

УДК 58.084.2+574.21

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАДИАЛЬНЫЙ РОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ г. КРАСНОЯРСКА

Ю. В. Кладько, А. В. Бенькова, Л. Н. Скрипальщикова

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: KladaJ@mail.ru, benkova@yandex.ru, lara@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.

В настоящее время сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) широко используется в озеленении промышленных городов, несмотря на то, что по своим физиологическим характеристикам она неустойчива к интенсивному техногенному загрязнению. В связи с этим исследование динамики радиального прироста деревьев сосны обыкновенной под влиянием техногенного загрязнения разного состава и интенсивности особенно актуально. В настоящей статье, применяя дендрохронологический метод, мы попытались ответить на вопрос, модифицирует ли загрязнение климатический отклик ширины годичных колец сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Красноярска. Объектами исследования были деревья, произрастающие на одной условно чистой пробной площадке – пп 1 – «Дендрарий ИЛ СО РАН» и на трех пробных, подвергавшихся негативному воздействию атмосферных токсикантов: пп 2 – «Ул. Е. Стасовой» (загрязнение от автотранспорта, основные загрязнители – CO, NO, NO₂, SO₂, бенз(а)пирен и др.); пп 3 – «Парк «Гвардейский» (выбросы промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса; основные загрязнители – CO, NO, NO₂, SO₂, сажа, фтористые соединения, бенз(а)пирен, сероводород и др.); пп 4 – «Ул. 9 Мая» (суммарное влияние выбросов от автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса. По данным ширины годичных колец, полученным нами в более ранних исследованиях (Кладько, Скрипальщикова, 2021), мы рассчитали индексированные хронологии радиального прироста для каждой пп. Для выявления климатического сигнала в индексированных хронологиях использовали построение и анализ скользящих корреляционных климатических функций отклика. По сравнению с условно чистой пп 1, на пп 2 установлена повышенная чувствительность сосны обыкновенной к температуре середины июля, на пп 3 – к температуре в первой половине августа, на пп 4 – к температуре и осадкам в середине июня. Результаты показали, что климатический сигнал в индексированных хронологиях радиального прироста сосны обыкновенной в загрязненных местах произрастания модифицируется в зависимости от характера техногенного загрязнения.

Ключевые слова: ширина годичных колец, индексированные хронологии, скользящие функции отклика, ИЗА₃, модификация климатического сигнала

DOI: 10.15372/SJFS20230512

ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивной урбанизацией, вопросы влияния антропогенной нагрузки на жизненное состояние, процессы роста и развития древесных растений особенно актуальны. Одной из важных характеристик этих процессов является ширина годичного кольца – показатель, который отражает не только особенности роста дерева на различных этапах онтогенеза, но и влияние на рост комплекса факторов среды произрастания (Schweingruber, 1996; Ваганов, Шиятов,

2005; Кирдянов и др., 2014; Kirdyanov et al., 2014; и др.). По динамике радиального прироста можно судить об адаптивной способности древесных видов к разного рода техногенному воздействию (Мусаев, 1996; Кутафина, Краснопивцева, 2017; и др.), что позволяет решать задачи по оптимизации и расширению ассортимента древесных растений, устойчивых в условиях техногенной нагрузки.

Между тем, несмотря на свою актуальность, эти вопросы для крупного промышленного центра г. Красноярска остались недостаточно изу-

ченными. Так, опыт по интенсивному использованию сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в озеленении загрязненных территорий города в последние годы нельзя считать удачным. Здесь наблюдается множество ослабленных и усыхающих сосновых саженцев и крупномерных деревьев. Ранее применение сосны обыкновенной в озеленении было не столь широко распространено. Как было установлено исследователями ранее, по своим физиологическим характеристикам она неустойчива к интенсивному техногенному загрязнению (Кулагин, 1974; Павлов, 2006; Михайлова и др., 2020; и др.). В связи с этим было рекомендовано использовать ее для посадки в пригородных зонах, расположенных в отдалении от источников дыма и атмосферных газообразных загрязнителей (оксиды азота, серы, хлороводород и др.) (Кучеров, Федорако, 1964; Протопопова, 1972; Кулагин, 1974; Неверова, Николаевский, 2003; и др.), а также для создания крупных загородных парков и лесопарков (Лоскутов, 1993).

Тем не менее к этому виду проявляется значительный интерес в связи с его высокими декоративными качествами. Для эффективного использования сосны обыкновенной в озеленении Красноярска необходимо иметь информацию о приживаемости саженцев, жизненном состоянии, динамике роста растений, дифференцированную по территории города, с учетом состава и интенсивности техногенного загрязнения. Такой информации на сегодняшний день крайне недостаточно.

Как известно, токсиканты, содержащиеся в атмосферном воздухе, приводят к нарушениям в физиологических процессах, протекающих в дереве, в частности происходят изменения процесса формирования годичных колец в стволовой древесине. Изменяется прирост деревьев по диаметру. Ширина годичных колец (ШГК) в большинстве случаев уменьшается (Пшеничникова, Скрипальщикова, 2004; Павлов, 2006; Ярмишко и др., 2017; и др.), но не всегда (Уразгильдин, Кулагин, 2021). Изменения, происходящие в органах и тканях древесных растений, зависят от интенсивности воздействия и состава загрязняющих веществ (Вайчис, Армолайтис, 1981; Скрипальщикова и др., 2009а).

Цель настоящей работы – установить, модифицирует ли атмосферное техногенное загрязнение влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Красноярска. С применением дендроэкологических методов исследова-

ния предстояло выявить различия в динамике радиального роста и климатическом отклике у деревьев, произрастающих в условиях загрязнения различного состава и интенсивности, и деревьев, произрастающих в отсутствии загрязнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования выбраны деревья сосны обыкновенной, расположенные в зеленых насаждениях крупного промышленного города Красноярска. Для его территории характерна однородность ветрового режима на протяжении всего года. Вегетационный период длится 156 дней (Климат..., 1982). Воздушная среда районов города характеризуется неоднородностью загрязнения атмосферными токсикантами. Их распространение варьирует в зависимости от рельефа местности, ветрового режима, особенностей хозяйственного использования территории и застройки и характеризуется $ИЗА_5$ – данными по комплексной безразмерной характеристике уровня загрязнения атмосферы, рассчитанной по пяти приоритетным загрязняющим веществам с учетом их опасности и концентрации в атмосфере в долях ПДК ($ИЗА_5$) (Руководство..., 1991; Хлебопрос и др., 2012; Государственный доклад..., 2022). В России при $ИЗА_5 < 5$ загрязнение считается низким, от 5 до 6 – повышенным, от 7 до 13 – высоким и равном или большем 14 – очень высоким. Данные об абсолютных значениях $ИЗА_5$ по г. Красноярску для исследованного периода приведены в табл. 1.

Ранее было установлено, что районы города имеют свой уровень интенсивности загрязнения (Скрипальщикова и др., 2009б; Skripal'shchikova et al., 2009; Хлебопрос и др., 2012; Государственный доклад..., 2022). Мы предположили, что при этом погодичная динамика интенсивности загрязнения в них синхронна таковой для $ИЗА_5$.

На территории г. Красноярска в 2020 г. заложено 4 пробные площадки (пп), различающиеся между собой по уровню и составу техногенного загрязнения (рис. 1).

1. «Дендрарий ИЛ СО РАН». Здесь практически отсутствуют источники загрязнения и ее можно считать условно чистой (контрольная пп).

2. «Ул. Е. Стасовой». Основной источник загрязнения – автотранспорт (CO , NO , NO_2 , SO_2 , бенз(а)пирен и другие загрязнители).

Таблица 1. Значения $ИЗА_5$ в г. Красноярске в 2004–2019 гг.

Год	Абсолютное значение $ИЗА_5$	Уровень загрязнения
2004	13.32	Высокий
2005	15.14	Очень высокий
2006	11.27	Высокий
2007	14.66	Очень высокий
2008	15.31	Тот же
2009	18.56	Очень высокий
2010	21.86	Тот же
2011	23.75	» »
2012	22.93	» »
2013	17.05	» »
2014	14.00	» »
2015	7.00	Высокий
2016	14.00	Очень высокий
2017	14.00	Тот же
2018	14.00	» »
2019	13.00	Высокий

3. «Парк «Гвардейский», который находится под воздействием выбросов промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса (CO , NO , NO_2 , SO_2 , сажа, фтористые соединения, бенз(а)пирен, сероводород и другие соединения).

4. «Ул. 9 Мая». На зеленые насаждения суммарно действуют выбросы автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса (Хлебопрос и др., 2012; Государственный доклад..., 2022).

Различия по климатическим факторам между пп не столь существенны. Так, в монографии

«Климат Красноярска» (1982) указано, что зональные микроклиматические различия в температурах атмосферного воздуха пренебрежительно малы.

Почвы на загрязненных пробных площадках антропогенно преобразованы (Шишов и др., 2004), их уровень загрязнения сопоставим с уровнем загрязнения воздуха и снежного покрова места произрастания (Скрипальщикова и др., 2009б). На условно чистой пп «Дендрарий ИЛ СО РАН» расположены антропогенно ненарушенные почвы, с фоновым уровнем содержания токсикантов (Скрипальщикова и др., 2009б; Хлебопрос и др., 2012).

На каждой пробной площадке было выбрано по 5 модельных деревьев сосны обыкновенной (в связи с тем, что их общее количество на пп ограничивалось всего 5–8 особями), находящихся в генеративной стадии развития. В пределах одной пп представители вида имели одинаковый класс возраста. Модельные экземпляры отбирали в соответствии с инженерно-топографическими планами территорий, чтобы вблизи них не проходили подземные коммуникации, с целью исключения антропогенно индуцированного теплового воздействия на корневую систему. На пп «Дендрарий ИЛ СО РАН» и «Парк «Гвардейский» деревья были высажены группами; на пп «Ул. Е. Стасовой» и «Ул. 9 Мая» – в рядовые посадки. Чтобы исключить ценотический эффект конкуренции, деревья высаживали на расстоянии не менее 3 м друг от друга

В настоящее время используются разные статистические методы анализа влияния техногенного загрязнения на динамику радиального роста, среди которых дендрохронологические

**Рис. 1.** Расположение пробных площадок на территории г. Красноярска.

1 – «Дендрарий ИЛ СО РАН», 2 – «Ул. Е. Стасовой»; 3 – «Парк «Гвардейский»; 4 – «Ул. 9 Мая» (Яндекс..., 2023).

Таблица 2. Статистические характеристики индексированных хронологий радиального прироста деревьев сосны обыкновенной на пробных площадках

Показатель	«Дендрарий ИЛ СО РАН»	«Ул. Е. Стасовой»	«Парк «Гвардейский»	«Ул. 9 Мая»
Возраст деревьев, лет	39 ± 6	15 ± 2	23 ± 1	16 ± 1
Средняя ШГК, мм	4.08 ± 0.39	4.17 ± 0.42	3.80 ± 0.48	3.92 ± 0.35
Дисперсия	2.09	2.45	3.25	1.68
R_{bar}	0.89	0.68	0.62	0.69

методы авторами характеризуются как достаточно информативные (Уразгильдин, Кулагин, 2021). В работе мы использовали стандартные (датировка и измерение ширины годичных колец, стандартизация данных измерений: Fritts, 1976; Cook, Kairiuktis, 1990; Schweingruber, 1996; Шиятов и др., 2000) и нестандартные (метод скользящих корреляционных климатических функций отклика, предложенный в работе А. Shashkin et al. (2010)) дендрохронологические приемы.

Материалом для дендрохронологического исследования были керны, взятые со ствола каждого модельного дерева на 25–30 см выше поверхности почвы по случайному радиусу. Ширину последовательных годичных колец на кернах измеряли на полуавтоматическом измерительном комплексе LINTAB v 3.0 с пакетом программного обеспечения TSAP Win v4.68. с точностью 0.01 мм. Результат прямого измерения ширины годичных колец (ШГК) – абсолютные древесно-кольцевые хронологии (Кладько, Скрипальщикова, 2021). Они содержат возрастные тренды, эдафические различия, погодноклиматические сигналы, сигналы антропогенного воздействия на дерево и др. При проведении индексирования абсолютных индивидуальных хронологий стандартными дендрохронологическими методами (Fritts, 1976; Шиятов и др., 2000) с использованием общепринятых программ Arstan и Cofecha мы исключили или, по крайней мере, значительно снизили влияние факторов, которые не варьируют погодиочно, чтобы выделить климатически обусловленную годовичную вариабельность. Индексировали наиболее подходящими в нашем случае отрицательной экспоненциальной и линейной функциями.

Поскольку число модельных деревьев (5), взятых для исследования на пп, не соответствовало рекомендациям, принятым в дендрохронологии (не менее 10 деревьев), важно было показать, что эта выборка репрезентативна. Как показывают данные табл. 2, индивидуальные индексированные хронологии радиального при-

роста деревьев в пределах каждой пп отличаются довольно высокой синхронностью (коэффициент R_{bar} принимает значение от 0.62 до 0.89).

Это значит, что для каждой пп можно получить среднюю индексированную хронологию методом усреднения индивидуальных хронологий и применять ее для дальнейшего анализа.

Для стандартизации мы проиндексировали также ежегодные данные по ИЗА₅; индексация проводилась отрицательной экспоненциальной функцией.

Для оценки статистической связи индексов радиального прироста деревьев с климатическими переменными (с температурой воздуха и количеством осадков) применяли расчет и анализ «скользящих корреляционных климатических функций отклика» (Бенькова и др., 2012). Этот метод позволил выявить промежутки времени в пределах сезона вегетации, значительно более короткие, чем 1 мес, характеризующиеся значимым влиянием климатических факторов на радиальный прирост. Мы рассчитывали корреляцию индексов радиального прироста с сериями среднесуточных температур и суточных осадков, усредненных за 20 дней, со сдвигом этих промежутков времени на 5 дней вперед. Расчеты проводили с применением авторской программы, разработанной А. В. Шашкиным с соавт. (Shashkin et al., 2010), программ Statistica 10 и Microsoft Excel. Использовали метеоданные, полученные за период 1974–2018 гг. на метеостанции «Красноярское опытное поле» (Архив..., 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость между индексами ширины годичных колец (ШГК) сосны обыкновенной на загрязненных пп и индексами ИЗА₅ характеризуют данные рис. 2.

Коэффициенты детерминации при аппроксимации значений ШГК убывающей линейной функцией ($R^2 = 0.026$ на пп «Ул. Е. Стасо-

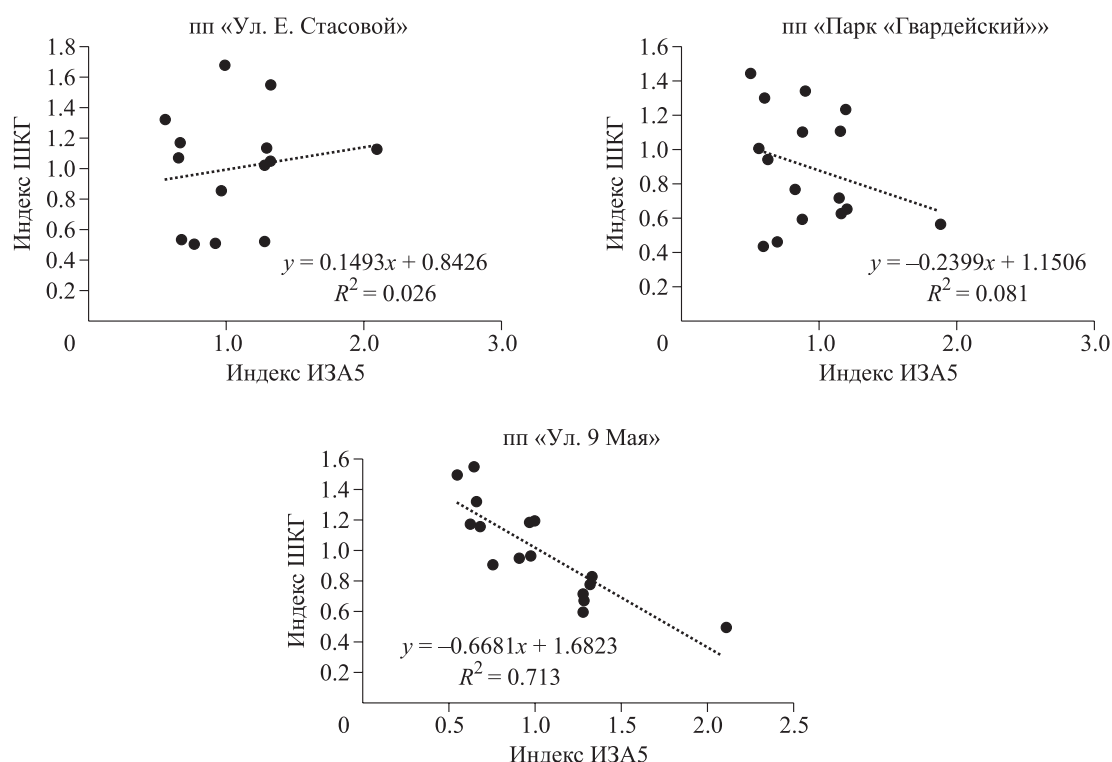


Рис. 2. Погодичная изменчивость ширины годовых колец (индексов ШГК) в зависимости от погодичной изменчивости уровня загрязнения атмосферы (индексы ИЗА₅) у сосны обыкновенной, произрастающей на пп в условиях разной техногенной нагрузки (2004–2019 гг.).

вой»; $R^2 = 0.081$ на пп «Парк «Гвардейский» и $R^2 = 0.713$ на пп «Ул. 9 Мая») указывают на то, что выраженная отрицательная связь между этими показателями имеется только на одной пп – «Ул. 9 Мая». Значимая отрицательная корреляция $R = -0.84$ между индексами ШГК и ИЗА₅ выявлена также только на пп «Ул. 9 Мая» (уровень достоверности $R = \pm 0.55$ при $p < 0.05$). На остальных пп корреляция между этими показателями незначима (-0.38 на пп «Дендрарий ИЛ СО РАН»; 0.16 на пп «Ул. Е. Стасовой» и -0.28 на пп «Парк «Гвардейский»). Ранее (Кладько, Скрипальщикова, 2021) на всех трех пп была выявлена статистически достоверная (при $p < 0.05$) отрицательная корреляция между шириной годовых колец и степенью техногенного загрязнения (выраженной в ИЗА₅) у деревьев сосны обыкновенной: -0.81 на пп «Ул. Е. Стасовой», -0.51 на пп «Парк «Гвардейский» и -0.41 на пп «Ул. 9 Мая» (уровень достоверности $R = \pm 0.29$ при $p < 0.05$).

Операцией индексирования мы нивелировали тренды в зависимостях от времени ШГК, обусловленные влиянием относительно стабильных факторов, которые не варьируют погодично, и тренды в зависимостях от времени ИЗА₅. В результате индексирования корреля-

ционная связь между нормированными показателями ШГК и ИЗА₅ на пп «Ул. Е. Стасовой» и пп «Парк «Гвардейский» стала существенно слабее, а на пп «Ул. 9 Мая» – заметно сильнее.

Таким образом, мы выявили, что наибольшую чувствительность к погодичной вариабельности уровня атмосферного загрязнения проявляет сосна обыкновенная, произрастающая под воздействием сильного комплексного техногенного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий.

Чтобы установить, модифицирует ли техногенное загрязнение реакцию деревьев на климатические факторы, применяли следующий подход: сравнивали климатический «отклик» индексов радиального прироста деревьев на загрязненных пп с таковым на условно чистой пп. Климатический отклик мы выявляли путем построения и анализа скользящих корреляционных климатических функций отклика радиального прироста сосны обыкновенной на всех исследованных пп в 1974–2018 гг. Для построения были использованы среднесуточные данные температуры воздуха и суточных осадков с 1 апреля по 20 сентября, так как в этот период заметное влияние погодных условий на ширину годовых колец вполне вероятно.

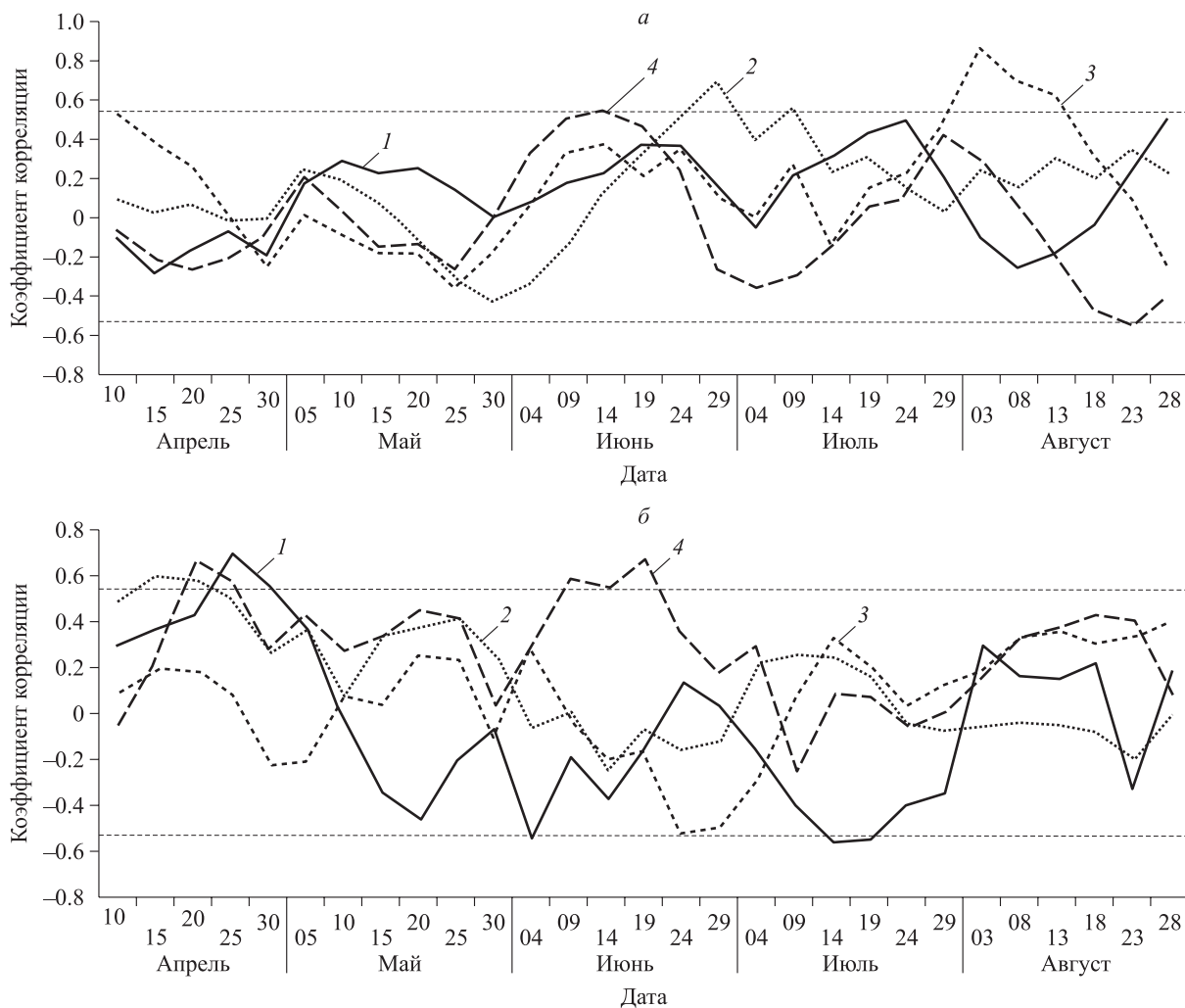


Рис. 3. Скользящие корреляционные 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста деревьев сосны обыкновенной на температуру воздуха (а) и количество осадков (б).

1 – «Дендрарий ИЛ СО РАН»; 2 – «Ул. Е. Стасовой»; 3 – «Парк «Гвардейский»; 4 – «Ул. 9 Мая», 1974–2018 гг.

Скользящие корреляционные функции отклика показали значимую положительную корреляцию радиального прироста сосны обыкновенной с температурой воздуха (рис. 3, а; $R \geq |0.55|$ значимы при $p < 0.05$): на пп «Ул. Е. Стасовой» – в конце июня – I декаде июля (рис. 3, а, 2), на пп «Парк «Гвардейский» – в первой половине августа (рис. 3, а, 3), на пп «Ул. 9 Мая» – в середине июня (рис. 3, а, 4).

На условно чистой пп «Дендрарий ИЛ СО РАН» (рис. 3, а, 1) значимой корреляционной связи прироста с температурой не выявлено.

Положительная корреляция с количеством осадков (рис. 3, б) выявлена на пп «Ул. Е. Стасовой» – во второй половине апреля (рис. 3, б, 2), на пп «Парк «Гвардейский» – в III декаде апреля (рис. 3, б, 3), на пп «Ул. 9 Мая» – во второй половине июня (рис. 3, б, 4). На условно чистой пп «Дендрарий ИЛ СО РАН» в конце апреля выяв-

лена положительная корреляция прироста с количеством осадков, а в середине июля – слабая (на грани достоверности) отрицательная корреляции (рис. 3, б, 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атмосферное техногенное загрязнение модифицирует влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Красноярска. Особенности модификации соответствуют составу и степени загрязнения места произрастания:

– деревья, произрастающие в местах, где основным источником загрязнения является автотранспорт (основные загрязнители CO, NO, NO₂, SO₂, бенз(а)пирен), проявили повышенную, по сравнению с деревьями на условно чистом месте, чувствительность к влиянию температуры

воздуха в конце июня – I декаде июля (чем выше температура, тем шире годовичное кольцо);

– деревья, произрастающие под воздействием выбросов промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса (основные загрязнители CO, NO, NO₂, SO₂, сажа, фтористые соединения, бенз(а)пирен, сероводород), проявили повышенную чувствительность к влиянию температуры воздуха в первой половине августа (чем выше температура, тем шире годовичное кольцо);

– деревья, произрастающие под воздействием сильного комплексного техногенного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий, проявили повышенную, по сравнению с условно чистым местом, чувствительность к влиянию температуры воздуха и количеству осадков в середине июня, в период активного роста годовичного кольца (чем выше температура и количество осадков в этот период времени, тем шире годовичное кольцо).

В то же время они (деревья) проявили сравнительно низкую чувствительность к количеству весенних (апрельских) осадков в период реактивации камбия и в начале радиального роста. Между тем, положительная реакция на последние проявилась как в остальных загрязненных местах произрастания, так и в условно чистом месте. Возможно, агротехнический уход, заключающийся в регулярном поливе и дождевании кроны, в июне мог бы несколько снизить негативный эффект от воздействия токсикантов.

Следует иметь в виду возможность проявления синергизма – усиление или снижение климатического отклика радиального прироста в результате влияния на сосну техногенного загрязнения, и климатических, и других факторов, характерных для локальных условий произрастания (например, различие в физико-механических и гидротермических почвенных условиях (Nikolaev et al., 2009; Zav'yalov et al., 2019)).

Погодичное изменение уровня атмосферного загрязнения (выраженного в ИЗА₅) существенно сказывается на радиальном приросте деревьев сосны обыкновенной, произрастающих под воздействием сильного комплексного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий: чем больше ИЗА₅, тем меньше прирост. На прирост деревьев, произрастающих в местах, подверженных заметному влиянию этих источников в отдельности, изменение ИЗА₅ влияет сравнительно слабо.

По результатам проведенных исследований мы считаем нецелесообразным высаживать сос-

ну обыкновенную на участках с интенсивным комплексным воздействием выбросов от автотранспорта и промышленных предприятий. Раздельное же влияние этих источников не дает столь угнетающего эффекта.

Исследование выполнено в рамках базового проекта ФИЦ КНЦ СО РАН № FWES-2021-0008 «Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архив погоды в Опытном поле. Красноярск, 2023. https://gr5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%9E%D0%BF%D1%8B%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%BC_%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%B5
- Бенькова В. Е., Шашкин А. В., Наурзбаев М. М., Прокушкин А. С., Симанько В. В. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр // Лесоведение. 2012. № 4. С. 73–84.
- Ваганов Е. А., Шиятов С. Г. Дендроклиматические и дендрологические исследования в Северной Евразии // Лесоведение. 2005. № 4. С. 18–27.
- Вайчис М., Армолайтис К. Чувствительность и устойчивость аборигенных и кустарниковых пород к промышленным эмиссиям в условиях Литвы // Всесоюзное совещание по вопросам адаптации древесных растений к экстремальным условиям среды. Петрозаводск: Карел. филиал АН СССР, 1981. С. 16.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году». Красноярск: ЦРМПиООС, 2022. 317 с.
- Кирдянов А. В., Мыглан В. С., Пименов А. В., Кнорре А. А., Экарт А. К., Ваганов Е. А. Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21. № 6. С. 945–952.
- Кладько Ю. В., Скрипальщикова Л. Н. Радиальный рост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2021. № 3. С. 38–43.
- Климат Красноярска / ред. Ц. А. Швер, А. С. Герасимова. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 231 с.
- Кулагин Ю. З. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука, 1974. 169 с.
- Кутафина Н. В., Красновиццева А. Н. Физиологические основы адаптации растительных организмов в условиях урбанизированной среды // Вестн. РУДН. Сер. «Экол. и безопасн. жизнедеятельн.». 2017. Т. 25. № 1. С. 21–28.
- Кучеров Е. В., Федорако Б. И. Влияние промышленных загрязнений на растительность Башкирской АССР // Охрана природы на Урале. Сб. науч. тр. Свердловск, 1964. Вып. 4. С. 163–168.
- Лоскутов Р. И. Декоративные древесные растения для озеленения городов и поселков. Красноярск: КГУ, 1993. 184 с.

- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых лесов на примере Иркутской области // Лесоведение. 2020. № 3. С. 265–273.
- Мусаев Е. К. Сезонный рост и строение годичных колец сосны обыкновенной в зоне Чернобыльской катастрофы // Лесоведение. 1996. № 1. С. 16–28.
- Неверова О. А., Николаевский В. С. Оценка устойчивости древесных насаждений по степени нарушения ассимиляционного аппарата и крон деревьев // Лесн. хозяйство. 2003. № 6. С. 31–32.
- Павлов И. Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2006. 370 с.
- Протопопова Е. Н. Рекомендации по озеленению городов и рабочих поселков Средней Сибири. Красноярск: Краснояр. раб., 1972. 148 с.
- Пишеничникова Л. С., Скрипальщикова Л. Н. Влияние высокой антропогенной нагрузки на радиальный прирост сосновых древостоев // Актуал. пробл. лесн. комплекса. 2004. № 9. С. 33–36.
- Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89 (утв. Госкомгидрометом СССР 01.06.1989, Гл. гос. санитарным врачом СССР 16.05.1989). М.: Финансы и статистика, 1991. 615 с.
- Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В., Первозникова В. Д., Зубарева О. Н., Татаринцев А. И. Влияние комплекса техногенных и рекреационных нагрузок на развитие тканей ствола сосны обыкновенной в Красноярской лесостепи // Изв. РАН. Сер. биол. 2009а. № 5. С. 618–626.
- Скрипальщикова Л. Н., Татаринцев А. И., Зубарева О. Н., Первозникова В. Д., Стасова В. В., Грешилова Н. В. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009б. 179 с.
- Уразильдин Р. В., Кулагин А. Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч. 3. Влияние на радиальный прирост и корневые системы // Биосфера. 2021. Т. 13. № 3. С. 101–119.
- Хлебопрос Р. Г., Тасейко О. В., Иванова Ю. Д., Михайлюта С. В. Красноярск. Экологические очерки. Красноярск: СФУ, 2012. 130 с.
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурызбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособ. Красноярск: КГУ, 2000. Ч. I. 80 с.
- Яндекс. Карты, 2023. <https://yandex.ru/maps/62/krasnoyarsk.ru>
- Ярмишко В. Т., Лянгузова И. В., Лянгузов А. Ю. Изменение годичного прироста стволов *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при снижении аэротехногенного загрязнения // Раст. рес. 2017. Т. 53. № 4. С. 527–542.
- Cook E. R., Kairiuktis L. A. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
- Fritts H. C. Tree rings and climate. London, NY, San Francisco: Acad. Press., 1976. 582 p.
- Kirdyanov A. V., Myglan V. S., Pimenov A. V., Knorre A. A., Ekart A. K., Vaganov E. A. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises // Contemp. Probl. Ecol. 2014. V. 7. Iss. 6. P. 679–684 (Original Rus. text © A. V. Kirdyanov, V. S. Myglan, A. V. Pimenov, A. A. Knorre, A. K. Ekart, E. A. Vaganov, 2014, publ. in Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2014. N. 6. P. 945–952).
- Nikolaev A. N., Fedorov P. P., Desyatkin A. R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia // Scand. J. For. Res. 2009. V. 24. N. 3. P. 217–226.
- Shashkin A., Benkova V., Siman'ko V. The peculiarities of larch growth at the northern timberline // WorldDendro-2010. Abstr. 8th Int. Conf. Dendrochronology, 13–18 June, 2010. Rovaniemi, Finland, 2010. P. 149.
- Schweingruber F. N. Tree rings and environment. Dendroecology. Brimensdorf: WSL/FNP: Bern, Stuttgart: Viena Haupt Publ., 1996. 609 p.
- Skrpal'shchikova L. N., Stasova V. V., Perevoznikova V. D., Zubareva O. N., Tatarintsev A. I. Effect of the complex of technogenic and recreational loads on development of trunk tissues of Scotch pine in the Krasnoyarsk forest-steppe // Biol. Bull. Rus. Acad. Sci. 2009. V. 36. Iss. 5. P. 524–531 (Original Rus. text © L. N. Skripal'shchikova, V. V. Stasova, V. D. Perevoznikova, O. N. Zubareva, A. I. Tatarintsev, 2009, publ. in Izv. RAN. Ser. Biol. 2009. N. 5. P. 618–626).
- Zav'yalov K., Ivanova N., Potapenko A., Ayan S. Influence of soil fertility on the ability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to adapt to technogenic pollution // Cerne. 2019. V. 25. N. 4. P. 326–331.

INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON RADIAL GROWTH OF SCOTS PINE UNDER THE CONDITIONS OF TECHNOGENIC POLLUTION IN THE CITY OF KRASNOYARSK

Yu. V. Klad'ko, A. V. Ben'kova, L. N. Skripal'shchikova

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: KladaJ@mail.ru, benkova@yandex.ru, lara@ksc.krasn.ru

At present, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is widely used in the landscaping of industrial cities, despite the fact that, according to its physiological characteristics, it is not resistant to intense technogenic pollution. Thus, the study of radial growth dynamics of Scots pine trees under the influence of technogenic pollution of different composition and intensity is greatly important. The purpose of this article is to use the dendrochronological method to answer the question of whether pollution modifies the climatic response of the annual ring width of Scotch pine in the green plantations of Krasnoyarsk. The objects of the study were trees growing on three test sites (TS) exposed to the negative effects of atmospheric toxicants: 2) TS «E. Stasova str.» (pollution from vehicles, the main pollutants are CO, NO, NO₂, SO₂, benzo(a)pyrene, etc.); 3) TS «Park «Gvardeisky» (emissions from industrial enterprises of non-ferrous metallurgy and heat and power complex; the main pollutants are CO, NO, NO₂, SO₂, soot, fluorine compounds, benzo(a)pyrene, hydrogen sulfide, etc.); 4) TS «9 Maya str.» (total impact of emissions from motor transport and industrial enterprises of non-ferrous metallurgy and heat and power complex) and on one conditionally 1) clean test site – TS «Arboretum of IL SB RAS». Based on the annual ring width data obtained in the first article of the cycle (Klad'ko, Skripal'shchikova, 2021), we calculated indexed radial increment curves for each site. To identify the climatic signal in indexed chronologies, we used the method of sliding correlation climatic response functions. At the TS 2, in comparison with the conditionally pure TS 1, an increased sensitivity of Scots pine to the temperature of middle-July, at the TS 3 an increased sensitivity to temperature of one-half of August, at the TS 4 an increased sensitivity to temperature and precipitation of middle June. The results showed that climate signal in dynamics of the radial growth of Scotch pine modified by the influence of technogenic pollution in relation its properties.

Keywords: *tree ring width, indexed tree ring chronologies, sliding climate correlation functions, coefficient of technogenic pollution IZA_s, climate response modification.*

How to cite: *Klad'ko Yu. V., Ben'kova A. V., Skripal'shchikova L. N. Influence of climatic factors on radial growth of Scots pine under the conditions of technogenic pollution in the city of Krasnoyarsk // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 5. P. 91–99 (in Russian with English abstract and references).*