ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2020, № 1, с. 93–102

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 57.044:57.045+911.2

СВЯЗЬ ЛИНЕЙНОГО И РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ С ОСАДКАМИ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА В ЛЕСАХ КЕРЖЕНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

© 2020 г. В. В. Кузнецова[a], А. В. Чернокульский[b], Ф. А. Козлов[b], А. Е. Кухта[a, c, *]

[a] *Институт географии РАН, Москва, Россия*

[b] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

[c] *Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю.А. Израэля, Москва, Россия*

**e-mail: anna_koukhta@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.
После доработки 29.05.2019 г.
Принята к публикации 03.10.2019 г.

Климатический сигнал радиального и линейного прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*), произрастающей на территории Русской равнины и, в частности, в пределах Керженского заповедника (Нижегородская область), хорошо изучен. В роли ведущего фактора, определяющего ее рост в условиях умеренного климата, выступают атмосферные осадки. При этом в последние десятилетия, в условиях глобальных климатических изменений, выявлено изменение характера осадков на Русской равнине – сокращение обложных и рост ливневых осадков. В связи с этим актуальной задачей является оценка отклика прироста сосны на количество осадков разного генезиса. В данной работе проанализирована связь линейного и радиального прироста сосны в разных типах биотопов (влажных, свежих и сухих) с ливневыми и обложными осадками. Показано, что линейный прирост во всех биотопах чувствителен к ливневым осадкам в начале вегетационного периода текущего года, когда происходит рост междоузлий, и дерево нуждается в достаточном увлажнении. Для всех биотопов связь с ливневыми осадками положительная, за исключением влажного биотопа, где наблюдается значимая отрицательная его связь с осадками июля предыдущего года, что вызвано водным стрессом и нехваткой кислорода в корнеобитаемом слое в условиях избыточного увлажнения. Для обложных осадков характерна обратная связь с линейным приростом, что свидетельствует о негативном влиянии длительного увлажнения на приросты текущего года и качество почек возобновления предыдущего вегетационного сезона. Радиальный прирост древесины в меньшей степени зависит от осадков разного генезиса. Для него характерна значимая положительная связь с ливневыми осадками в начале вегетационного сезона текущего года, когда происходит формирование ранней древесины, и во второй половине вегетационного сезона предыдущего года, когда начинает формироваться поздняя древесина.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, радиальный прирост, линейный прирост, дендрохронология, дендроклиматология, годичные кольца, ливневые и обложные осадки

DOI: 10.31857/S2587556620010124

ВВЕДЕНИЕ

Оценка состояния лесных экосистем в условиях изменения климата методами дендрохронологии по радиальному (в ширину) и линейному (в высоту) приростам деревьев является одной из актуальных задач экологии лесных экосистем. В результате применения данных методов выявляются уровни воздействия климатических факторов на развитие фитоценозов. Кроме того, становятся возможными реконструкции климатов прошлого, а также прогнозирование состояния растительности в будущем в соответствии со сценариями изменения климатической системы Земли [7, 16, 19, 21, 25, 26, 29, 31, 36]. Внимание исследователей фокусируется на восстановлении временны́х рядов таких метеорологических переменных, как температура и количество осадков. При этом в работах по северному полушарию отмечена бóльшая значимость количества осадков, чем температуры, для развития древостоев. Отмечено, что количество осадков выступает в роли лимитирующего фактора для роста деревьев [2, 3, 12, 27]. При этом в одних и тех же климатических, но несходных локальных условиях отмечается разная степень влагообеспеченности растений. Следствием мозаичности микро- и мезорельефа являются различающиеся реакции параметров роста древостоя на воздействие осадков [6, 11, 12, 23]. Таким образом, при оценке отклика роста деревьев на количество осадков необходимо учитывать характер местообитания.

Таблица 1. Характеристика древесно-кольцевой хронологии X05S (радиальный прирост)

Код	Местоположение	N	E	Порода	Число деревьев	Первый год	Последний год	Длина
X05S	Керженский заповедник, сосновый лес у поселка Рустай на границе заповедника, мертвопокровник с пятнами лишайника, сосна в подросте	56.5105°	44.8146°	Сосна	10	1865	2014	149

Исследованиям динамики радиального и линейного прироста в различных климатических условиях посвящены многие исследования [6, 7, 10, 11, 13, 16, 18, 36]. Зачастую в умеренном климатическом поясе радиальный прирост древесины обладает низкой чувствительностью к определенным климатическим параметрам, и выявить один, наиболее значимый для прироста фактор, представляется затруднительным. Подобная особенность климатического отклика радиального прироста древесины связана с благоприятными условиями большинства местообитаний умеренного климата, с оптимальным соотношением тепла и влаги. Как было показано ранее, для хронологий по радиальному приросту, построенных на Европейской территории России, основным фактором формирования годичного кольца являются условия влагообеспеченности [5, 21].

Водный баланс региона определяется величиной и характером атмосферных осадков, которые, в свою очередь, демонстрируют отклик на глобальные климатические изменения [8, 14, 32, 34, 35, 37]. В частности, в последние десятилетия в России отмечается изменение характера осадков: выявлен рост интенсивности экстремальных осадков [8], одновременное удлинение засушливых и дождливых периодов – кластеризация дней с осадками [38], перераспределение между их морфологическими типами – рост ливневых (с увеличением роли особенно сильных ливней) и сокращение обложных осадков [28]. В связи с этим особый интерес представляет изучение влияния осадков разного генезиса (ливневых и обложных) на прирост древесины, как линейный, так и радиальный.

Цель нашего исследования – выявление отклика радиальных (по ширине ствола) и линейных (по высоте) приростов на осадки различного генезиса на примере древостоев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris L.* в лесах Керженского заповедника.

РАЙОН РАБОТ И ХАРАКТЕРИСТИКА БИОТОПОВ

Объектом исследования послужили линейные и радиальные приросты сосны обыкновенной в Керженском государственном природном биосферном заповеднике. Он расположен в юго-восточной подобласти атлантико-континентальной европейской климатической области, для которой характерны высокая амплитуда температур, преобладание западных ветров, интенсивная циклоническая деятельность [1, 9]. По данным [17] современный рельеф территории сформировался в четвертичный период и представлен параболическими песчаными дюнами с озерами и болотами в котловинах выдувания. Здесь типичны зандры. Около 80% площади водораздела рр. Керженец–Ветлуга занято Камско-Бакалдинской группой верховых и переходных болот. Для рассматриваемой территории характерен подзолистый тип почв легкого гранулометрического состава на дюнах и гривах под сосновыми борами. В межгривных понижениях, в условиях избыточного увлажнения, сформировались болотные торфяные почвы. Типология биотопов в настоящей работе принята по В.Н. Сукачёву [22].

Керны для определения радиальных приростов отбирались в сосняке у п. Рустай, на границе заповедника. Линейные приросты (табл. 2) измерялись в свежих, сухих и влажных местообитаниях [22], пробные площади были заложены маршрутным методом. Пробная площадь (X05S, табл. 1) заложена в сосняке (III–IV бонитет) зеленомошно-беломошном *Pineta sylvestris hylocomioso-cladinosa* с примесью березы *Betula pubescens*, сомкнутость – 0.4. Подлесок не выражен; в кустарничковом ярусе отмечены брусника *Vaccinium vitis-idaea*, вейник *Calamagrostis arundinacea*. По характеру растительности в соответствии с [22] местообитание “свежее”.

“Влажные” местообитания представляют собой сосняки сфагновые (IV–V бонитет) *Pineta sylvestris fruticuloso-sphagnosa* с березой. Сомкнутость древостоя 0.1–0.2. В напочвенном ярусе доминируют *Sphagnum spp.*, в травянистом – багульник *Ledum palustre*, пушица *Eriophorum vaginatum*, голубика *Vaccinium uliginosum*, клюква *Vaccinium oxycoccus*; в кустарниковом ярусе – различные виды ивы *Salix spp.*

В “свежих” местообитаниях сосняк *Pineta fruticuloso-hylocomiosa*, характеризуются примесью ели *P. abies*. и березы *B. pendula* II–IV бонитетом. Сомкнутость равна 0.5–0.8. В подлеске обычны крушина *Frangula alnus*, бересклет *Euonymus verrucosa*, можжевельник *Juniperus communis*. В ярусе кустарничков доминируют брусника *Vaccinium vitis-idaea*, черника *V. myrtillus*, в напочвенном ярусе – *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*.

Таблица 2. Длина рядов наблюдений по линейному приросту для различных биотопов

Номер пробной площади, свежий биотоп	IX	XI	XII	XIII	XV	XVI	XVII	XXI	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
Длина ряда наблюдений	10	20	12	16	22	18	12	16	10	11	16	14
Номер пробной площади, влажный биотоп	I	II	III	IV	VIII	X	XIV	XXII	XXVII	–	–	–
Длина ряда наблюдений	22	19	23	18	10	10	18	18	21	–	–	–
Номер пробной площади, сухой биотоп	V	VI	VII	XVIII	XIX	XX	–	–	–	–	–	–
Длина ряда наблюдений	15	19	13	17	18	18	–	–	–	–	–	–

В “сухих” местообитаниях в сосняках *Pineta sylvestris cladinosa* III–IV бонитета подлесок практически отсутствует, в подросте обычны *P. sylvestris, B. pendula*. Сомкнутость – 0.3–0.4. В кустарничковом ярусе доминирует вереск *Calluna vulgaris,* в травянистом – злаки. Напочвенный покров составляют лишайники из родов *Peltigera*, *Cladonia*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для создания *хронологии по ширине годичных колец* использован стандартный дендрохронологический метод [2, 3]: 20 образцов живой древесины отобраны буравом Пресслера по 2 радиуса из каждого дерева. В лаборатории образцы наклеены на деревянные подложки, а затем отшлифованы для увеличения контрастности колец и отсканированы с высоким разрешением (свыше 1200 dpi). Измерения производились при помощи специализированных программ *CooRecorder и CDendro*, а также полуавтоматической установки *Lintab* с разрешением 0.01 мм. Перекрестное датирование выполнено в программах *Rinntech TSAPWin®* и *CDendro*, контроль качества образцов осуществлялся в программе *COFECHA* в соответствии с общепринятой методикой. Возрастной тренд из хронологии удален с помощью программы *ARSTAN*, для чего значение прироста за каждый год поделено на значение точечной аппроксимирующей функции за этот год. Ко всем образцам применено 100-летнее линейное сглаживание – однопараметрическое семейство низкочастотных фильтров, определяемых специальным множителем Лагранжа *p*. В результате, построена стандартная хронология по ширине годичных колец X05S на 149 лет (1865–2014 гг.)

В соответствии со стандартной методикой измерения радиальных приростов использовались спелые деревья [7, 16, 21, 25, 36]. Измерения *линейных приростов* - курсивпроводились на материале подроста и приспевающих деревьев по методике, представленной в [10, 12]. Поскольку ряды и линейных, и радиальных приростов индексируются (т.е. из них удаляется возрастная компонента), возможно проведение процедуры сравнения откликов рядов приростов спелых деревьев и подроста на воздействие климатических факторов с учетом мозаичности местообитаний [23]. Формирование рядов годичного *линейного прироста осевого побега* (междоузлий) сосны проводилось по [12]. Возраст всего учтенного подроста составлял 12–26 лет. На территории заповедника методом маршрутных ходов заложено 27 пробных площадей (14 – в свежих, 8 – во влажных, 5 – в сухих биотопах). На каждой из них учтено по 5 деревьев [12, 18]. Параметры массива данных по линейному приросту приведены в табл. 2.

Все рассматриваемые далее дендрохронологические временные ряды относительных значений линейных приростов (индексов прироста) были вычислены путем деления абсолютных значений линейного годичного прироста на среднее значения для данного биологического возраста (используется скользящее среднее за 5 лет). Таким образом, из рядов прироста исключается возрастной тренд, а отклонения значений индексов от тренда характеризуют отклик приростов на воздействие различных факторов (в том числе климатических), а также изменчивость в флуктуирующей среде. Полученные значения индексов приростов осреднялись по пробным площадям, а затем – по типам биотопов.

Для оценки связи между рядами индексов радиального и линейного прироста и рядами сумм осадков различного генезиса вычислялись коэффициенты корреляции Пирсона (*R*), значимость которых определялась по [4]. Оценки считались статистически значимыми на 90% уровне. Число степеней свободы оценивалось с учетом автокорреляции рядов.

Связь линейного и радиального прироста сосны с общей суммой осадков в регионе и, в том числе, в Керженском заповеднике, ранее была изложена в [5, 11, 12, 20]. Для сравнения откликов приростов на воздействие обложных, ливневых осадков и общей суммы осадков нами проведен корреляционный анализ прироста и всех указанных категорий осадков.

Месячные суммы *ливневых и обложных осадков* получены на основе срочных стандартных метеорологических наблюдений на российских метеостанциях для периода 1966–2016 гг. Методика разделения общей суммы осадков основана на использовании информации о характере погоды и

морфологическом типе облачности [24]. Для оценки влияния осадков разного генезиса на линейный и радиальный приросты использовались данные метеостанции *Нижний Новгород* (ВМО № 27459, 56.34° с.ш., 43.94° в.д.). Ряды осадков на этой станции являются однородными во времени [28].

Станция находится на удалении в 57 км от района исследований. Данная величина на порядок меньше характерных размеров облачных систем, обуславливающих выпадение обложных осадков (теплых атмосферных фронтов) [15], но соответствует (или превосходит) линейные размеры облачных систем, с которыми связано выпадение ливневых осадков (отдельных кучево-дождевых облаков, мезомасштабных облачных кластеров, облачных систем холодных атмосферных фронтов). Локальные мезомасштабные условия (рельеф, свойства подстилающей поверхности) могут в определенной мере сказаться на систематических различиях между количеством ливневых осадков в Нижнем Новгороде и в Керженском заповеднике. Однако различия в межгодовой динамике суммы линевых осадков в этих регионах представляются несущественными. В частности, коэффициенты корреляции для периода 1966–2016 гг. между суммой ливневых осадков на станции *Нижний Новгород* и на соседних метеорологических станциях (*Кинешма*, ВМО № 27346, 163 км от Нижнего Новгорода; *Елатьма*, ВМО № 27648, 204 км; *Лукоянов*, ВМО № 27665, 152 км) для летнего сезона составляют 0.5–0.7 для месячных сумм и 0.2–0.25 для суточных сумм и являются статистически значимым на уровне 0.90. Учитывая такую тесную связь и отсутствие метеорологических наблюдений непосредственно в Керженском заповеднике, использование данных для осадков разного генезиса с метеорологической станции *Нижний Новгород* представляется обоснованным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость линейного прироста сосны во *влажных биотопах* от сумм ливневых и обложных осадков текущего и предыдущего вегетационных сезонов (рис. 1) характеризуется значимыми коэффициентами корреляции. Прямая зависимость приростов от *ливневых* осадков получена для июля текущего года (R = 0.42), обратная – для июля предыдущего вегетационного сезона (R = –0.33). Первое значение получено для фенофазы роста междоузлий в текущем сезоне. Второй коэффициент корреляции получен для фенофазы начала формирования почки возобновления в предыдущем году. Из-за низких температур и пониженной кислотности корнеобитаемого слоя в сфагновых сосняках и болотах древостои испытывают недостаток влаги, который восполняется атмосферными осадками [10, 12]. И ливневые, и обложные осадки на этапе роста междоузлий оказывают схожее влияние, положительно воздействуя на линейный прирост древесины в текущем году.

Для *обложных* осадков характерны положительные корреляции в мае текущего года (R = 0.37) и отрицательные – в мае, июне и августе предыдущего года (R = –0.53, R = –0.36, R = –0.44 соответственно). Таким образом, прямая зависимость характерна для фенофазы роста побегов в текущем сезоне, обратная – для фенофаз роста побегов и формирования почки возобновления в предыдущем году. Избыток влаги влечет за собой недостаток кислорода в корнеобитаемом слое, что снижает качество почки возобновления (апикальной меристемы), формирующейся в предыдущем году, от которого зависит прирост текущего года [6, 11, 33].

Для влажного биотопа наблюдается значимая положительная связь линейного прироста с общей суммой осадков в июне и июле текущего года и отрицательная в сентябре текущего года (R = 0.37, R = 0.38, R = –0.39 соответственно), которая в точности повторяет динамику связи с обложными осадками. В целом для месяцев предыдущего вегетационного сезона отмечается более сильная зависимость линейного прироста от осадков разного вида, чем от общей суммы. Для месяцев текущего года более важным, по-видимому, является общее количество осадков, а не их вид.

Для *свежего биотопа* характерны оптимальные условия увлажнения, при которых осадки не являются фактором, лимитирующим прирост древесины, как радиальный, так и линейный [10, 23]. Тем не менее, полученные результаты показывают (рис. 2), что на прирост положительно влияют *ливневые* осадки июня текущего года (R = 0.5). Эта закономерность относится к фенофазе роста междоузлий. Значимой связи с ливневыми осадками предыдущего года не обнаружено. Для *обложных* осадков значимы отрицательные корреляции (R = –0.54) для сентября предыдущего года. В целом свежие биотопы представляют собой условия оптимума для сосны согласно классификации В.Н. Сукачева [22], что означает отсутствие жесткого лимитирования фитоценозов по какому-либо фактору. Однако на песчаных и супесчаных почвах заповедника в июне древостои испытывают недостаток влаги, сигналом чего является положительная зависимость роста междоузлий от сумм осадков. При этом в конце вегетации, на этапе формирования почки возобновления (в сентябре), осадки вызывают водный стресс у растений и снижают приросты следующего вегетационного сезона.

Высокая значимая положительная связь линейного прироста свежего биотопа с общей суммой осадков прослеживается за июнь текущего и предыдущего года, а отрицательная – за сентябрь предыдущего года (R = 0.51, R = 0.40, R = –0.44 соответственно). За исключением июня (как текущего, так и предыдущего годов), связь линей-

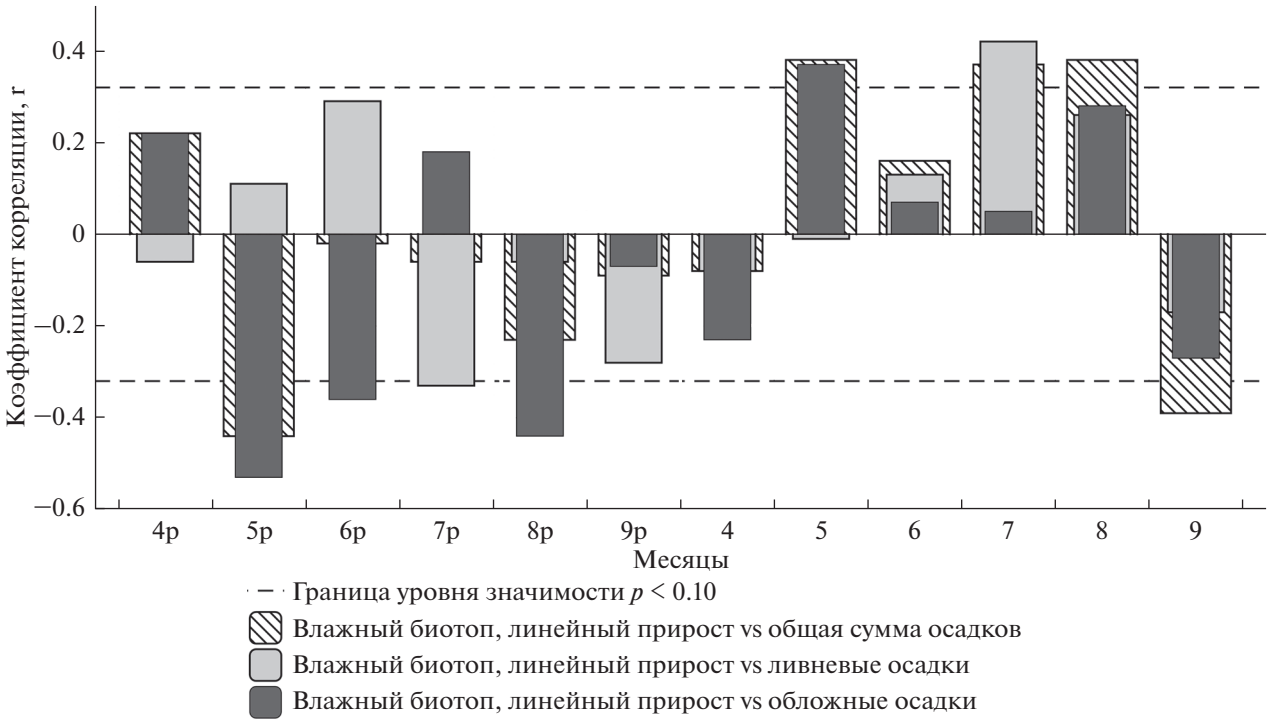

Рис. 1. Коэффициент корреляции Пирсона (*R*) между средними значениями линейного прироста сосны во влажных биотопах и осадками разного генезиса – ливневыми (светло-серый цвет) и обложными (темно-серый цвет), а также с общей суммой осадков (4, 5...9 – месяцы текущего года, 4р, 5р...9р – месяцы предыдущего года). Пунктиром показан 90%-ный доверительный интервал. Период, для которого производились сравнения, зависит от доступной длины рядов наблюдений за линейным приростом.

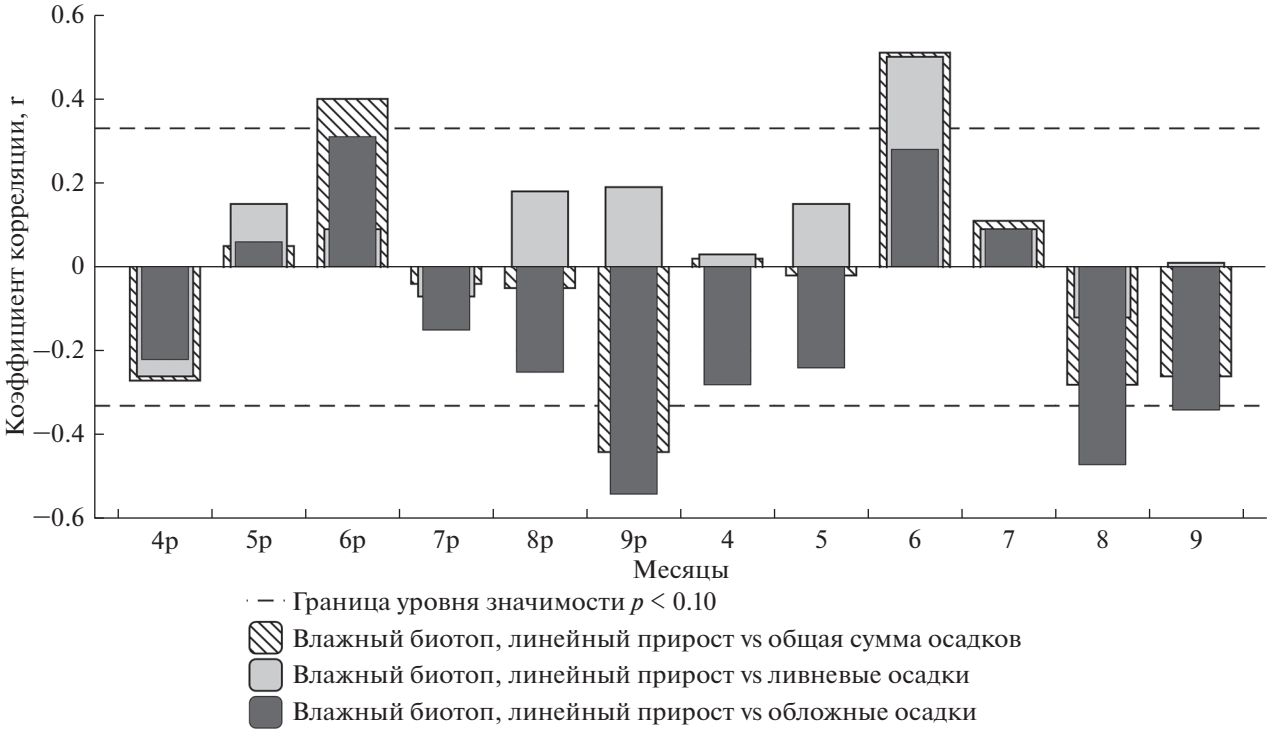

Рис. 2. Коэффициент корреляции Пирсона (*R*) между средними значениями линейного прироста сосны в свежих биотопах и осадками разного генезиса – ливневыми (светло-серый цвет) и обложными (темно-серый цвет), а также с общей суммой осадков (4, 5...9 – месяцы текущего года, 4р, 5р...9р – месяцы предыдущего года).

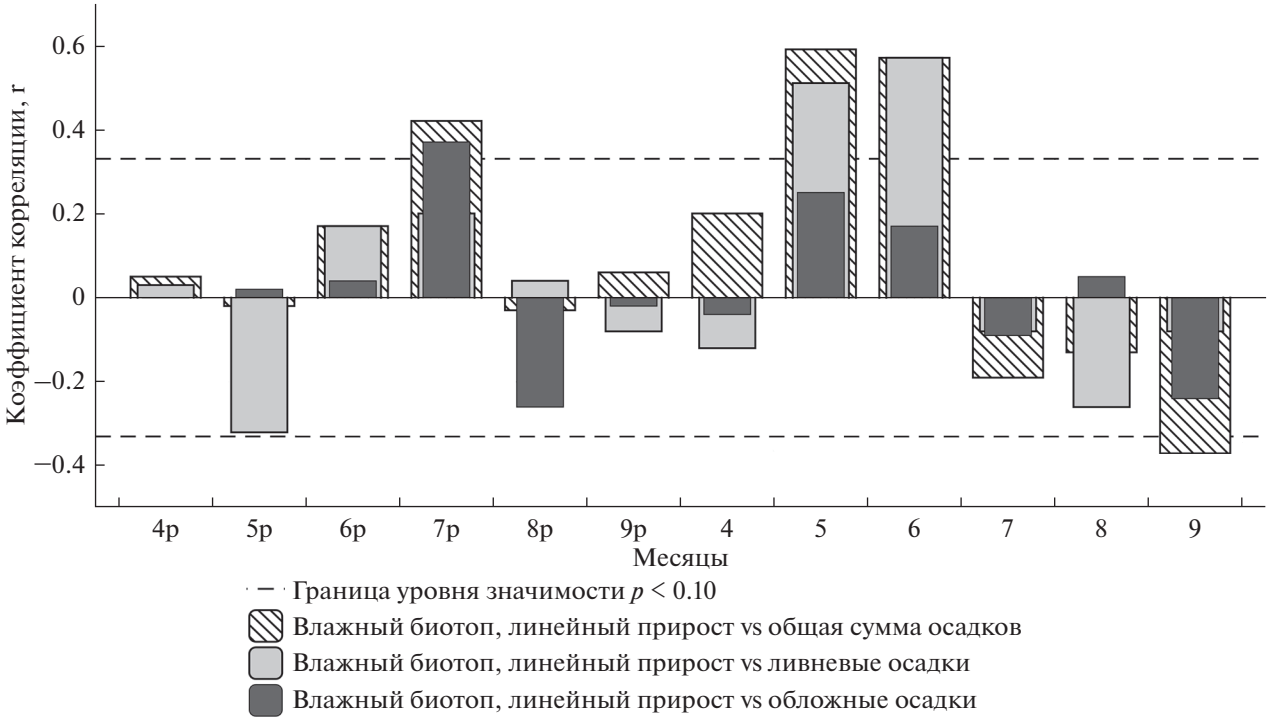

Рис. 3. Коэффициент корреляции Пирсона (*R*) между средними значениями линейного прироста сосны в сухих биотопах и осадками разного генезиса – ливневыми (светло-серый цвет) и обложными (темно-серый цвет), а также с общей суммой осадков (4, 5...9 – месяцы текущего года, 4р, 5р...9р – месяцы предыдущего года).

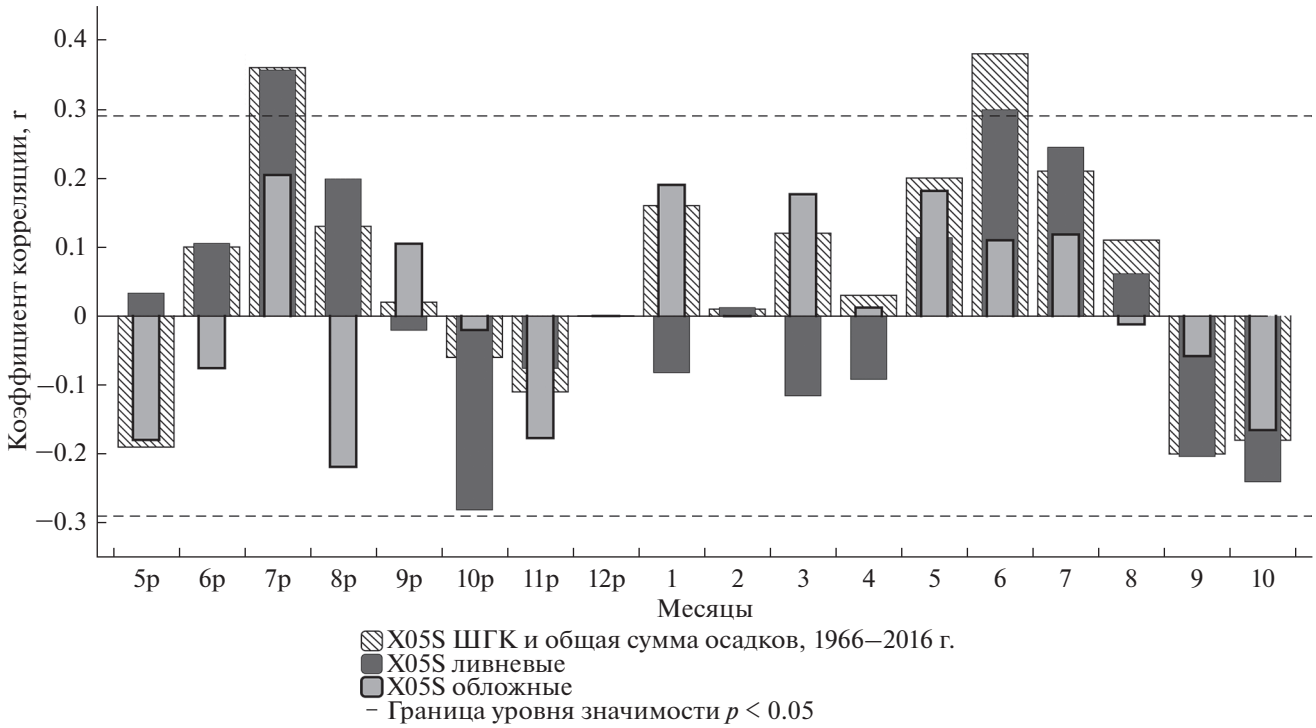

Рис. 4. Связь радиального прироста сосны (хронология X05S) с осадками разного генезиса и общей суммой осадков: коэффициент корреляции Пирсона (*R*) между значениями радиального прироста сосны и ливневыми, обложными осадками и общей суммой осадков, (4, 5 ... 9 – месяцы текущего года, 4р, 5р...9р – месяцы предыдущего года) для периода 1966–2016 гг.

ного прироста здесь с обложными осадками более сильная, чем с общей суммой осадков, что может указывать на высокую чувствительность линейного прироста к характеру выпадения осадков.

В *сухих биотопах* древостои постоянно испытывают недостаток влаги, который может быть восполнен только атмосферными осадками. Отмечены статистически значимые положительные корреляции с *ливневыми* осадками мая и июня текущего года (R = 0.51, R = 0.57 соответственно), что справедливо и для общей суммы осадков (R = = 0.59, R = 0.57 соответственно). Данная прямая зависимость характеризует фенофазу формирования линейного прироста. Значимых связей ливневых осадков и параметров роста предыдущего вегетационного сезона не обнаружено (рис. 3).

Не отмечены значимые зависимости *обложных осадков* и приростов текущего года, однако зафиксирована прямая связь осадков прошлого года и приростов текущего (R = 0.37), относящаяся к фенофазе начала формирования почки возобновления (июль). Аналогичная связь прослеживается и для общей суммы осадков (R = 0.42). Очевидно, эдафические особенности сухих местообитаний не позволяют древостою в полной мере воспользоваться влагой, поставляемой как ливневыми, так и обложными осадками.

Для общей суммы осадков также показана отрицательная значимая связь с линейным приростом в сентябре текущего года, на этапе формирования почки возобновления (R = –0.37). Для сухих биотопов выявлена бóльшая роль суммы осадков, а не характера их выпадения.

Радиальный прирост реагирует на ливневые осадки только в июне текущего года (R = 0.30) и в июле предыдущего (R = 0.36). Выявленные зависимости характерны для фенофазы роста ранней древесины в текущем году и начала формирования поздней древесины. При этом связи прироста с обложными осадками текущих и предыдущих лет не обнаружено (рис. 4).

Низкая по сравнению с линейным приростом чувствительность радиального прироста к осадкам, вероятно, обусловлена увлажнением, достаточным для роста ствола в ширину в свежих биотопах [23]. Как было показано ранее, радиальный прирост более чувствителен к индексам засушливости, которые представляют собой комплексную величину, состоящую из увлажнения и эвапортанспирации [30].

Как и для большинства хронологий Поволжья, радиальный прирост сосны демонстрирует положительную значимую связь с общей суммой осадков в июне текущего и предыдущего года (R = 0.38, R = 0.36 соответственно) [5, 20], за остальные месяцы значимая связь отсутствует.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных измерений позволил сделать вывод о том, что наблюдается корреляция (положительная или отрицательная) между количеством ливневых и обложных осадков и количественными показателями, характеризующими отдельные фенофазы сосны обыкновенной. Общая сумма осадков оказывает влияние на все фенофазы, зависимые по отдельности от ливневых или обложных осадков.

Линейный прирост сосны во всех биотопах обнаруживает прямую зависимость от ливневых осадков как текущих, так и предыдущих лет. Наиболее вероятной причиной этого является относительно низкая влагоемкость почв свежих и сухих местообитаний Керженского заповедника, вследствие которой древостои разово получают необходимый запас воды, но переувлажнения не образуется. Исключение составляет обратная зависимость, выявленная для фенофазы начала формирования почек возобновления предыдущего года во влажных биотопах, скорее всего, вызванная водным стрессом, нехваткой кислорода в корнеобитаемом слое и, как следствие, снижением приростов текущего вегетационного сезона.

Обложные осадки, напротив, связаны с линейным приростом сосняков обратной зависимостью: длительное поступление влаги в фитоценозы вызывает переувлажнение и дефицит кислорода в корнеобитаемом слое, что снижает приросты деревьев текущего года и качество почек возобновления предыдущего вегетационного сезона. Общую закономерность нарушает прямая зависимость для фенофаз роста междоузлий во влажных биотопах (в текущем году), а также формирования почек возобновления в сухих местообитаниях (в предыдущем вегетационном сезоне). В этих двух случаях причинами значимых положительных корреляций является, по-видимому, характерный для указанных биотопов дефицит влаги в моменты роста междоузлий и почек возобновления, восполняемый осадками.

Радиальный прирост сосны обыкновенной демонстрирует более слабый отклик на осадки разного генезиса, показывая значимую положительную связь с ливневыми осадками текущего и предыдущего года, характерную для фенофаз формирования ранней (в текущем году) и поздней (в предыдущем году) древесины. Для обложных осадков как текущих, так и предыдущих лет статистически значимой связи с радиальным приростом не обнаружено.

На основании полученных в данной статье результатов, а также опубликованных ранее научных работ можно сделать вывод о меньшей чувствительности радиального прироста *P. sylvestris* к сигналу осадков, чем линейного. Однако данный вывод требует подтверждения на основе результатов дальнейших исследований на более обширной территории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках темы ГЗ № 0148-2019-0004, анализ линейных приростов сосны обыкновенной выполнен в рамках темы ГЗ № 0148-2019-0009; разделение общей суммы осадков на осадки разного генезиса проведено в рамках проекта РНФ 18-47-06203.

FUNDING

The study was fulfilled within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. 0148-2019-0004. The analysis of Scots Pine's linear increment was carried out within the framework f the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. 0148-2019-0009. The total precipitation sum separation into precipitation with different genesis was executed with financial support of the Russian Science Foundation (project no. 18-47-06203).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алисов Б.П.* Климат СССР / М.: Изд. Моск. ун-та, 1956. 128 с.
2. *Битвинскас Т.Т.* Динамика прироста сосновых насаждений и возможности ее прогнозирования (в условиях Литовской ССР) // Докл. ТСХ. 1964. Вып. 99. С. 497–503.
3. *Битвинскас Т.Т.* Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 170 с.
4. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
5. *Волкова Г.Л., Позднякова Е.А., Волков А.А., Кухта А.Е.* Воздействие климатических факторов на линейный прирост лесокультур и естественного возобновления сосны обыкновенной в Пензенской области // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 107–118.
6. *Демежко Д.Ю., Соломина О.Н.* Изменения температуры земной поверхности на о. Кунашир за последние 400 лет по геотермическим и древесно-кольцевым данным // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 1. С. 628–631.
7. *Золина О.Г., Булыгина О.Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 1. С. 84–103.
8. *Косарев В.П.* Лесная метеорология с основами климатологии: учеб. пособие для вузов / ред. В.П. Косарев. СПб.: ЛТА, 2002. 264 с.
9. *Кузнецова В.В., Пожидаева Д.С.* Возможности и ограничения реконструкции стока рек и условий засушливости Поволжья методами дендрохронологии // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 4. С. 46–65. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-4-46-65
10. *Кухта А.Е.* Влияние температуры и осадков на годичный линейный прирост сосны обыкновенной на берегах Кандалакшского залива // Лесной вестн. 2009. № 1 (64). С. 61–67.
11. *Кухта А.Е., Румянцев Д.Е.* Линейный и радиальный приросты сосны обыкновенной в Волжско-Камском и Центрально-Лесном государственных природных заповедниках // Лесной вестн. 2010. № 3. С. 88–93.
12. *Кухта А.Е., Титкина С.Н.* Климатогенные колебания линейного прироста ювенильных растений сосны обыкновенной в модельных древостоях в Пензенской области // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. Т. XX. С. 251–261.
13. *Лопатин Е.В., Алексеев А.С.* Сравнительный анализ идентификации трендов в приростах по диаметру и высоте ели сибирской и сосны обыкновенной в республике Коми // Изв. Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. № 189. С. 25–34.
14. *Мохов И.И., Рекнер Э., Семенов В.А., Хон В.Ч.* Экстремальные режимы осадков в регионах Северной Евразии в XX в. и их возможные изменения в XXI веке // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 6. С. 818–821.
15. Облака и облачная атмосфера / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. 648 с.
16. *Овчинникова Д.В., Ваганов Е.А.* Дендрохронологические характеристики лиственницы сибирской (Larix sibirica Ldb.) на верхней границе леса в Горном Алтае // Сиб. экол. журн. 1999. Т. 6. № 2. С. 145–152.
17. Особо охраняемые природные территории Российской Федерации. http://www.zapoved.ru/catalog/ (дата обращения 05.09.2018).
18. *Романовская А.А., Волкова Г.Л., Кухта А.Е. и др.* Изменчивость линейного прироста посадок и естественного возобновления сосны обыкновенной на территории Пензенской области // Тр. Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. 2017. № 1. С. 4–13.
19. *Рысин Л.П., Савельева Л.И.* Сосновые леса России. М.: Товарищество научн. изданий КМК, 2008. 289 с.
20. *Бушуева И.С., Долгова Е.А., Золотокрылин А.Н., Кузнецова В.В., Кузнецова Т.О., Кухта А.Е., Лазукова Л.И., Ломакин Н.А., Мацковский В.В., Матвеев С.М., Михайлов А.Ю., Михаленко В.Н., Пожидаева Д.С., Румянцев Д.Е., Сакулина Г.А., Семёнов В.А., Хасанов Б.Ф., Черенкова Е.А., Чернокульский А.В., Соломина О.Н.* Засухи Восточно-европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным. М.–СПб.: Нестор-История, 2017. 360 с.
21. *Соломина О.Н., Долгова Е.А., Максимова О.Е.* Реконструкция гидрометеорологических условий последних столетий на Северном Кавказе, Крыму и Тянь-Шане по дендрохронологическим данным. М.–СПб.: Нестор-История, 2012. 232 с.
22. *Сукачев В.Н.* О принципах генетической классификации в биоценологии // Журн. общ. биологии. 1944. Т. 5. № 4. С. 213–227.
23. *Черногаева Г.М., Кухта А.Е.* Отклик бореальных древостоев на современные изменения климата на севере Европейской части России // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. М.: Изд. "Планета". С. 111–119.
24. *Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г. и др.* Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 425–435.
25. *Шиятов С.Г.* Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 137 с.
26. *Baillie M.G.L., Munro M.A.R.* Irish tree rings, Santorini and volcanic dust veils // Nature. 1988. V. 332. № 6162. P. 344–346.
27. *Bradley R.S.* Paleoclimatology. Reconstructing climates of the Quaternary. Third edition. UK: Elsevier, 2015. P. 667.

28. *Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., Bulygina O.N., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Observed changes in convective and stratiform precipitation over Northern Eurasia during the last decades // Env. Res. Let. 2019. V. 4. № 4. P. 045001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82
29. Climate Change 1995. The Science of Climate Change / IPCC. 1996. T. 2. http://ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_I/ipcc_sar_wg_I_full_report.pdf (дата обращения 11.10.2018). 572 p.
30. *Dai A.* Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008 // J. of Geophys Res. 2011. V. 116. № D12115. https://doi.org/10.1029/2010JD015541
31. *Dengel S., Aeby D., Grace J.* A relationship between galactic cosmic radiation and tree rings // New Phytologist. 2009. V. 184. № 3. P. 545–551.
32. *Donat M.G., Lowry A.L., Alexander L.V., O'Gorman P.A., Maher N.* More extreme precipitation in the world's dry and wet regions // Nature Clim. Change. 2016. № 6. P. 508–513.
33. *Gavrikov V.L., Karlin I.V.* A dynamic model of tree terminal growth // Canadian J. of Forest Res. 1993. V. 23. № 2. P. 326–329.
34. *Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N.* Trends in Intense Precipitation in the Climate Record // J. Climate. 2005. V. 18. № 9. P. 1326–1350.
35. *Semenov V.A., Bengtsson L.* Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // Clim. Dyn. 2002. V. 19. № 2. P. 123–140.
36. *Solomina O., Maximova O., Cook E. Picea Schrenkiana* ring width and density at the upper and lower tree limits in the Tien Shan mts (Kyrgyz republic) as a source of paleoclimatic information // Geogr. Env. Sustain. 2014. V. 7. № 1. P. 66–79.
37. *Ye H., Fetzer E.J., Wong S., Behrangi A.* Increasing atmospheric water vapor and higher daily precipitation intensity over northern Eurasia // Geophys. Res. Let. 2015. V. 42. № 21. P. 9404–9410.
38. *Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Gulev S.K., Koltermann P.* Changes in the Duration of European Wet and Dry Spells during the Last 60 Years // J. Climate. 2013. V. 26. № 6. P. 2022–2047. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00498.1

The Connection Between Scots Pine Linear and Radial Increment with Different Genesis' Precipitation in Forests of the Kerzhenskiy Reserve

V. V. Kuznetzova[1], A. V. Chernokulsky[2], F. A. Kozlov[2], and A. E. Kukhta[1, 3, #]

[1]*Institute of Geography of RAS, Moscow, Russia*

[2]*Obukhov Institute of Atmospheric Physics of RAS, Moscow, Russia*

[3]*Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: anna_koukhta@mail.ru*

Received March 25, 2019; revised May 29, 2019; accepted October 3, 2019

Climatic signal in the linear and radial increment of Scots pine (Pinus sylvestris L.) growing on the Russian Plain and particularly in Kerzhenskiy national reserve (the Republic of Tatarstan) is well examined. It was determined that precipitation is the key factor of the tree growth in the temperate climate. At the same time, changing character of precipitation was revealed on the Russian Plain for the last five decades. It is associated with long-term increase of convective showers and decrease of stratiform precipitation. Therefore, the study's important task is to examine the relationship between Scots pine increment and the different types of precipitation. The issue examines the relations between linear and radial increment and precipitation of different genesis in three biotope types: moist, fresh and dry. The linear increment shows sensitivity to heavy showers in the beginning of the growing season when a tree strongly depends on soils moisture. All biotope types show a significant positive signal to the convective precipitation except moist biotope which shows a negative signal. It can be explained by water stress and oxygen deficit in the root layer. Stratiform precipitation has significant negative influence on the linear increment. This fact indicates a negative impact of the prolonged moisturizing on the increment of the current year and the quality of the renewal bud in the previous season. Radial tree increment demonstrates a less significant response to precipitation of different genesis. It is characterized by a positive relationship with proportion of heavy rains at the beginning of the current growing season when early wood forms and the second half of the previous year growing season when a more mature wood begins to form.

Keywords: Scots pine, radial increment, linear increment, dendrochronology, dendroclimatology, annual tree-rings, convective and stratiform precipitation

REFERENCES

1. Alisov B.P. Klimat SSSR [Climate of the USSR]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1956. 128 p.
2. Bitvinskas T.T. The growth dynamics of pine plantations and the possibility of its forecasting (in the Lithuanian SSR). *Dokl. TSKhA*, 1964, vol. 99, pp. 497–503. (In Russ.).
3. Bitvinskas T.T. *Dendroklimaticheskie issledovaniya* [Dendroclimatological Studies]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 170 p.
4. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Statistics Tables]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 416 p.
5. Volkova G.L., Pozdnyakova E.A., Volkov A.A., Koukhta A.E. Influence of climatic factors on Scots pine forestation and natural undergrowth in the Penza region. *Fundamental'naya i Prikl. Klimatologiya*, 2016, no. 2, pp. 107–118. (In Russ.).
6. Demezhko D.Yu., Solomina O.N. Ground surface temperature variations on Kunashir Island in the last 400 years inferred from borehole temperature data and tree-ring records. *Dokl. Earth Sci.*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 628–631.
7. Zolina O.G., Bulygina O.N. Current climatic variability of extreme precipitation in Russia. *Fundamental'naya i Prikl. Klimatologiya*, 2016, no. 1, pp. 84–103. (In Russ.).

8. Kosarev V.P. *Lesnaya meteorologiya s osnovami klimatologii: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Forest Meteorology and Basics of Climatology: Handbook]. St. Petersburg: LTA, 2002. 264 p.
9. Kuznetsova V.V., Pozhidaeva D.S. Opportunities and limitations for the reconstruction of river runoff dryness conditions in the Volga region with dendrochronology methods. *Fundamental'naya i Prikl. Klimatologiya,* 2017, no. 4, pp. 46–65. (In Russ.). doi 10.21513/2410-8758-2017-4-46-65
10. Koukhta A.E. Temperature and precipitation influence on the annual linear Scots pine inctement on the banks of the Kandalaksha Gulf. *Lesnoi Vestn.*, 2009, no. 1, pp. 61–67. (In Russ.).
11. Koukhta A.E., Rumyantsev D.E. Linear and radial Scots pine increment in Volzshko-Kamsky and Central-Forest natural reserves. *Lesnoi Vestn.*, 2010, no. 3, pp. 88–93. (In Russ.).
12. Koukhta A.E., Titkina S.N. Climatogenic variations of juvenile Scots pine linear increment in model forest stands in Penza region. In *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2005, vol. 20, pp. 251–261. (In Russ.).
13. Lopatin E.V., Alekseev A.S. The comparative analysis of trends identifications in the radial and height increment of pine and spruce in Komi Republic. *Izv. Sankt-Peterburgskoi Lesotekhnicheskoi Akad.*, 2009, no. 189, pp. 25–34. (In Russ.).
14. Mokhov I.I., Reockner E., Semenov V.A., Khon V.Ch. Extreme regimes of precipitation regions of Northern Eurasia in the 20th century and their possible changes in the 21st century. *Dokl. Akad. Nauk*, 2005, vol. 402, no. 6, pp. 818–821. (In Russ.).
15. *Oblaka i oblachnaya atmosfera* [Clouds and Cloudy Atmosphere]. Mazin I.P., Khrgian A Kh., Eds. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989. 648 p.
16. Ovchinnikova D.V., Vaganov E.A. Siberian larch (Larix sibirica Ldb.) dendrochronological characteristics on the upper forest boundary in Altai mountainous area. *Sibir. Ekol. Zh.*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 145–152. (In Russ.).
17. Conservation Areas in the Russian Federation. Available at: http:// http://www.zapoved.ru/catalog/ (accessed: 05.09.2018). (In Russ.).
18. Romanovskaya A.A., Volkova G.L., Pozdnyakova E.A., Volkov A.A., Koukhta A.E. The linear increment variability of Scots pine in plantations and under forest canopy on the Penza region territory. *Tr. S.-Peterb. Nauchn.-Issled. Inst. Lesnogo Khozyaistva*, 2017, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.).
19. Rysin L.P. *Sosnovye lesa Rossii* [Russian Pine Tree Forests]. Rysin L.P., Savel'eva L.I., Eds. Moscow: Tov-vo Nauchn. Izd. KMK Publ., 2008. 289 p.
20. Solomina O.N. et al. *Zasukhi Vostochno-evropeiskoi ravniny po gidrometeorologicheskim i dendrokhronologicheskim dannym* [Droughts of the East European Plain according to Hydrometeorological and Tree-Ring Data]. Moscow, St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2017. 360 p.
21. Solomina O.N., Dolgova E.A., Maksimova O.E. *Rekonstruktsiya gidrometeorologicheskikh uslovii poslednikh stoletii na Severnom Kavkaze, Krymu i Tyan'-Shane po dendrokhronologicheskim dannym* [Tree-ring Based Hydrometeorological Reconstructions in Crimea, Caucasus and Tian-Shan]. Moscow, St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2012. 232 p.
22. Sukachev V.N. On the principles of genetical classification in biocenology. *Zh. Obshchei Biol.*, 1944, vol. 5, no. 4, pp. 213–227. (In Russ.).
23. Chernogaeva G.M., Koukhta A.E. The effect of climate change on boreal forests of Arctic European Russia. *Meteorol. Gidrol.*, 2018, no. 6, pp. 111–119. (In Russ.).
24. Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., Bulygina O.N., Semenov V.A. Climatology of precipitation of different genesis in Northern Eurasia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 7, pp. 425–435.
25. Shiyatov S.G. *Dendrokhronologiya verkhnei granitsy lesa na Urale* [Dendrochronology of the Upper Tree Line in the Ural Region]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 137 p.
26. Baillie M.G.L., Munro M.A.R. Irish tree rings, Santorini and volcanic dust veils. *Nature*, 1988, vol. 332, no. 6162, pp. 344–346.
27. Bradley R.S. *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary.* Elsevier, 2015, 3 ed. 667 p.
28. Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., Bulygina O.N., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation over Northern Eurasia during the last decades. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 4, no. 4, p. 045001. doi 10.1088/1748-9326/aafb82
29. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K., Eds. Cambridge Univ. Press, 1996, vol. 2, 572 p.
30. Dai A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, no. D12115. doi 10.1029/2010JD015541
31. Dengel S., Aeby D., Grace J. A relationship between galactic cosmic radiation and tree rings. *New Phytologist*, 2009, vol. 184, no. 3, pp. 545–551.
32. Donat M.G, Lowry A.L, Alexander L.V., O'Gorman P.A, Maher N. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nat. Clim. Change,* 2016, no. 6, pp. 508–513.
33. Gavrikov V.L., Karlin I.V. A dynamic model of tree terminal growth. *Can. J. Forest Res.*, 1993, vol. 23, no. 2, pp. 326–329.
34. Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N. Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Climate*, 2005, vol. 18, no. 9, pp. 1326–1350.
35. Semenov V.A., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Clim. Dyn.,* 2002, vol. 19, no. 2, pp. 123–140.
36. Solomina O., Maximova O., Cook E. *Picea Schrenkiana* ring width and density at the upper and lower tree limits in the Tien Shan mts (Kyrgyz republic) as a source of paleoclimatic information. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 66–79.
37. Ye H., Fetzer E.J., Wong S., Behrangi A., Yang D., Lambrigtson B.H. Increasing atmospheric water vapor and higher daily precipitation intensity over northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, no. 21, pp. 9404–9410.
38. Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Gulev S.K., Koltermann P. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. *J. Climate*, 2013, vol. 26, no. 6, pp. 2022–2047. doi 10.1175/JCLI-D-11-00498.1