

УДК 574.4:630*6

В. В. Лукин¹, Н. В. Кныш², М. В. Ермохин², Т. Л. Барсукова¹, В. В. Савельев¹¹Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича
Национальной академии наук Беларуси²ОО «Ботаническое общество»**ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА «ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА» НА ДИНАМИКУ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)**

Активное развитие урбанизированных территорий вызывает изменение локального климата, что влияет также на рост и развитие древесной растительности. В работе представлены результаты исследования влияния так называемого «городского острова тепла» на динамику радиального прироста деревьев сосны, произрастающих в лесопарке «Слепянка» г. Минска. Активный рост города и создание крупных промышленных предприятий началось в послевоенные годы. К 1960-м гг. метеостанция «Минск», которая ранее находилась за городом, оказалась на его границе, а к 1980-м – в пределах города. В то же время недалеко от нее, на территории Пуховичского лесхоза в окрестностях метеостанции «Марьина Горка», расположенной в 60 км на юго-запад от Минска, сохранился крупный лесной массив. Контрольным объектом в этом массиве являются деревья сосны, произрастающие в аналогичном типе леса и имеющие такой же возраст. Городское потепление привело к увеличению радиального прироста в среднем от 9 до 16% по сравнению с контрольными древостоями начиная с 1980-х гг. Однако деревья стали более чувствительными к летним засухам и усилилась связь радиального прироста с зимними и ранневесенними температурами воздуха. Результаты подтверждают, что глобальное потепление климата будет способствовать увеличению продуктивности сосновых лесов в центральной части Беларуси, но делать их более восприимчивыми к неблагоприятным климатическим факторам. Это позволяет использовать деревья, которые растут в крупных городских лесопарках, для прогноза изменения продуктивности и устойчивости насаждений при дальнейшем изменении климата за пределами города в том же регионе.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, ширина годичного кольца, климат, город.

Для цитирования: Лукин В. В., Кныш Н. В., Ермохин М. В., Барсукова Т. Л., Савельев В. В. Влияние эффекта «городского острова тепла» на динамику радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 13–20.
DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-2.

V. V. Lukin¹, N. V. Knysh², M. V. Yermokhin², T. L. Barsukova¹, V. V. Saveliev¹¹V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany
of the National Academy of Science of Belarus²PA “Botanical Society”**IMPACT OF THE URBAN HEAT ISLAND EFFECT ON TREE-RING DYNAMICS OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.)**

The active development of urbanized territories causes a change in the local climate and last impact to the growth and development of trees. The results of a study of the impact of the so-called “urban heat island” effect on the dynamics of tree-rings of Scots pine growing in the forest park “Slepyanka” in Minsk are presents. The active growth of the city and the development of large industrial enterprises began in the post the Second World War years. By the 1960s, the Minsk weather station, which was previously located outside the city, found itself on its border, and by the 1980s – within the city. At the same time, a large forest area has been preserved not far from it. The control object is pine trees growing in the same type of forest and of a similar age on the territory of the Pukhovichi forestry enterprise not so far from the Maryina Gorka weather station, located 60 km to the southwest of Minsk. Urban warming has increased radial growth by 9 to 16% compared to control stands since the 1980s. However, trees become more sensitive to summer droughts and the relationship between radial growth and winter-early spring air temperatures increases. The results confirm that global warming can increase the productivity of pine forest in Belarus but make them more susceptible to unfavorable climatic factors. This makes it possible to use trees that grow in large urban forest parks to predict changes in the productivity and sustainability of forest stands outside the city in the same region with further climate change.

Keywords: Scots pine, tree ring width, climate, town.

For citation: Lukin V. V., Knysh N. V., Yermokhin M. V., Barsukova T. L., Saveliev V. V. Impact of the urban heat island effect on tree-ring dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 2 (282), pp. 13–20 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-2.

Введение. Леса являются важным компонентом урбанизированных природно-территориальных комплексов. Сохранение их устойчивости в условиях комплексного интенсивного антропогенного воздействия должно строиться с учетом происходящих климатических изменений. Особого внимания заслуживает и то, что сам город, развиваясь, меняет локальный климат быстрее, чем это происходит на сопредельных территориях. Создается так называемый «городской остров тепла», особенности которого подробно описаны в климатологии [1, 2]. Основное потепление в городе идет за счет ночных температур, что было четко показано и на примере Минска [3]. Превышение дневных летних температур в Марьиной Горке по сравнению с Минском стало особенно заметно в последние десятилетия. Кроме того, при положительном тренде ночные температуры в городе остаются выше, чем в сельской местности с 1977 г. Существование острова тепла приводит к удлинению безморозного периода, соответствующего сдвигу дат весенних и осенних заморозков. На 3–4 дня позже, чем в пригороде, образуется устойчивый снежный покров, и на несколько дней раньше он сходит. Такие различия, хоть и незначительные, должны стимулировать прирост растений, в том числе и древесных, расположенных в городе, но удаленных от прямых источников загрязнения. В то же время, сами деревья (и особенно насаждения) позволяют понизить температуру воздуха в городах, что можно использовать для адаптации городов к потеплению климата [4].

Изменение реакции деревьев различных пород на климатические факторы в городе и повышение их чувствительности было показано в ряде работ [5–9], а у некоторых пород деревьев был выявлен положительный тренд в радиальном приросте [10]. Например, на территории Берлина деревья широколиственных пород (ясень, бук, дуб черешчатый и скальный) показывают высокую чувствительность к летним засухам, в то время как деревья хвойных пород (сосна обыкновенная, псевдотсуга Мензиса) – к зимним и ранневесенним температурам. Причем климатический сигнал в годичных кольцах деревьев меняется по градиенту от центра города к периферии, что позволяет оценивать вклад именно «городского острова тепла» в формирование прироста [8].

По мере развития города его климат становится похожим на климат более южных регионов, что позволяет оценить, как древесные растения будут себя чувствовать при дальнейшем

потеплении климата в тех же географических условиях. Несмотря на имеющиеся исследования, вопрос о степени воздействия этих изменений на состояние деревьев и продуктивность древостоев до сих пор остается малоизученным. Во многом это связано с тем, что на деревья в городе оказывает воздействие большое количество других факторов: рекреация, загрязнение, повреждение стволов и корневых систем и пр. Поэтому выбор объекта исследований имеет важное значение для оценки влияния климатических факторов на городские насаждения.

В нашей работе мы поставили две задачи: во-первых, оценить влияние потепления на изменение тренда радиального прироста деревьев, а во-вторых – определить климатические факторы, которые вызывают эти изменения.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования послужили деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), растущие в лесопарке «Слепянка» в городе Минске. Особенностью лесного массива является то, что до 1950–60-х гг. он располагался за пределами города, так же как и Минская метеостанция. По мере роста города они оказались со всех сторон окружены городской застройкой и линиями коммуникации. Это позволило оценить время начала воздействия «городского острова тепла» на деревья. Контрольным объектом являются деревья сосны, произрастающие на территории Пуховичского лесхоза в окрестностях метеостанции «Марьиная Горка» (рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения объектов исследования

Для исследования были подобраны насаждения близкого возраста – 120–140 лет, орлякового типа леса в соответствии с белорусской лесной

типологией [11, 12], с отсутствием или минимальными следами лесохозяйственного воздействия. Кроме того, чтобы снизить влияние локальных условий, керны отбирались у деревьев, произрастающих в нескольких близко расположенных древостоях. Всего было отобрано по 35 деревьев в модельном и контрольном лесных массивах, однако часть деревьев имела скрытые повреждения ствола, поэтому они были исключены из анализа.

Образцы древесины (керны) отбирали приростным буром по два из ствола на высоте 1,3 м от корневой шейки. В камеральных условиях подготовленные образцы древесины сканировались на планшетном сканере с разрешением 1200 dpi. Измерение ширины годичных колец выполнено по отсканированному изображению в программном обеспечении ArcGIS с точностью 0,01 мм. Для каждого дерева из двух измеренных кернов получали усредненный ряд.

Перекрестное датирование, выявление ложных и выпавших колец проведено с использованием кросс-корреляционного анализа [13]. Для оценки связи между древесно-кольцевыми хронологиями (ДКХ) использованы коэффициент синхронности (GLK) [14] и *t*-критерий [15], а для оценки степени воздействия климатических факторов на изменение величины прироста – коэффициент чувствительности [16]. Стандартизация изменчивости радиального прироста проводилась для каждого дерева с дальнейшим усреднением индексов по пробной площади и построением стандартизированной хронологии. Для сглаживания возрастных кривых использованы экспоненциальная кривая и функция Хагершофа [17, 18]. В результате построено две древесно-кольцевые хронологии: MNS07 (Минск) и PHV01 (Марьяна Горка), краткая характеристика которых приведена в таблице.

Для оценки влияния на радиальный прирост деревьев климатических данных и построения функций отклика использованы месячные суммы осадков и среднемесячные температуры воздуха по метеорологическим станциям «Минск» и «Марьяна Горка».

Перекрестное датирование отдельных серий годичных колец и ДКХ выполнено в программе COFESNA 6.06P, расчеты кривых для элиминирования возрастных трендов, индексов прироста и авторегрессионное моделирование – в про-

грамме ARSTAN40с, построение функций отклика радиального прироста на климатические факторы – в программе RESPO [19].

Результаты исследования. Метеорологическая станция в Минске ведет наблюдения с 1887 г. и на момент создания она находилась в 4 км от Минска (рис. 2). Вплоть до Второй мировой войны она находилась за пределами города. Бурный рост города произошел в послевоенные годы и уже к началу 1960-х гг. метеостанция оказалась на самой окраине города. С севера и запада к ней уже подступала жилая застройка. К 1980-м гг. городская застройка окружала метеостанцию со всех сторон, и с каждым годом подступала все ближе. Лесной массив «Слепянка» полностью попал в окружение города в 1980-х гг. (рис. 2). Таким образом, заметное изменение климатических показателей на метеостанции, связанных с развитием урбанизации территории, можно было ожидать с 1950–1960-х, а в лесном массиве – с 1980-х гг.

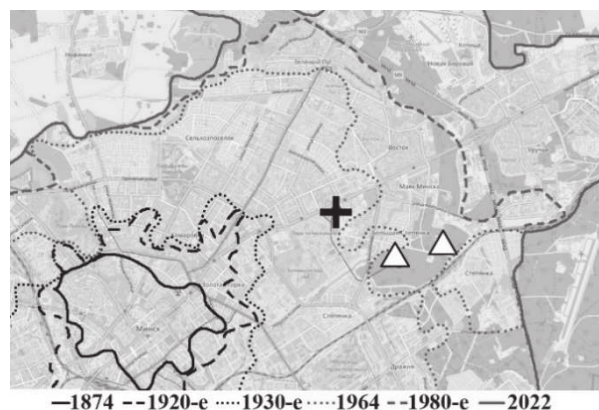


Рис. 2. Изменение условной границы городской агломерации Минска за последние 150 лет (обозначения те же, что на рис. 1)

На рис. 3 представлена динамика разности годовой суммы осадков и среднегодовых температур воздуха по метеостанциям «Минск» и «Марьяна Горка». Даже без проведения детального климатологического анализа видно, что на протяжении 1895–2020 гг. годовая сумма осадков на метеостанции «Минск» была в среднем выше на 60–70 мм, чем на метеостанции «Марьяна Горка», за исключением 1950-х гг. При этом разность температур начала сокращаться с 1955 г.

Характеристика древесно-кольцевых хронологий (ДКХ)

ДКХ	Количество деревьев	Период, гг.	Длина, лет	Тип ДКХ	Коэффициент чувствительности	Среднеквадратическое отклонение	Межсерийный коэффициент корреляции	Автокорреляция 1-го порядка
MNS07	34	1892–2015	124	raw	–	1,08	0,66	–
				std	0,16	0,23	–	0,61
				res	0,22	0,18	–	–
PHV01	29	1902–2015	114	raw	–	1,14	0,56	–
				std	0,12	0,20	–	0,69
				res	0,16	0,14	–	–

В 1895–1955 гг. среднегодовая температура воздуха в Минске была ниже на $0,2^{\circ}\text{C}$, чем в Марьиной Горке, в 1956–1977 гг. – на $0,1^{\circ}\text{C}$, а с 1977 г. и по настоящее время они в среднем сравнялись и разница колеблется по годам в пределах $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Только в 2019–2020 гг. на метеостанции в Минске среднегодовая температура воздуха оказалась ниже на $0,4–0,5^{\circ}\text{C}$, чем в Марьиной Горке. Причем происходит это все на фоне общего роста среднегодовых температур воздуха на обеих метеостанциях.

Более быстрый рост температур воздуха в Минске (рис. 3) четко повторяет рост города во второй половине XX в. (рис. 2). Потепление началось практически сразу, как только метеостанция оказалась в городской черте. При этом лесной массив «Слепянка» попал в полное окружение города спустя 10–20 лет.

Одна из основных проблем при оценке влияния климатических изменений на радиальный прирост деревьев – наличие у последних возрастного тренда, что не позволяет использовать и сравнивать абсолютные значения радиального прироста. Обязательно требуется проведение процедуры стандартизации и расчета индексов прироста. Широко используемые сплайны с узким окном приводят к полной элиминации долгопериодических колебаний и трендов в приросте. В нашем случае необходимо было использовать для стандартизации модели, которые позволяют удалить возрастную тренд, но сохраняют долгопериодические колебания. Поэтому для стандартизации радиального прироста нами были использо-

ваны две кривые: экспоненциальная функция и функция Хагершофа, специально разработанная для сглаживания возрастных кривых (рис. 4).

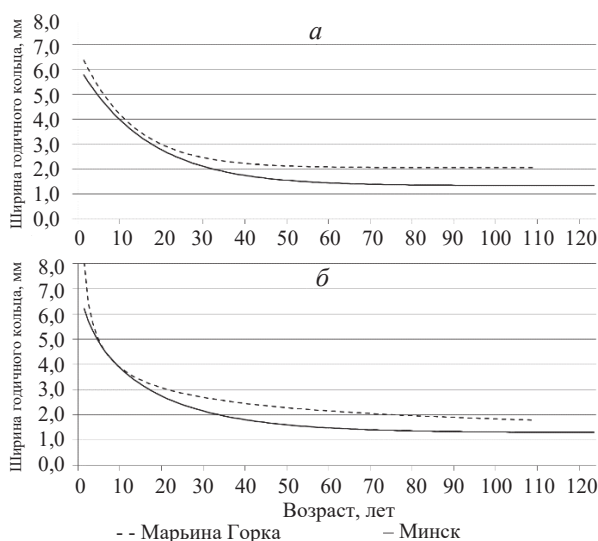


Рис. 4. Возрастные кривые радиального прироста в городском и фоновом насаждениях при стандартизации разными функциями: а – экспоненциальной; б – Хагершофа

Несмотря на один тип леса и близкий возраст деревьев, абсолютные значения прироста в фоновой древесно-кольцевой хронологии (PHV01) на 20–25% выше на протяжении всей жизни насаждения начиная с 15 лет. Связано это с несколько более богатыми почвенно-грунтовыми условиями.

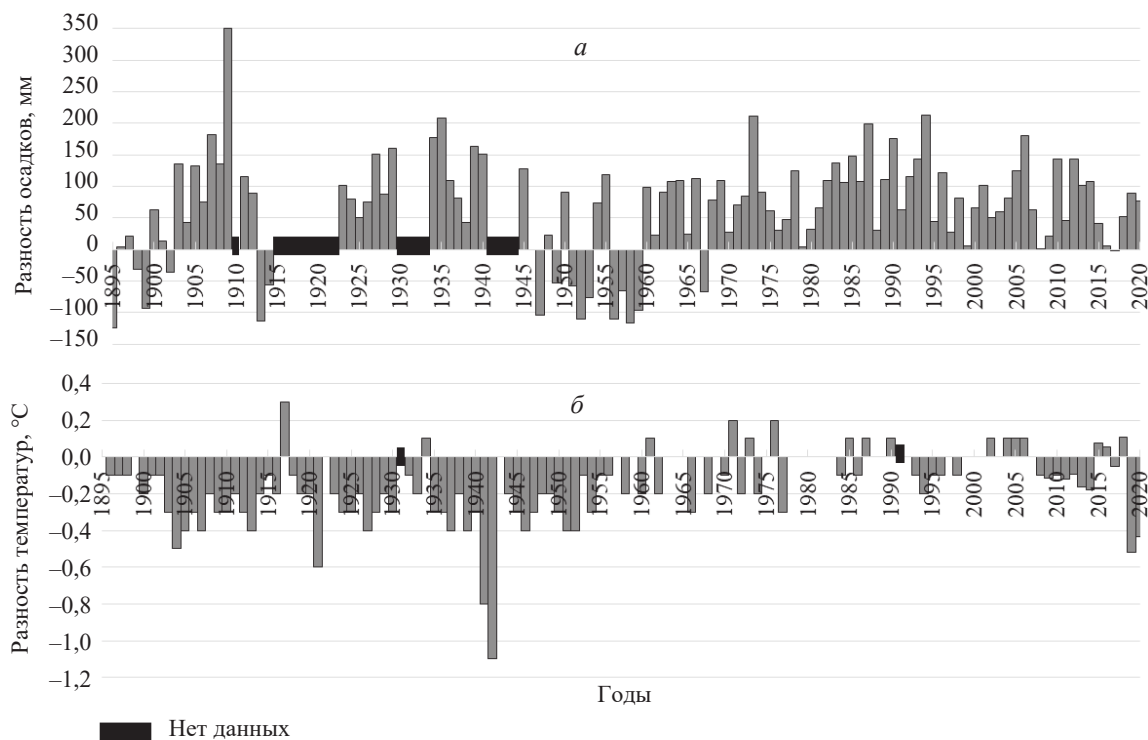


Рис. 3. Динамика разности годовой суммы осадков (а) и среднегодовых температур воздуха (б) по метеостанциям «Минск» и «Марьяна Горка»

При стандартизации радиального прироста разными функциями для городского насаждения различия находятся в пределах 1–2%. Для фонового насаждения они оказались гораздо более существенны. При расчете экспоненциальной кривой значения стабилизировались на уровне 2 мм с 50 лет, а при расчете функции Хагершофа радиальный прирост показывает постепенное снижение до 1,9 мм. Эти различия связаны с существенными флуктуациями радиального прироста у деревьев в молодом возрасте, когда в насаждениях, вероятно, проводились различные виды рубок. Поэтому сравнение индексов радиального прироста проводилось только для периода 1965–2015 гг.

В соответствии с дендрохронологическим зонированием сосны в Беларуси обе ДКХ относятся к Березинскому району [20] и показывают высокую корреляцию (t -критерий = 10,1) и синхронность ($GLK = 65\%$) друг с другом. При этом коэффициент чувствительности (таблица) хронологии MNS07 гораздо выше (0,16 у стандартизированной и 0,22 у остаточной), чем PHV01 (0,12 и 0,16 соответственно). Это подтверждается и другими исследованиями влияния «городского острова тепла» на рост деревьев: попадая в новые климатические условия, они становятся более восприимчивы к воздействию внешних факторов [5–9].

Сравнение индексов радиального прироста городского и фонового насаждений показывает устойчивое увеличение прироста деревьев, растущих в городе, с конца 1980-х гг. (рис. 5) независимо

от метода стандартизации. Эти различия в 2005–2015 гг. составляли в среднем 11% при стандартизации функцией Хагершофа и 19% при стандартизации экспонентой, а за весь период устойчивого увеличения (с 1980-х гг.) – 9 и 16% соответственно.

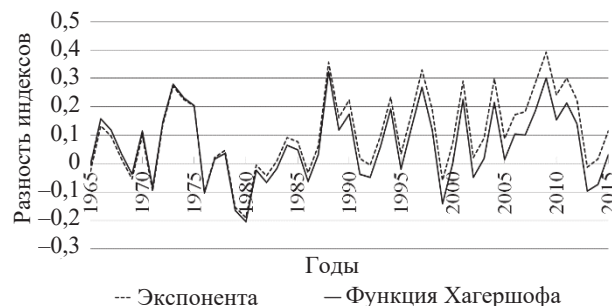


Рис. 5. Динамика разности индексов прироста городской (MNS07) и фоновой (PHV01) хронологии при стандартизации разными функциями

В то же время в годы с крайней напряженностью климатических факторов (в первую очередь летних засух) различия между городскими насаждениями и фоновыми исчезают (1991–1992, 1999, 2002–2003, 2013–2014 гг.) за счет большего снижения радиального прироста в городской ДКХ. Деревья, растущие в городских насаждениях, становятся более восприимчивы к колебаниям климатических факторов. Этот же факт подтверждает и анализ функций отклика радиального прироста на климат (рис. 6).

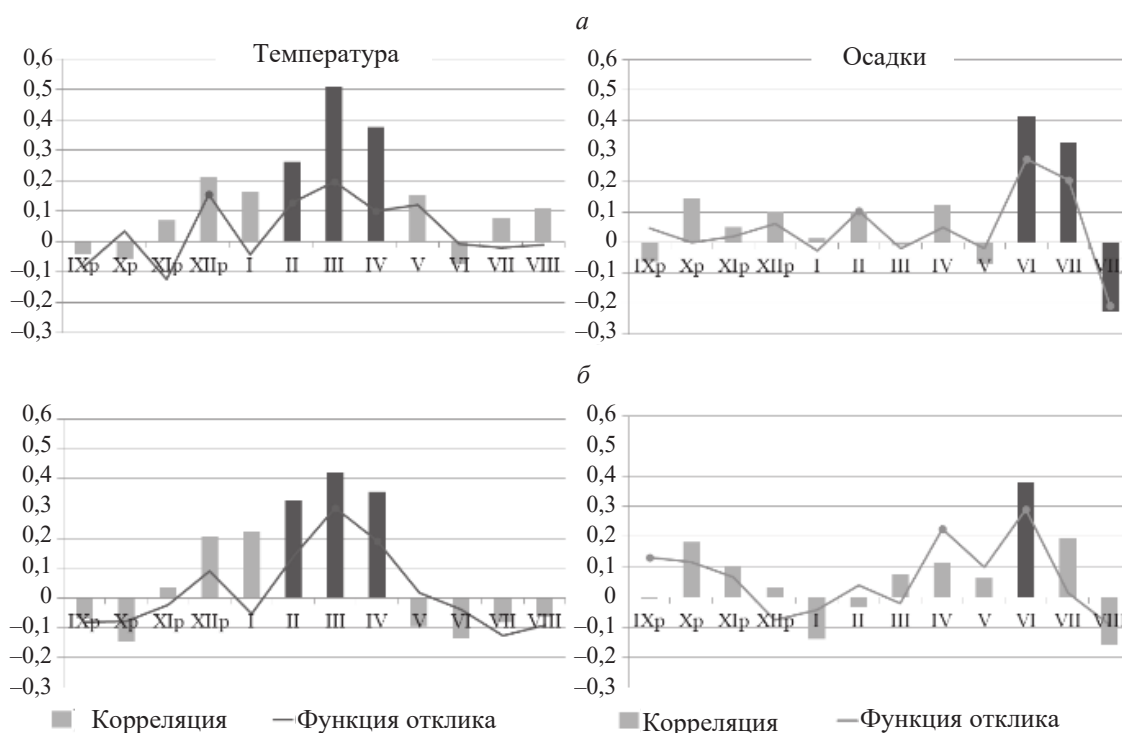


Рис. 6. Корреляция и функции отклика городской (а) и фоновой (б) хронологий сосны (значимые при $p < 0,05$ коэффициенты выделены темным цветом и маркерами)

Влияние климатических факторов (температуры воздуха и количества осадков) имеет одинаковую направленность как в городской, так и фоновой хронологиях. Причем и в одном, и в другом случаях функция отклика объясняет почти одинаковую погодичную вариацию прироста: 45,6% – в городской хронологии и 47,2% – в фоновой. В то же время оценка влияния погодных условий отдельных месяцев показывает некоторые отличия.

Основное влияние на формирование радиального прироста оказывают температуры февраля, марта и апреля в обеих ДКХ (коэффициент корреляции оставляет от 0,26 до 0,50). Причем наиболее значимая положительная связь выявлена с температурами марта и апреля. Однако коэффициенты функции отклика в фоновой хронологии значимы (при $p < 0,05$) только для марта и апреля, а в городской – еще и для февраля. Это в очередной раз подтверждает, что в центральной части Беларуси рост деревьев сосны в значительной степени ограничен продолжительностью вегетационного сезона [20], а в городе более высокие температуры ранневесенних месяцев стимулируют и раннее начало развития деревьев. Именно за счет этих месяцев возникает положительный тренд радиального прироста у деревьев, растущих в городских насаждениях.

В течение летних месяцев наиболее существенное влияние на радиальный прирост деревьев как в фоновой, так и городской ДКХ, оказывают осадки. Но в фоновой хронологии достоверным является только положительное влияние осадков июня – периода, когда идет максимальный прирост древесины. Для городской хронологии значимым является и июль (рис. 6). Это подтверждает тот факт, что засухи летних месяцев более негативно сказываются на городской хронологии, чем фоновой (рис. 5).

Еще одно отличие городской ДКХ от фоновой – наличие значимой отрицательной связи радиального прироста с осадками августа текущего года. Аналогичную зависимость периодически выявляют как для сосны [20], так и для

других древесных пород [21]. Поскольку в Беларуси в августе может формироваться до 10–20% радиального прироста [22], то, вероятнее всего, отрицательное влияние осадков может быть связано с тем, что при их большом количестве наблюдается продолжительная облачность. Она затрудняет приток прямой солнечной радиации и ограничивает рост деревьев, что особенно сильно проявляется в городской среде в конце вегетационного сезона при сокращении светового дня. Однако этот вопрос требует отдельных исследований.

Заключение. Урбанизация является одним из ведущих факторов, влияющих на региональный климат. Формирование «городского острова тепла», с одной стороны, стимулирует рост деревьев за счет расширения вегетационного сезона и более теплого зимнего периода. С другой – делает деревья более чувствительными к гидро-термическому режиму летних месяцев. Наши исследования показали, что изменение температур воздуха в городской среде на 0,2°C привело к повышению радиального прироста деревьев сосны на 9–16%, увеличению амплитуды его колебаний в засушливые годы и чувствительности древесно-кольцевых хронологий. Влияние летних осадков на изменчивость радиального прироста сосны становится таким же, как в насаждениях, расположенных на 100–200 км южнее, но за пределами города. Соответственно и негативное влияние потепления (в первую очередь летних засух) на бореальные породы деревьев будет проявляться в первую очередь в городских насаждениях. Это позволяет использовать деревья, растущие в городских насаждениях, для прогноза изменения продуктивности и устойчивости насаждений при дальнейшем изменении климата за пределами города в том же регионе.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.06/3 «Реконструкция и прогноз региональных изменений в приросте и составе лесов под влиянием урбанизации и мелиорации» ГПНИ «Природопользование и экология».

Список литературы

1. Oke T. The energetic basis of urban heat island // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1982. Vol. 108. P. 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502.
2. Arnfield A. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island // International Journal of Climatology. 2003. Vol. 23. P. 1–26. DOI: 10.1002/joc.859.
3. Логинов В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2008. 496 с.
4. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities / J. Schwaab [et al.] // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. No. 1. DOI: 10.1038/s41467-021-26768-w.
5. Gillner S., Vogt J., Roloff A. Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites // Urban Forestry & Urban Greening. 2013. Vol. 12. P. 597–605. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.05.003.
6. Gillner S., Bräuning A., Roloff A. Dendrochronological analysis of urban trees: Climatic response and impact of drought on frequently used tree species // Trees. 2014. Vol. 28. No. 4. P. 1079–1093. DOI: 10.1007/s00468-014-1019-9.

7. Wilde E. M., Maxwell J. T. Comparing climate-growth responses of urban and non-urban forests using *L. tulipifera* tree-rings in southern Indiana, USA // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2018. Vol. 31. P. 103–108. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.01.003.
8. Using the dendro-climatological signal of urban trees as a measure of urbanization and urban heat island / C. Schneider [et al.] // *Urban Ecosystems*. 2022. Vol. 25. DOI: 10.1007/s11252-021-01196-2.
9. Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной? / В. В. Кукарских [и др.] // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология*. 2022. № 15 (2). С. 264–278. DOI: 10.17516/1997-1389-0386.
10. Кладько Ю. В., Бенькова В. Е. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки г. Красноярска // *Сиб. лесной журн*. 2018. № 4. P. 49–57.
11. Юркевич И. Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах. Минск: Наука и техника, 1980. 120 с.
12. Гельтман В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1982. 326 с.
13. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bull.* 1983. No. 44. P. 69–75.
14. Huber B. Über die Sicherheit jahrringchronologischer Datierung // *Holz als Roh und Werkstoff*. 1943. P. 263–268.
15. A 7,272-year tree-ring chronology for western Europe / J. R. Pilcher [et al.] // *Nature*. 1984. No. 312. P. 150–152.
16. Fritts H. C. Tree-ring analysis: tool for water resource // *Transactions American Geophysical Union*. 1969. Vol. 50. P. 22–29. DOI: 10.1029/eo050i001p00022.
17. Fritts H. C. *Tree-rings and climate*. London; N. Y.; San Francisco: Acad. Press, 1976. 576 p.
18. Cook E. R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. Ph. D. Thesis, The University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1985. 183 p.
19. Holmes R. L. *Dendrochronology program library. Users manual*. Tucson, Arizona, 1984. 51 p.
20. Ермохин М. В. Дендрохронологическое районирование сосны обыкновенной в Беларуси // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биял. наук*. 2020. Т. 65. № 4. С. 441–453. DOI: 10.29235/1029-8940-2020-65-4-441-453.
21. The Climatic Response of Tree Ring Width Components of Ash (*Fraxinus excelsior* L.) and Common Oak (*Quercus robur* L.) from Eastern Europe / C.-C. Roibu [et al.] // *Forests*. 2020. Vol. 11 (5). DOI: 10.3390/f11050600.
22. Болботунов А. А., Лесковец С. В., Болботунов К. А. Мониторинг сезонной динамики радиального прироста хвойных пород // *Наука о лесе XXI века: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Ин-та леса НАН Беларуси, Гомель 17–19 нояб. 2010 г. Гомель, 2010. С. 397–400.*

References

1. Oke T. The energetic basis of urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, pp. 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502.
2. Arnfield A. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 2003, vol. 23, pp. 1–26. DOI: 10.1002/joc.859.
3. Loginov V. F. *Global'nyye i regional'nyye izmeneniya klimata: prichiny i sledstviya* [Global and regional climate changes: causes and consequences]. Minsk, TetraSistems Publ., 2008. 496 p. (In Russian).
4. Schwaab J., Meier R., Mussetti G., Seneviratne S., Bürgi C., Davin E. L. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nat. Commun.*, 2021, vol. 12, no. 1. DOI: 10.1038/s41467-021-26768-w.
5. Gillner S., Vogt J., Roloff A. Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, vol. 12, pp. 597–605. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.05.003.
6. Gillner S., Bräuning A., Roloff A. Dendrochronological analysis of urban trees: Climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees*, 2014, vol. 28, no. 4, pp. 1079–1093. DOI: 10.1007/s00468-014-1019-9.
7. Wilde E. M., Maxwell J. T. Comparing climate-growth responses of urban and non-urban forests using *L. tulipifera* tree-rings in southern Indiana, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, vol. 31, pp. 103–108. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.01.003.
8. Schneider C., Neuwirth B., Schneider S., Balanzategui D., Elsholz S., Fenner D., Meier F., Heinrich I. Using the dendro-climatological signal of urban trees as a measure of urbanization and urban heat island. *Urban Ecosystems*, 2022, vol. 25. DOI: 10.1007/s11252-021-01196-2.
9. Kukarskih V. V., Devi N. M., Bubnov M. O., Komarova A. V., Agafonov L. I. Urban Heat Island of Ekaterinburg: Does It Affect Radial Growth of the Scots Pine? *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* [Journal of Siberian Federal University. Biology], 2022, no. 15 (2), pp. 264–278. DOI: 10.17516/1997-1389-0386 (In Russian).
10. Klad'ko Yu. V., Benkova V. E. Radial growth of woody species in the conditions of high anthropogenic load in the city of Krasnoyarsk. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2018, no. 4, pp. 49–57. DOI: 10.15372/SJFS20180406 (In Russian).

11. Yurkevich I. D. *Vydeleniye tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types during forest inventory works]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 120 p. (In Russian).
12. Geltman V. S. *Geograficheskiy i tipologicheskiy analiz lesnoy rastitel'nosti Belorussii* [Geographical and typological analysis of forest vegetation in Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 326 p. (In Russian).
13. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, no. 44, pp. 69–75.
14. Huber B. Über die Sicherheit jahrringchronologischer Datierung. *Holz als Roh und Werkstoff*, 1943, pp. 263–268 (In German).
15. Pilcher J., Baillie M., Schmidt B., Becker B. A 7,272-year tree-ring chronology for western Europe. *Nature*, 1984, no. 312, pp. 150–152.
16. Fritts H. C. Tree-ring analysis: tool for water resource. *Transactions American Geophysical Union*, 1969, vol. 50, pp. 22–29. DOI: 10.1029/eo050i001p00022.
17. Fritts H. C. *Tree-rings and climate*. London; N. Y.; San Francisco, Acad. Press, 1976. 576 p.
18. Cook E. R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. Ph. D. Thesis, The University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1985. 183 p.
19. Holmes R. L. *Dendrochronology program library. Users manual*. Tucson, Arizona, 1984. 51 p.
20. Yermokhin M. V. Dendrochronological zoning of Scots pine in Belarus. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus], Biological series, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 441–453. DOI: 10.29235/1029-8940-2020-65-4-441-453 (In Russian).
21. Roibu C.-C., Sfecla V., Mursa A., Ionita M., Viorica N., Chiriloaei F., Lesan I., Ionel P. The Climatic Response of Tree Ring Width Components of Ash (*Fraxinus excelsior* L.) and Common Oak (*Quercus robur* L.) from Eastern Europe. *Forests*, 2020, vol. 11 (5). DOI: 10.3390/f11050600.
22. Bolbotunov A. A., Leskovets S. V., Bolbotunov K. A. Monitoring the seasonal dynamics of radial growth of coniferous species. *Nauka o lese XXI veka: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu Instituta lesa NAN Belarusi* [Forest Science of the 21st Century: materials from the International Research and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. Gomel, 2010, pp. 397–400 (In Russian).

Информация об авторах

Лукин Виталий Васильевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: lukin.vitali04@gmail.com

Кныш Наталья Валерьевна – научный сотрудник. ОО «Ботаническое общество» (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: knyshnv@gmail.com

Ермохин Максим Валерьевич – кандидат биологических наук, ОО «Ботаническое общество» (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: maxim.yermokhin@gmail.com

Барсукова Татьяна Леонидовна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь). E-mail: barsukovatl@yandex.ru

Савельев Василий Васильевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем экологии леса и дендрохронологии. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 27, Республика Беларусь).

Information about the authors

Lukin Vitaliy Vasil'evich – PhD (Biology), Leading Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lukin.vitali04@gmail.com

Knysh Natalia Valer'evna – Researcher. PA “Botanical Society” (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: knyshnv@gmail.com

Yermokhin Maxim Valer'evich – PhD (Biology). PA “Botanical Society” (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: maxim.yermokhin@gmail.com

Barsukova Tatiana Leonidovna – PhD (Agriculture), Leading Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: barsukovatl@yandex.ru

Saveliev Vasilii Vasil'evich – PhD (Biology), Senior Researcher, the Laboratory of Forest Ecology and Dendrochronology. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Поступила 12.03.2024