, Cheboksary, 4 December 2015, Cheboksary: TsNS "Interaktiv plus", 2015, pp. 269–270.
- Rinn F., *TSAP version 3.0. Reference Manual. Computer program for time series analysis and presentation*, Heidelberg: Frank Rinn, 1996, 262 p.
- Safonov D.N., Gurskiy A.A., Dendrokronologicheskie issledovaniya v voprosakh vedeniya khozyaistva v Buzulukskom boru (Dendrochronological investigations on the problems of forestry managements in the Buzuluk woods), *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2005, No. 1 (5), pp. 96–99.
- Schulman E., Some propositions in tree-ring analysis, *Ecology*, 1941, Vol. 22, No. 2, pp. 193–195.
- Shishov V.V., Tychkov I.I., Popkova M.I., *Metody analiza dendroklimaticheskikh dannyykh i ikh primeneniye dlya territorii Sibiri* (Methods of dendrochronological analysis: a case study of Siberia), Krasnoyarsk: Amal'gama, 2015, 210 p.
- Shiyatov S.G., *Dendrokronologiya verkhnei granitsy lesa na Urale* (Dendrochronology of the upper limit of forests in Urals), Moscow: Nauka, 1986.
- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., *Metody dendrokronologii. Osnovy dendrokronologii. Sbor i poluchenie drevesnokol'tsevoi informatsii (Methods of dendrochronology. Fundamental of dendrochronology. Collection of data from tree-rings)*, Krasnoyarsk: Izd-vo KrasGU, 2000, Vol. 1, 81 p.
- Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V., Agrometeorologicheskie osobennosti zasukhi 2010 goda v Rossii po sravneniyu s zasukhami proshlykh let (Agrometeorological conditions of 2010 drought spell in Russia compared to previous ones), *Trudy Gidrometeorologicheskoy nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii*, 2011, Vol. 345, pp. 171–188.
- Tarankov V.I., *Lesnaya klimatologiya* (Forest climatology), Voronezh: Izd-vo VPI, 1991, 82 p.
- Tishin D.V., Chizhikova N.A., Dendroklimaticheskije issledovaniya sosny *Pinus sylvestris* L. ostrovov Keretskogo arkhipelaga Belogo morya (Dendroclimatic investigations of *Pinus sylvestris* L. on Keretsky archipelago islands, the White Sea), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2011, Vol. 4, No. 4, pp. 378–388.
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., *Dendroklimaticheskije issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike (Dendroclimatic studies in the Ural-Siberian subarctic zone)*, Novosibirsk: Nauka, 1996, 244 p.
- Vakhnina I.L., Analiz dinamiki shiriny godichnykh kolets sosny obyknovnoy v usloviyakh Vostochnogo Zabaikal'ya (Tree-ring analysis of common pine in East Transbaikalia), *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya*, 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 13–17.
- Vakhnina I.L., Drevesnokol'tsevaya khronologiya po sosne obyknovnoy v regional'nykh usloviyakh Vostochnogo Zabaikal'ya (Tree-ring chronology of Scots pine in Eastern Transbaikalia region), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2013, Vol. 30, No. 1–2, pp. 54–56.
- Vessart V.V., Nekotorye rezul'taty dendrokronologicheskikh issledovaniy na severo-zapade Kol'skogo poluostrova (Some results of dendrochronological studies in northwestern part of the Kola Peninsula), *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1978, Vol. 110, No. 5, pp. 446–450.