Journal of Siberian Federal University. Biology 2022 15(2): 264–278
~ ~ ~

DOI 10.17516/1997-1389-0386

УДК 630*561.24:551.588.7(470.54–25)

Urban Heat Island of Ekaterinburg: Does It Affect Radial Growth of the Scots Pine?

Vladimir V. Kukarskih[a, b], Nadezhda M. Devi*[a], Maksim O. Bubnov[a], Anna V. Komarova[a, c] and Leonid I. Agafonov[a]

[a]*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the RAS Ekaterinburg, Russian Federation*

[b]*Siberian Federal University Krasnoyarsk, Russian Federation*

[c]*Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin Ekaterinburg, Russian Federation*

Received 04.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 22.06.2022

Abstract. In recent decades, there has been broad worldwide discussion on the impact of climate change and anthropogenic and biogenic factors on tree growth. Most studies have focused on annual growth in natural stands, while little attention has been paid to urban forests and the findings are highly controversial. Urban vegetation worldwide is influenced by the "urban heat island" effect, i.e. air temperature differences between city centers and neighborhoods. The paper presents the results of a comparative assessment of growth dynamics of four urban forest stands and four rural forest stands (outside the agglomeration of Ekaterinburg) under changing climate conditions. Over the last fifty years, a continuous trend for air temperature increase has been observed in both urban and rural areas. Nevertheless, a higher average annual temperature (by 0.9 °C) and the temperature of the growing season (by 0.9 °C) are characteristic of the climate of the city. Moisture regimen in the compared territories do not differ and no apparent trend has been observed. It was shown that the long-term dynamics of radial growth of pine trees in urban forest parks and natural landscapes was synchronous. Only 11 years out of 50 were found to yield statistically different growth values in urban and natural habitats. However, a more prominent response of radial tree growth to climatic variables was observed in urban areas. Thus, despite the warmer conditions in the metropolis, no differences in the dynamics of radial growth between urban and rural populations of the Scots pine were found, except for individual years with extreme climatic events.

© Siberian Federal University. All rights reserved
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: nadya@ipae.uran.ru
ORCID: 0000-0002-6552-1726 (Kukarskih V.); 0000-0002-3756-4761 (Devi N.); 0000-0001-7990-1212 (Bubnov M.); 0000-0003-4595-4978 (Agafonov L.)

Keywords: *Pinus sylvestris*, radial growth, heat island, megalopolis of Ekaterinburg.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 20–44–660020). The authors are grateful to D. V. Solodyankin and R. R. Mustafin for their help in collecting field material.

Citation: 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? J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 264–278. DOI: 10.17516/1997-1389-0386

Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной?

В. В. Кукарских[а, б], Н. М. Дэви[а], М. О. Бубнов[а], А. В. Комарова[а, в], Л. И. Агафонов[а]

[а]Институт экологии растений и животных УрО РАН
Российская Федерация, Екатеринбург
[б]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск
[в]Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
Российская Федерация, Екатеринбург

Аннотация. Влияние изменения климата, антропогенных и биогенных воздействий на рост деревьев активно обсуждается в последние десятилетия по всему миру. Большинство исследований посвящено изучению годичного прироста в естественных древостоях, в то время как исследования городских лесов не столь многочисленны и весьма неоднозначны. Городская растительность во всем мире подвержена влиянию эффекта «городского острова тепла», вызывающего разницу температур воздуха между центрами городов и окрестностями. Целью представленной работы являлась сравнительная оценка динамики прироста четырех городских древостоев и четырех древостоев за пределами агломерации города Екатеринбурга в условиях изменения климата. При синхронном повышении температуры воздуха в течение последних пятидесяти лет климат города отличается более высокой среднегодовой температурой (на 0,9 °C), а также температурой вегетационного периода (на 0,9 °C). Режим увлажнения на сравниваемых территориях не различается и не имеет выраженного тренда. Показано, что многолетняя динамика радиального прироста деревьев сосны в городских лесопарках и в естественных ландшафтах синхронна. Выявлено всего 11 лет, в которые величина прироста в городе и за городом статистически различалась. В то же время для городских участков характерен более выраженный отклик радиального прироста деревьев на климатические переменные. Таким образом, несмотря на более теплые условия в мегаполисе, не обнаружено различий в динамике радиального прироста между городской и загородными

популяциями сосны обыкновенной, кроме отдельных лет с экстремальными климатическими событиями.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, радиальный прирост, остров тепла, мегаполис Екатеринбург.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ проекта 20–44–660020). Авторы благодарны Д. В. Солодянкину и Р. Р. Мустафину за помощь в сборе полевого материала.

Цитирование: Кукарских, В. В. Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной? / В. В. Кукарских, Н. М. Дэви, М. О. Бубнов, А. В. Комарова, Л. И. Агафонов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 264–278. DOI: 10.17516/1997-1389-0386

Введение

Глобальной тенденцией современного развития является концентрация населения в городах, где в условиях преобразованных природных ландшафтов создается новая искусственная среда – экосистема урбанизированных территорий (Pickett et al., 2001; Alberti, 2005; Grimm et al., 2008). Города заметно меняют местный климат, формируя специфические условия, называемые «городским островом тепла» (Oke, 1982). Эффект городского острова тепла (ГОТ) проявляется в изменении температурного, ветрового, радиационного режимов и количества атмосферных осадков (Oke et al., 2017). Условия над территорией городов обычно отличаются от окружающих ландшафтов более высокими значениями режимных факторов (Voogt, Oke, 2003), также существуют сезонные различия (Chrysanthou et al., 2014). Вклад урбанизации в повышение температуры ГОТ может достигать 50 % в центре мегаполиса (Chao et al., 2020) и зависит от размеров, архитектурных особенностей городской агломерации, орографических и ландшафтных эффектов, микроклимата (Kuznetsova et al., 2017; Демин и др., 2019; Bechtel et al., 2019). Особенности городского микроклимата проявляются в основном в верхних слоях почвы и в приземном слое воздуха до высоты в несколько десятков метров. В непосредственной близости от строений температура поверхности почвы и воздуха, как правило, выше, чем на открытой местности, благодаря теплу, отдаваемому зданиями (Bechtel et al., 2019). Также в городе уменьшается скорость ветра, что снижает интенсивность конвективного охлаждения.

Большая часть ГОТ представляет собой плато с максимальными значениями температуры воздуха в центре мегаполиса и в областях генерации тепла – зонах промышленных предприятий, объектов энергетики, крупных транспортных артерий, районах плотной жилой застройки, и разрывами в областях холода – зонами над парками и водоемами (Алексашина, Ле, 2018; Helletsgruber et al., 2020; Blachowski, Hajnrych, 2021).

Промышленные предприятия и автомобили в черте города, помимо прямого выделения тепла при технологических процессах и сгорании топлива, загрязняют воздух продуктами горения и образующимися газообразными соединениями переработки материалов, концентрации которых изменяют радиационные свойства атмосферы над городом (Хромов, Петросянц, 2006; Locosselli et al., 2018).

Среднегодовая температура воздуха крупных городов может превышать темпе-

ратуру окрестностей на 1–3 ºC (Kondrat'ev, Matveev, 1999; Oke et al., 2017). Контрасты температуры между городом и окрестностями наиболее выражены в спокойную антициклональную погоду и сглаживаются при сильном ветре или облачности. Влияние городского острова тепла распространяется на 30–50 км с подветренной стороны мегаполиса. В некоторых исследованиях отмечается, что загрязнение атмосферы ведет к увеличению атмосферных осадков и снижению естественной освещенности над городом (Кормилицын и др., 1997).

Эффект ГОТ может оказывать влияние на растительность, в частности на радиальный прирост деревьев (Parker, 2010; Varquez, Kanda, 2018). Оценить влияние экзогенных факторов на радиальный прирост деревьев можно с помощью древесно-кольцевого анализа (Fritts, 1976). Чаще всего проводят анализ влияния климатических факторов на рост деревьев в естественных условиях произрастания и гораздо в меньшей степени в городской среде (Hunt, Watkiss, 2011; Bartens et al., 2012; Gillner et al., 2014). В литературе приводятся данные как о негативном влиянии городской среды на радиальный рост деревьев (de Bauer, Krupa, 1990; Penninckx et al., 1999; Guardans, 2002; Dittmar et al., 2003; Juknys et al., 2003; Scharnweber et al., 2011; Kint et al., 2012; Chappelka, Grulke, 2016), так и о положительном влиянии климата и некоторых видов загрязнения окружающей среды на рост деревьев в городских лесах (Spiecker et al., 1996; Bytnerowicz et al., 2007; Fang et al., 2014; Pretzsch et al., 2014). Так, в обзорной работе Претцша с соавторами (Pretzsch et al., 2017) показано увеличение темпов роста городских деревьев в 1300 городах, расположенных в различных климатических зонах Земли, начиная с 1960-х годов. Этот эффект был наиболее выражен в бореальной климатической зоне, что подтверждается также рядом других исследований, рассматриваемых в обзоре Бутнеровича с соавторами (Bytnerowicz et al., 2007).

Для крупных городских агломераций Российской Федерации, в том числе для Екатеринбурга, проведены оценки выраженности ГОТ (Танский, Мазуров, 2010; Kuznetsova et al., 2017; Shumilov et al., 2017), при этом отсутствуют данные по оценке степени влияния ГОТ на прирост древесных растений.

В работе представлено исследование изменений зонального климата и ГОТ г. Екатеринбурга за последние 50 лет и их влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной в черте города и за его пределами.

Материалы и методы

Район исследования

Город Екатеринбург (56°47'N, 60°37'E, 237 м над у.м.) расположен в центральной части Евразийского материка, на границе Европы и Азии, в срединной части Уральского хребта. Является административным центром Уральского федерального округа и Свердловской области. В Екатеринбурге проживает 1,5 миллиона человек и отмечается высокая концентрация промышленных предприятий машиностроения, энергетики, металлургии, химии, строительства, легкой и пищевой промышленности (Вершинин, 2014).

Климат района исследования

Климат Среднего Урала влажный континентальный с холодной зимой, отсутствием сухого сезона, теплым летом и выраженной сезонностью (Алисов, Полтараус, 1962). Среднегодовая температура воздуха 1,9 °C. Среднегодовое количество осадков 471 мм. Продолжительность вегетационного периода 160–170 дней, безморозного периода 90–100 дней. Погодно-климатические условия в ГОТ

исследовали по данным метеостанции Екатеринбург, для загородных территорий использовали данные метеостанций Ревда (40 км к западу от Екатеринбурга) и Верхнее Дуброво (29 км к востоку от Екатеринбурга) на общем интервале 1970–2020 гг. Во все сезоны, в том числе и в годовом разрезе, преобладают ветра западного, северо-западного и юго-западного направлений.

Отбор кернов,
обработка и анализ данных

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – основная лесообразующая порода района исследования. Работа выполнена в четырех лесопарках г. Екатеринбурга и четырех естественных древостоях за чертой города на расстоянии 18–45 км от центра города с учетом направления господствующих ветров, чтобы исключить влияние переноса тепла от ГОТ к естественным ландшафтам (рис. 1). Участки с естественным ландшафтом 1, 2, 3 и 4 выбирали в сходных лесорастительных условиях – сосняк ягодниковый (Колесников и др., 1973). Керны древесины на всех участках брали с 15–21 доминантных деревьев на высоте 1,3 м. В анализе использовали 145 кернов, по одному с дерева. Керны обработаны по стандартной дендрохронологической методике (Ваганов и др., 1996; Stokes, Smiley,

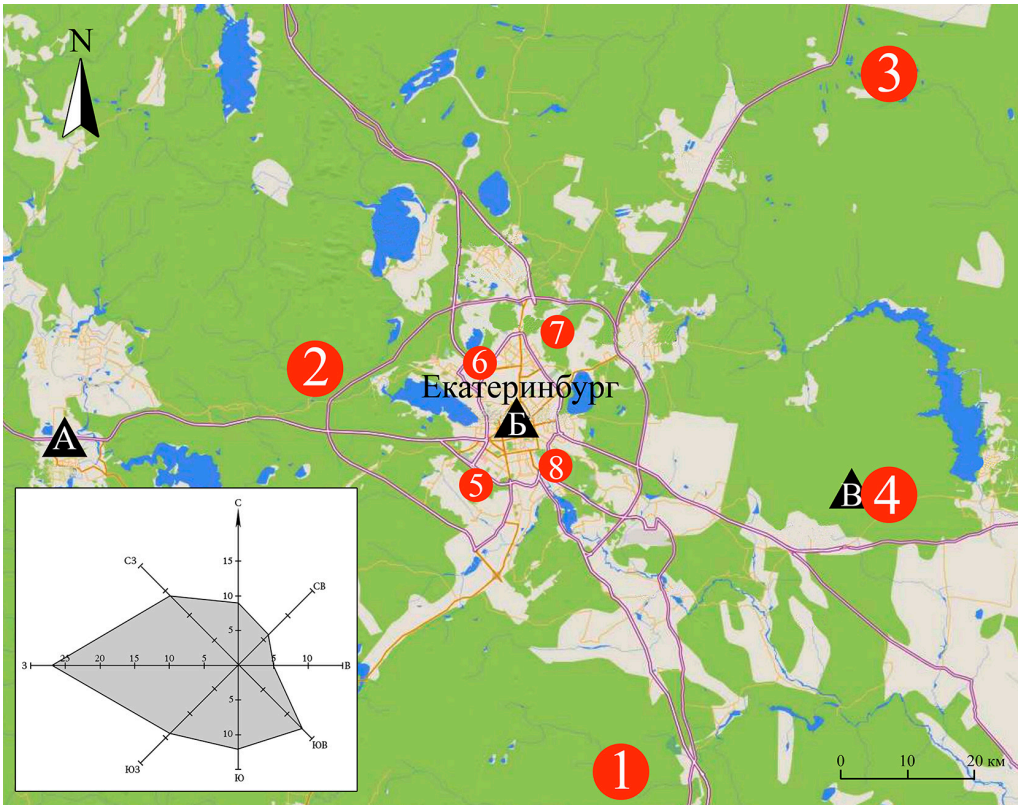

Рис. 1. Карта района исследования. Участки 1–4 располагаются в древостоях вне города, участки 5–8 расположены в черте города. Треугольниками обозначены метеостанции: *А* – Ревда, *Б* – Екатеринбург, *В* – Верхнее Дуброво. На врезке представлено среднегодовое распределение повторяемости ветров, в %

Fig. 1. Map of the study area: 1–4 – rural forest stands, 5–8 – urban forest stands. Triangles indicate weather stations: A – Revda, B – Ekaterinburg, C – Verkhneye Dubrovo. The inset shows the average annual distribution of wind frequency in %

1996). Ширина годичных колец (ШГК) измерена на комплексе LINTAB в программном пакете TSAP (Rinn, 1996). Все образцы были перекрестно сдатированы, качество датировки проверялось в программе COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Характеристика участков и древесно-кольцевых хронологий представлена в табл. 1.

Влияние возраста деревьев и случайных факторов неклиматического характера на величину радиального прироста устраняли стандартизацией индивидуальных хронологий методом кубического сплайна с отсечением 67 % длительности хронологии (Cook, Peters, 1981) в пакете dplR в статистической среде R (Bunn, 2008; R Core Team, 2019). В этом же программном пакете были получены обобщенные индексированные хронологии для каждого участка. Корреляционные функции связи обобщенных хронологий индексов прироста с климатическими факторами (температура воздуха, атмосферные осадки) рассчитывали в программе DENDROCLIM2002 (Biondi, Waikul, 2004). Сравнение средних значений метеоданных проведено с помощью критерия Краскела-Уоллиса, индексированных значений прироста – критерия Манна-Уитни.

Анализ динамики радиального прироста деревьев проведен за период с 1970 по 2020 год. Данный период выбран в связи с тем, что в предшествующий период (1930–1960-е годы) растительность в городе подвергалась сильному антропогенному и биотическому стрессу (Kukarskih et al., 2022). Следовательно, выбранные временные рамки установлены, чтобы иметь возможность сравнивать климатогенную динамику радиального прироста городских и естественных древостоев.

Таблица 1. Характеристики участков исследования

Table 1. Sampling sites characteristics

№	Код хронологии	Ближайший населенный пункт	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Высота, м н.у.м.	Количество деревьев, шт.	Длина хронологии, годы/лет	Средняя ширина годичного прироста, мм	Коэффициент чувствительности
1	VSS	Верхняя Сысерть	56.43	60.79	270	18	1880–2018 139	1,57	0,25
2	SEV	Северка	56.84	60.31	310	18	1790–2020 231	1,2	0,20
3	LOS	Лосиный	57.11	61.17	250	18	1770–2020 251	1,35	0,20
4	VDU	Верхнее Дуброво	56.76	61.13	260	21	1850–2018 169	1,51	0,26
5	UZP	Юго-Западный лесопарк	56.79	60.55	280	17	1790–2020 231	1,39	0,27
6	PLP	Парк Победы	56.89	60.57	315	17	1860–2020 161	1,41	0,24
7	KLP	Калиновский лесопарк	56.9	60.66	285	21	1880–2020 139	1,3	0,29
8	PLR	Парк лесоводов России	56.8	60.65	265	15	1790–2020 231	1,1	0,26

Результаты и обсуждение

Динамика климатических параметров

В Екатеринбурге (ГОТ) и за чертой города в каждое десятилетние с 1970 по 2020 год средняя годовая температура повышалась (рис. 2*А*), при этом в пределах ГОТ она была выше, чем на обеих загородных метеостанциях. Различия варьировали от 0,6 до 1,0 °С ($p<0,05$, $n=10$). В целом, на 50-летнем интервале различие между средней годовой температурой ГОТ и загородными метеостанциями составляет 0,9 ± 0,1 °С ($p<0,05$, $n=49$).

Средние температуры мая-августа по десятилетиям различаются незначимо (рис. 2*Б*), однако за весь 50-летний период температура воздуха этих месяцев в городе выше на 0,9 ± 0,1 °С. Рост средних температур за прошедшие 50 лет в ГОТ и вне города происходил синхронно.

Для суммы осадков как годовых (рис. 2*В*), так и в период активного роста деревьев (май-август) (рис. 2*Г*) не выявлено значимых различий между территорией ГОТ и загородными территориями. Годовое количество осадков и количество осадков за май-август по десятилетиям возрастало до 2000 года и затем начало снижаться.

Динамика радиального прироста и отклик на климат

В последние 50 лет многолетняя динамика радиального прироста генерализованных хронологий сосны в городских лесопарках и в естественных ландшафтах была синхронна. Выявлено всего 11 лет, в которые величина прироста в городе и за городом статистически различалась. Так, в 1971–1977 годах (за исключением 1975 года), прирост за городом был выше, а в 1981, 1986, 1990, 1999, 2003 ниже по сравнению с приростом в городе (табл. 2). Такая синхронизация роста предполагает наличие единого комплекса климатических факторов, определяющих динамику радиального прироста. Прирост сосны обыкновенной, произрастающей на территории города, главным образом отрицательно коррелирует с температурами мая и июня. Также отмечается положительная связь с осадками мая и июля. Для загородных участков отклик на климат более слабый и менее стабильный. Установлена положительная связь с осадками июня и отрицательная с температурами воздуха того же месяца. Для обеих сравниваемых хронологий также выявлена отрицательная связь с осадками ноября (рис. 3).

В целом, для городских участков характерен более выраженный отклик на климатические переменные, что может быть связано с менее благоприятными для роста деревьев условиями в зоне ГОТ за счет повышенных температур и дефицита влажности. Относительно невысокие коэффициенты корреляции прироста с климатом как в городе, так и за городом объясняются тем, что климатические условия Среднего Урала являются субоптимальными для роста сосны обыкновенной (Рысин, Савельева, 2008).

Различия в радиальном приросте городских и загородных древостоев

Рассматривая возможные причины различий в приросте загородных и городских популяций сосны, необходимо учитывать историю исследуемых древостоев. До начала разрастания городской агломерации исследованные лесопарки являлись едиными массивами с естественными древостоями. Увеличение производственных мощностей заводов и фабрик в 1942–1951 годах (Васильев, 1982; Антуфьев, 1992) привело к многократному увеличению выбросов загрязняющих веществ атмосферу, что отрицательно сказалось на темпах роста деревьев. На фоне череды лет с недостаточным увлажнением и засухой

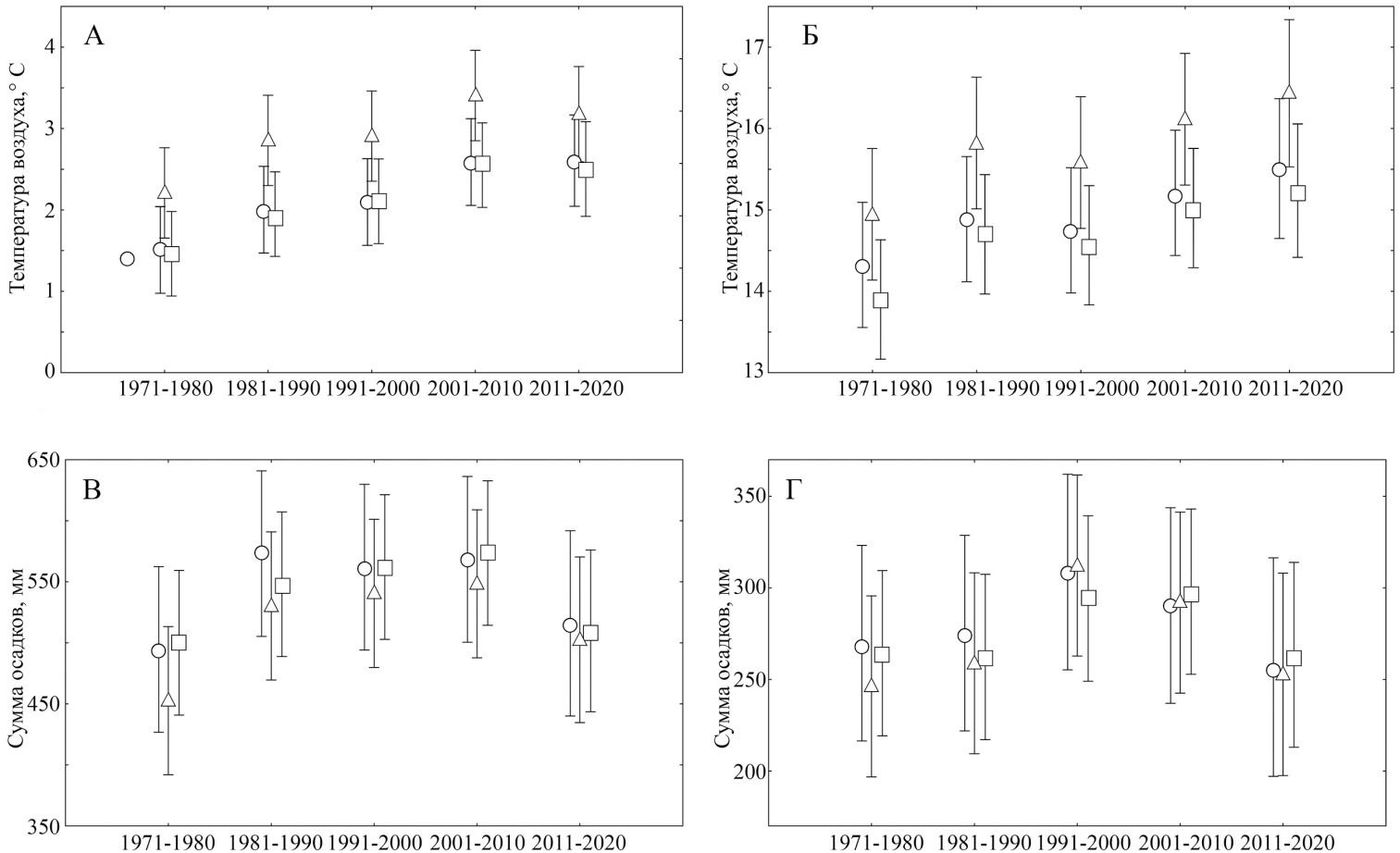

Рис. 2. Динамика средней температуры воздуха за год (А) и средней температуры мая-августа (Б), а также сумма осадков за год (В) и сумма осадков мая-августа (Г). Метеостанции: треугольники – Екатеринбург, круги – Ревда, квадраты – Верхнее Дуброво. Вертикальными линиями приведены значения 95 % доверительных интервалов

Fig. 2. Dynamics of average annual (A) and average May-August temperatures (B); total annual precipitation (C) and total May-August precipitation (D). All data supplied by the weather stations in the study area: triangular markers – Ekaterinburg, circles – Revda, squares – Verneye Dubrovo. Vertical lines indicate 95 % confidence intervals

Таблица 2. Статистически отличающийся радиальный прирост деревьев сосны обыкновенной в городских и загородных популяциях: статистические параметры для соответствующих лет

Table 2. Significantly different radial growth of Scots pine trees in urban and rural populations: statistical parameters for relevant years

Год	Сумма рангов "Вне города"	Сумма рангов "Город"	Значение критерия Манна-Уитни (U)	Уровень значимости (p)	Количество моделей "Вне города"	Количество моделей "Город"	Разница в приросте "Вне города" – "Город", %
1971	4127	2428	1153	0,011	85	60	21
1972	4029	2526	1251	0,047	85	60	17
1973	4423	2132	857	0,000	85	50	33
1974	4234	2322	1047	0,002	85	60	25
1976	4335	2220	945	0,000	85	60	31
1977	4428	2127	852	0,000	85	60	34
1981	3101	3454	1021	0,001	85	60	-36
1986	3205	3350	1125	0,007	85	60	-31
1990	2827	3729	747	0,000	85	60	-41
1999	3194	3361	1114	0,006	85	60	-17
2003	3273	3282	1193	0,020	85	60	-14

в 1950-е годы на территории города произошла массовая вспышка численности шелкопряда монашенки (*Lymantria monacha* L.) (Kukarskih et al., 2022). Дефолиация привела к резкому сокращению ширины древесных колец, а в некоторых случаях к их полному выпадению. После окончания вспышки ассимиляционный аппарат хвойных растений восстанавливался в течение нескольких лет, поэтому восстановление прироста в городских хронологиях произошло только к 1970-м годам (рис. 4). В период с 1970 по 1977 год прирост деревьев за чертой ГОТ был на 17–34 % выше, чем в городе, за исключением 1975 года, когда аномальная летняя засуха привела к синхронизации приростов во всех насаждениях.

Начиная с 1980 года средние значения прироста в городе никогда не были меньше, чем на загородных участках, а в отдельные годы были значительно выше.

Так, в 1981 и 1986 годах ширина годичных колец деревьев в городе была значимо больше по сравнению с загородными – на 36 и 31 % соответственно. Столь большая разница объясняется термическими условиями мая, а точнее резким понижением температуры, особенно заморозками в 1–2-й декадах (рис. 5). Согласно работе Танского и Мазурова (2010), наибольшие различия термического режима между крупными городами и пригородами наблюдаются для минимальной температуры воздуха. Для Екатеринбурга разница в весенние месяцы может составлять до 9 градусов. В частности, в 1981 и 1986 годах заморозки за городом продолжались на 2 дня дольше и были на 0,2–0,7 градуса суровее, чем в городе, что привело к снижению радиального прироста деревьев.

Остается не до конца понятным значительно более высокий прирост в городских лесопарках в 1990 году. Условия вегетационного сезона в этом году не отличались экстремальными значениями температуры. Единственным объяснением может быть значительно большее количество осадков вегетационного

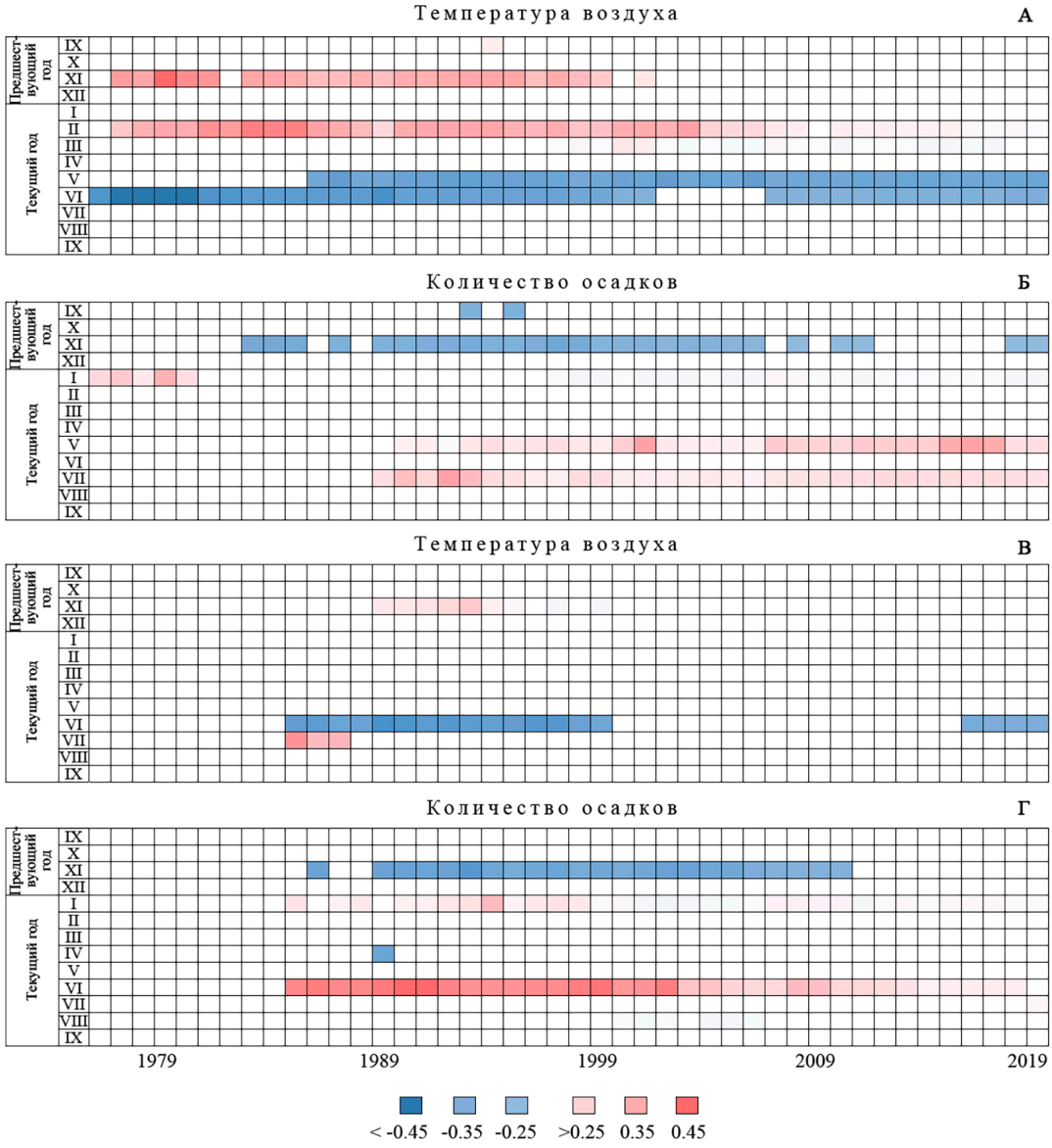

Рис. 3. Динамика отклика радиального прироста на температуру воздуха и количество осадков для городских (А, Б) и загородных (В, Г) участков. Заливкой обозначены частные коэффициенты корреляции, достоверно отличающиеся от 0 при N=26, p<0,05

Fig. 3. Dynamics of radial growth response to air temperature and precipitation for urban (A, B) and rural (C, D) sites. Colour intensities indicate individual correlation coefficients significantly different from 0 at N=26, p<0.05

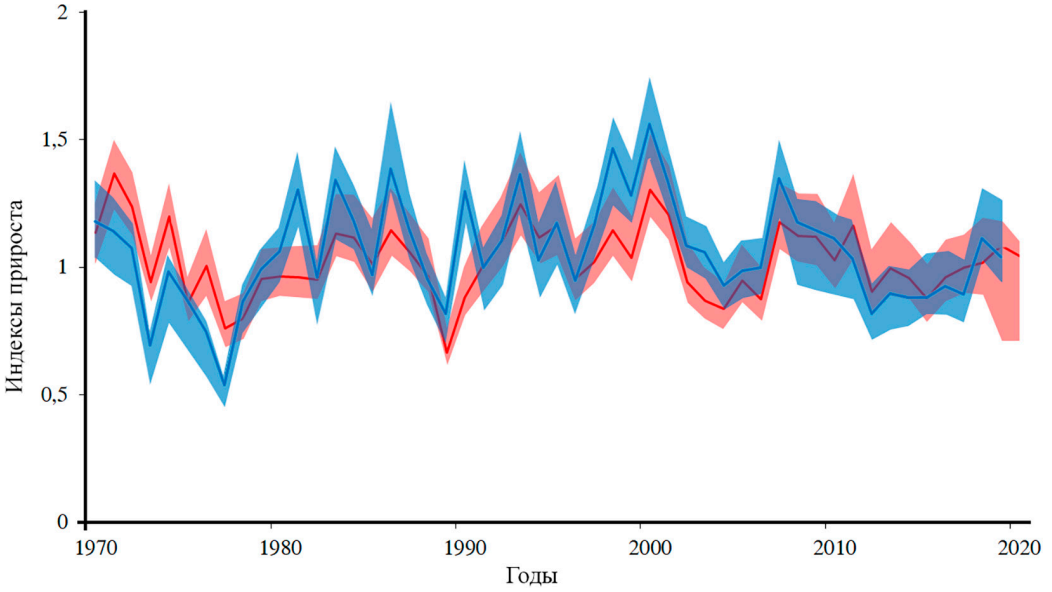

Рис. 4. Динамика радиального прироста генерализованных древесно-кольцевых хронологий из городских лесопарков (синяя линия) и естественных загородных ландшафтов (красная линия). Заливкой отмечены 95 % доверительные интервалы

Fig. 4. Generalized tree-ring chronologies for urban (blue line) and rural (red line) sites. Shaded areas indicate 95 % confidence intervals

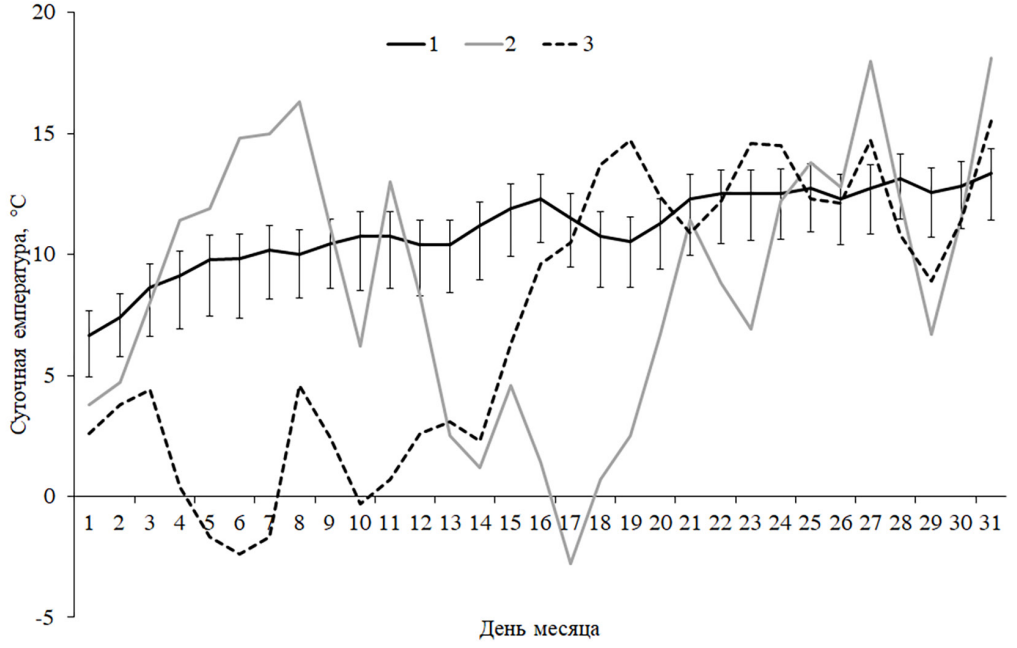

Рис. 5. Динамика средней суточной температуры мая. 1 – за период 1961–1990 гг. (вертикальными линиями приведены значения 95 % доверительных интервалов); 2 – в 1981 году; 3 – в 1986 году

Fig. 5. Dynamics of average daily temperature in May: 1 – over the period of 1961–1990 (vertical lines indicate 95 % confidence intervals); 2 – in 1981; 3 – in 1986

периода (на 50 % больше многолетней нормы) и один из самых высоких значений индекса сухости Палмера (PDSI) – 2,9 при среднем многолетнем значении 0,4.

Заключение

Мегаполис Екатеринбург формирует своеобразный микроклимат в пределах городской агломерации. Главным образом, это проявляется в более высоких значениях температуры воздуха. В среднем в городе теплее на 0,9 °C по сравнению с прилегающими территориями, при этом осадков выпадает столько же.

Остров тепла, формируемый городом, не оказывает значительного влияния на прирост сосны обыкновенной. Основным эффектом городского микроклимата является сглаживание влияния температурных экстремумов на радиальный прирост – в годы с поздними майскими заморозками деревья в городе формируют более широкие кольца.

На рост городских деревьев наиболее часто влияют дефицит увлажненности, повышенные температуры воздуха, уплотненная почва, а также техногенное загрязнение воздуха и почвы. Несмотря на эти препятствующие росту условия, наше исследование показало, что городские деревья растут не хуже, чем деревья в естественных древостоях. Возможно, отсутствие четко выраженного сигнала на потепление в пределах ГОТ связано с выбором сосны обыкновенной в качестве объекта исследования. В пределах Среднего Урала рост сосны определяется температурой воздуха лишь частично и разница в 1 °C не находит своего отражения в увеличении радиального прироста.

Список литературы / References

Алексашина В. В., Ле М. Т. (2018) Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса. *Проблемы региональной экологии*, 5: 36–40 [Aleksashina V. V., Le M. T. (2018) Influence of the urban heat island effects on the ecology of the megacity. *Regional Environmental Issues* [Problemy regional'noj ekologii], 5: 36–40 (in Russian)]

Алисов Б. П., Полтараус Б. В. (1962) *Климатология*. М., Издательство Московского университета, 226 с. [Alisov B. P., Poltaraus B. V. (1962) *Climatology*. Moscow, Moscow State University Press, 226 p. (in Russian)]

Антуфьев А. А. (1992) *Уральская промышленность накануне и в годы Великой Отечественной войны*. Екатеринбург, Институт истории и археологии, 336 с. [Antufiev A. A. (1992) *Ural industry on the eve and during the Great Patriotic War*. Ekaterinburg, Institute of History and Archaeology, 336 p. (in Russian)]

Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. (1996) *Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике*. Новосибирск, Наука, 246 с. [Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. (1996) *Dendroclimatic studies in Subarctic Ural and Siberia*. Novosibirsk, Nauka, 246 p. (in Russian)]

Васильев А. Ф. (1982) *Промышленность Урала в годы Великой Отечественной войны. 1941–1945 гг*. М., Наука, 279 с. [Vasiliev A. F. (1982) *Industry of the Urals during the Great Patriotic War. 1941–1945*. Moscow, Nauka, 279 p. (in Russian)]

Вершинин В. Л. (2014) *Экология города*. Екатеринбург, Урал, 88 с. [Vershinin V. L. (2014) *Urban Ecology*. Ekaterinburg, Ural, 88 p. (in Russian)]

Демин В. И., Козелов Б. В., Горбань Ю. А., Меньшов Ю. В., Собакин А. П. (2019) Влияние микроклимата на оценки интенсивности городского острова тепла. *Фундаментальная и приклад-*

ная климатология, 3: 76–91 [Demin V. I., Kozelov B. V., Gorban Yu.A., Menshov Yu.V., Sobakin A. P. (2019) The influence of microclimate on the assessment of intensity of a heat city island. *Fundamental and Applied Climatology* [Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya], 3: 76–91 (in Russian)]

Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П. (1973) *Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области*: *Практ. руководство.* Свердловск, 176 с. [Kolesnikov B. P., Zubareva R. S., Smolonogov E. P. (1973) *Forest and vegetation conditions and forest types in the Sverdlovsk Region*: *a practical guide*. Sverdlovsk, 176 p. (in Russian)]

Кормилицын В. И., Цицкишвили М. С., Яламов Ю. И. (1997) *Основы экологии*. М., МПУ, 368 с. [Kormilitsyn V. I., Tsitskishvili M. S., Yalamov Y. I. (1997) *Basics of Ecology*. Moscow, Moscow State Pedagogical University, 368 p. (in Russian)]

Рысин Л. П., Савельева Л. И. (2008) *Сосновые леса России.* М., Товарищество научных изданий КМК, 289 с. [Rysin L. P., Savelyeva L. I. (2008) *Pine forests of Russia*. Moscow, KMK Publishing House, 289 p. (in Russian)]

Танский А. О., Мазуров Г. И. (2010) Анализ острова тепла над некоторыми городами Российской Федерации. *Метеорологический вестник*, 3(3): 80–122 [Tanskiy A. O., Mazurov G. I. (2010) An analysis of some urban heat islands in the Russian Federation. *Meteorological Bulletin* [Meteorologicheskij vestnik], 3(3): 80–122 (in Russian)]

Хромов С. П., Петросянц М. А. (2006) *Метеорология и климатология*. М., МГУ, 584 с. [Khromov S. P., Petrosyants M. A. (2006) *Meteorology and climatology*. Moscow, Moscow State University, 584 p. (in Russian)]

Alberti M. (2005) The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 28(2): 168–192

Bartens J., Grissino-Mayer H.D., Day S. D., Wiseman P. E. (2012) Evaluating the potential for dendrochronological analysis of live oak (*Quercus virginiana* Mill.) from the urban and rural environment – an explorative study. *Dendrochronologia*, 30(1): 15–21

Bechtel B., Demuzere M., Mills G., Zhan W., Sismanidis P., Small C., Voogt J. (2019) SUHI analysis using Local Climate Zones – A comparison of 50 cities. *Urban Climate*, 28: 100451

Biondi F., Waikul K. (2004) DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30(3): 303–311

Blachowski J., Hajnrych M. (2021) Assessing the cooling effect of four urban parks of different sizes in a temperate continental climate zone: Wroclaw (Poland). *Forests*, 12(8): 1136

Bunn A. G. (2008) A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2): 115–124

Bytnerowicz A., Omasa K., Paoletti E. (2007) Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environmental Pollution*, 147(3): 438–445

Chappelka A. H., Grulke N. E. (2016) Disruption of the 'disease triangle' by chemical and physical environmental change. *Plant Biology*, 18: 5–12

Chao L., Huang B., Yuanjian Y., Jones P., Cheng J., Yang Y., Li Q. (2020) A new evaluation of the role of urbanization to warming at various spatial scales: Evidence from the Guangdong-Hong Kong-Macau region, China. *Geophysical Research Letters*, 47(20): e2020GL089152

Chrysanthou A., van der Schrier G., van den Besselaar E. J.M., Klein Tank A. M.G., Brandsma T. (2014) The effects of urbanization on the rise of the European temperature since 1960. *Geophysical Research Letters*, 41(21): 7716–7722

Cook E. R., Peters K. (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41: 45–53

de Bauer L. I., Krupa S. V. (1990) The valley of Mexico: Summary of observational studies on its air quality and effects on vegetation. *Environmental Pollution*, 65(2): 109–118

Dittmar C., Zech W., Elling W. (2003) Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173(1–3): 63–78

Fang J., Kato T., Guo Z., Yang Y., Hu H., Shen H., Zhao X., Kishimoto-Mo A.W., Tang Y., Houghton R. A. (2014) Evidence for environmentally enhanced forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(26): 9527–9532

Fritts H. C. (1976) *Tree rings and climate*. London, Academic Press

Gillner S., Bräuning A., Roloff A. (2014) Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees*, 28(4): 1079–1093

Grimm N. B., Faeth S. H., Golubiewski N. E., Redman C. L., Wu J., Bai X., Briggs J. M. (2008) Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864): 756–760

Grissino-Mayer H.D. (2001) Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57: 205–221

Guardans R. (2002) Estimation of climate change influence on the sensitivity of trees in Europe to air pollution concentrations. *Environmental Science and Policy*, 5(4): 319–333

Helletsgruber C., Gillner S., Gulyas A., Junker R. R., Tanacs E., Hof A. (2020) Identifying tree traits for cooling urban heat islands – a cross-city empirical analysis. *Forests*, 11(10): 1064

Holmes R. L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–78

Hunt A., Watkiss P. (2011) Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change*, 104(1): 13–49

Juknys R., Vencloviene J., Stravinskiene V., Augustaitis A., Bartkevicius E. (2003) Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growth and condition in a polluted environment: from decline to recovery. *Environmental Pollution*, 125(2): 205–212

Kint V., Aertsen W., Campioli M., Vansteenkiste D., Delcloo A., Muys B. (2012) Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901–2008. *Climatic Change*, 115(2): 343–363

Kondrat'ev K. Ya., Matveev L. T. (1999) Basic factors governing the formation of heat island in a large city. *Doklady Earth Sciences*, 367: 741–744

Kukarskih V. V., Devi N. M., Bubnov M. O., Komarova A. V., Agafonov L. I. (2022) Radial growth of Scots pine in urban and rural populations of Ekaterinburg megalopolis. *Dendrochronologia*, 74: 125974

Kuznetsova I. N., Brusova N. E., Nakhaev M. I. (2017) Moscow urban heat island: detection, boundaries, and variability. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(5): 305–313

Locosselli G. M., Chacón-Madrid K., Zezzi Arruda M. A., Pereira de Camargo E., Lopes Moreira T. C., Saldiva de André C. D., Afonso de André P., Singer J. M., Nascimento Saldiva P. H., Buckeridge M. S. (2018) Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 242: 320–328

Oke T.R. (1982) The energetic basis of the urban heat-island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1–24

Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. (2017) *Urban climates*. Cambridge University Press, 525 p.

Parker D.E. (2010) Urban heat island effects on estimates of observed climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1): 123–133

Penninckx V., Meerts P., Herbauts J., Gruber W. (1999) Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *Forest Ecology and Management*, 113(1): 23–33

Pickett S.T.A., Cadenasso M.L., Grove J.M., Nilon C.H., Pouyat R.V., Zipperer W.C., Costanza R. (2001) Urban ecological systems: linking terrestrial, ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32: 127–157

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. (2014) Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications*, 5: 4967

Pretzsch H., Biber P., Uhl E., Dahlhausen J., Schütze G., Perkins D., Rötzer T., Caldentey J., Koike T., Con T. Van, Chavanne A., Toit B. Du, Foster K., Lefer B. (2017) Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports*, 7(1): 15403

R Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing. URL: www.R-project.org/

Rinn F. (1996) *Tsap V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation*. Heidelberg, Germany

Scharnweber T., Manthey M., Criegee C., Bauwe A., Schröder C., Wilmking M. (2011) Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management*, 262(6): 947–961

Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Kanatjev A.G. (2017) Urban heat island investigations in Arctic cities of northwestern Russia. *Journal of Meteorological Research*, 31(6): 1161–1166

Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M., Skovsgaard J.P. (Eds.) (1996) *Growth trends in European forests: studies from 12 countries*. Springer, 372 p.

Stokes M.A., Smiley T.L. (1996) *An introduction to tree-ring dating*. Tucson, University of Arizona Press, 73 p.

Varquez A.C.G., Kanda M. (2018) Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009). *npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1): 32

Voogt J.A., Oke T.R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370–384