

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/7>

УДК 630*181.5:581.543:711.4



Влияние декадных температур весеннего сезона на фенологические сдвиги *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. в условиях урбоэкосистемы (на примере г. Воронежа)

Олег В. Серебряков, o-ser00@mail.ru, 0009-0006-1171-0368

Наталья В. Яковенко , n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В статье представлены результаты исследований влияния температурных изменений весеннего сезона на фенологические ритмы древесных пород на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях урбанизированной среды г. Воронежа. На основе 4-летних (2021–2024 гг.) фенологических наблюдений на восьми модельных площадках выявлена тенденция к смещению сроков наступления ключевых фаз (распускание листьев, начало цветения) на более ранние даты. С применением корреляционного анализа (метод Пирсона) установлена сильная отрицательная связь между среднемесячными и декадными температурами воздуха весенних месяцев и сроками наступления фенофаз. Наиболее значимое влияние на фенологию изучаемых видов оказывают температуры третьей декады марта и первой-третьей декад апреля. Результаты подтверждают высокую индикаторную роль фенологических наблюдений для оценки климатических изменений и могут быть использованы для адаптации стратегий озеленения городских территорий.

Ключевые слова: фенология, биоиндикация, изменение климата, весенние температуры, *Betula pendula*, *Tilia cordata*, городская среда, Воронеж

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Серебряков, О. В. Влияние декадных температур весеннего сезона на фенологические сдвиги *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. в условиях урбоэкосистемы (на примере г. Воронежа) / О. В. Серебряков, Н. В. Яковенко // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 98-112. – Библиогр.: с. 108-111 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/7>.

Поступила 23.11.2025. **Пересмотрена** 23.12.2025. **Принята** 15.03.2026. **Опубликована онлайн** 27.03.2026.

Article

Influence of decade temperatures of the spring season on the phenological shifts of *Betula pendula* Roth. and *Tilia cordata* Mill. in the conditions of the urbanoecosystem (using the example of Voronezh city)

Oleg V. Serebryakov, o-ser00@mail.ru, 0009-0006-1171-0368

Nataliya V. Yakovenko , n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

¹ *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

The article presents the results of research on the influence of springtime temperature changes on the phenological rhythms of tree species using the example of silver birch (*Betula pendula* Roth.) and small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in the urbanized environment of the city of Voronezh. Based on 4-year (2021-2024) phenological observations at eight model sites, a trend towards shifting the onset of key phases (leaf emergence, flowering) to earlier dates has been revealed. Using correlation analysis (Pearson's method), a strong negative relationship was established between the average monthly and decade-level air temperatures of the spring months and the onset of phenophases. The temperatures of the third decade of March and the first-third decade of April have the most significant impact on the phenology of the studied species. The results confirm the high indicator role of phenological observations in assessing climate change and can be used to adapt urban landscaping strategies.

Key words: *phenology, bioindication, climate change, spring temperatures, Betula pendula, Tilia cordata, urban environment, Voronezh*

Funding: The study was conducted within the framework of the university internal grant No. 15V/25.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Serebryakov O. V., Yakovenko N. V. (2026). The influence of decade temperatures of the spring season on the phenological shifts of *Betula pendula* Roth. and *Tilia cordata* Mill. in the conditions of urban ecosystem (using the example of Voronezh city). Forestry Engineering journal. Vol. 16, No. 1 (61), pp. 98-112 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/7>.

Received 23.11.2025. **Revised** 23.12.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Современная эпоха характеризуется беспрецедентными по скорости и масштабу антропогенными изменениями климатической системы планеты. Согласно выводам Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2023), глобальная приземная температура уже повысилась на 1.1°C по сравнению с доиндустриальным уровнем, причем наиболее интенсивное потепление наблюдается в средних и высоких широтах Северного полушария, особенно в весенний период [1]. Это явление трансформирует фундаментальные биоклиматические ритмы, определяющие функционирование наземных экосистем. В условиях урбанизированных территорий глобальный тренд накладывается на мощный локальный эффект «городского теплового острова» (Urban Heat Island, UHI), который формирует специфический микроклимат с повышенным температурным фоном, измененным режимом влажности и атмосферной циркуляции [2, 3]. Таким образом, городские древесные насаждения оказываются

на «передовой» климатических изменений, испытывая кумулятивный стресс от глобальных и локальных факторов.

Фенология растений – наука о сезонных циклах развития – признана одним из наиболее чутких и интегральных биологических индикаторов реакции экосистем на изменение климата [4, 5]. Сдвиги в сроках наступления ключевых фенофаз, таких как распускание почек (фолофаза), начало цветения (антезис) или осеннее окрашивание листьев, являются непосредственным и измеримым откликом на динамику абиотических факторов среды. Многочисленные глобальные и региональные исследования последних лет однозначно свидетельствуют о тенденции к смещению весенних фенофаз на более ранние сроки, что напрямую коррелирует с потеплением весенних месяцев [6, 7]. Этот процесс нарушает сложившиеся эволюционно-стабильные синхронизации внутри экосистем (например, между цветением растений и активностью насекомых-опылителей), что может приводить к явлению «фенологического несоответствия»

(phenological mismatch) и снижению устойчивости биоценозов [8].

В контексте устойчивого развития городов и адаптации к изменению климата особую актуальность приобретает изучение фенологического отклика древесных пород-интродуцентов, составляющих основу зеленого каркаса. Такие виды, как береза повислая (*Betula pendula* Roth.) и липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), широко используются в озеленении городов Европейской части России благодаря своей декоративности, относительной устойчивости к техногенному загрязнению и рекреационной нагрузке [9-11]. Однако их долговечность, стабильность и эстетические качества в условиях меняющегося климата напрямую зависят от способности адаптировать свои фенологические ритмы к новым температурным реалиям [12-15]. Раннее распускание листьев повышает риск повреждения нежных тканей возвратными заморозками, а сдвиг сроков цветения может влиять на репродуктивный успех и жизненный цикл связанных с ними организмов [16].

Несмотря на значительный объем работ, посвященных влиянию климата на фенологию в естественных биотопах, существует ряд нерешенных вопросов применительно к урбанизированным территориям. Во-первых, большинство исследований оперирует среднемесячными температурами, тогда как критические для запуска фенофаз пороги суммы эффективных температур могут накапливаться в течение конкретных, часто коротких, периодов потепления внутри месяца [17]. Декадный (10-дневный) анализ температурного режима позволяет выявить эти «критические окна» влияния с большей точностью. Во-вторых, требуется больше данных о видоспецифичности фенологического отклика в условиях одного и того же урбополиса, где разные виды могут демонстрировать различную стратегию адаптации к идентичным климатическим сигналам [18-20]. В-третьих, остается открытым вопрос о том, насколько сильно антропогенный пресс (загрязнение воздуха, уплотнение почв) модулирует температурную реакцию фенологии, потенциально ослабляя или усиливая климатический сигнал [20-22].

Таким образом, проведение детальных региональных исследований, сочетающих

многолетний фенологический мониторинг с высокоразрешенным (декадным) анализом метеоданных в условиях конкретного города, является необходимым шагом для разработки научно обоснованных адаптационных мер в области городского лесоустройства и озеленения.

Целью данного исследования является количественная оценка влияния температурного режима весеннего сезона (март–май) на динамику наступления ключевых фенофаз у модельных древесных пород (*Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.) в условиях разноуровневой антропогенной нагрузки в г. Воронеже.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проанализировать многолетнюю (2021–2024 гг.) динамику среднемесячных и декадных температур воздуха весенних месяцев на территории г. Воронежа.
2. На основе оригинальных полевых данных зафиксировать межгодовую и пространственную изменчивость сроков наступления фенофаз распускания листьев и начала цветения у березы повислой и липы мелколистной на восьми модельных площадках, различающихся по характеру антропогенного воздействия.
3. Методом корреляционного анализа (Пирсона) установить силу, направленность и статистическую значимость связей между различными температурными параметрами (среднесезонные, среднемесячные, декадные значения) и датами наступления исследуемых фенологических событий для каждой древесной породы.
4. На основе выявленных корреляционных закономерностей оценить сравнительную индикаторную значимость *Betula pendula* и *Tilia cordata* для биоиндикации весеннего потепления и сформулировать практические рекомендации для мониторинга состояния городских насаждений в условиях изменяющегося климата.

Научная новизна работы заключается в применении подхода декадного анализа температур для выявления наиболее значимых периодов влияния на фенологию в условиях урбоэкосистемы, а также в сравнительной оценке видоспецифичного фенологического

отклика двух доминирующих в озеленении пород на трансекте с градиентом антропогенной нагрузки.

Материалы и методы

1. Объекты и район исследований

Исследования проводились в период 2021–2024 гг. на территории городского округа город Воронеж, расположенного в лесостепной зоне Среднерусской возвышенности. В качестве модельных объектов были выбраны две широко распространенные в озеленении города листопадные древесные породы:

- Береза повислая (*Betula pendula* Roth.) – пионерная порода, характеризующаяся высокой экологической пластичностью и ранним началом вегетации.
- Липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) – устойчивая, долговечная порода, являющаяся доминантом в составе многих парковых и аллеиных насаждений, с более поздними сроками вегетативного и генеративного развития.

Для учета пространственной неоднородности городской среды и градиента антропогенной нагрузки наблюдения проводились на 8 постоянных фенологических площадках (ФП), заложенных в различных функциональных зонах города (Таблица 1, рис.1).

Выбор площадок обеспечил репрезентативность данных и позволил усреднить локальные микроклиматические эффекты для выявления общегородского тренда.

2. Методика фенологических наблюдений

На каждой фенологической площадке было выбрано и промаркировано по 10 модельных деревьев каждой породы. Критериями отбора служили: возрастная группа (взрослые, генеративные особи), хорошее витальное состояние (отсутствие видимых повреждений, усыхания), достаточная инсоляция (деревья опушечные или первого яруса).

Наблюдения проводились с периодичностью 1 раз в 2 дня в ключевые периоды ожидания фенофаз (с конца марта по июнь). Фиксировались две основные фенофазы, наиболее четко определяемые

визуально и значимые для оценки начала вегетации:

1. Начало распускания листьев (ВВСН 11): дата, когда у 50% и более модельных деревьев на побегах стандартного уровня (1.5-2 м) развернулись первые листовые пластинки, вышедшие из почечных чешуй.
2. Начало цветения (ВВСН 61): дата, когда у 50% и более модельных деревьев раскрылись первые цветки (сережки у *Betula pendula*; соцветия-полусонтики у *Tilia cordata*).

Дата наступления фенофазы для каждой площадки определялась как средняя арифметическая от дат, зафиксированных для 10 модельных деревьев. Для последующего общегородского анализа использовалась усредненная дата по всем 8 площадкам, что минимизировало влияние локальных условий конкретной ФП.

3. Источники и обработка климатических данных

Ежедневные данные о температуре воздуха были получены по метеостанции «Воронеж» (идентификатор 34123) за период с 1 марта по 31 мая 2021–2024 гг. Выбор данной станции обусловлен надежностью, непрерывностью ряда наблюдений и репрезентативностью данных для фона городской территории.

Для статистической оценки термического режима весеннего сезона на основе ежедневных данных были рассчитаны агрегированные температурные показатели трёх уровней. На первом уровне определялись среднемесячные значения температуры воздуха для каждого весеннего месяца — марта, апреля и мая. На втором уровне вычислялся интегральный показатель — средняя температура весеннего сезона, представляющая собой среднее арифметическое значений за три указанных месяца. Для более детального анализа внутримесячной динамики использовался третий уровень — расчёт среднедекадных температур. При этом каждая декада определялась как стандартный 10-дневный интервал: первая (1–10 число), вторая (11–20 число) и третья (21–30/31 число).

Характеристика фенологических площадок

Table 1

Characteristics of Phenological Observation Sites*

№ ФП / Site No.	Название и расположение / Name and Location	Краткая характеристика / Brief Characteristics (тип насаждения, преобладающая нагрузка / plantation type, predominant load)	Условный уровень антропогенной нагрузки* / Conventional Level of Anthropogenic Load*
1	Парк «Алые паруса» (левый берег) / "Alie Parusa" Park (left bank)	Прибрежный парк, аллеи из модельных пород, высокая рекреация. / Riverside park, alleys of model species, high recreational load	Средний / Medium
2	Дендропарк им. Глинки (правый берег) / Glynky Dendrological Park (right bank)	Дендрологический парк в пределах нагорной дубравы, окружен автодорогами. / Dendrological park within the upland oak forest, surrounded by roads	Средний / Medium
3	Центральный парк / Central Park	Крупный лесопарк со сложным рельефом, максимальная рекреационная нагрузка. / Large forest park with complex topography, maximum recreational load	Высокий / High
4	Студенческий городок ВГЛУ (Дендрарий) / VGLTU Campus (Arboretum)	Аллеи в дендрарии учебного заведения, непосредственная близость к магистрали. / Alleys in the university arboretum, immediate proximity to a highway	Очень высокий / Very High
5	Лесопарк «Оптимистов» / "Optimistov" Forest Park	Крупный лесной массив на междуречье, умеренная рекреация. / Large forest tract on an interfluve, moderate recreation	Низкий / Low
6	Ботанический сад ВГУ (ООПТ) / VSU Botanical Garden (Specially Protected Natural Area)	Охраняемая территория (памятник природы), закрытый режим посещения. / Protected area (natural monument), restricted access	Низкий / Low
7	Парк «Олимпик» (в составе заказника) / "Olimpik" Park (within a wildlife preserve)	Пригородный парк в границах ООПТ «Воронежская нагорная дубрава». / Suburban park within the boundaries of the "Voronezh Upland Oak Forest" preserve	Низкий / Low
8	Кольцовский сквер (исторический центр) / Koltsovsky Square (historic center)	Компактный сквер в деловом центре, окруженный плотной застройкой и дорогами. / Compact square in the business center, surrounded by dense development and roads	Очень высокий / Very High
*Уровень нагрузки оценен интегрально по критериям: загазованность, шум, рекреационная динамика, степень преобразования почвенного покрова. / *The load level was assessed integrally based on criteria: air pollution, noise, recreational dynamics, degree of soil cover transformation			

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

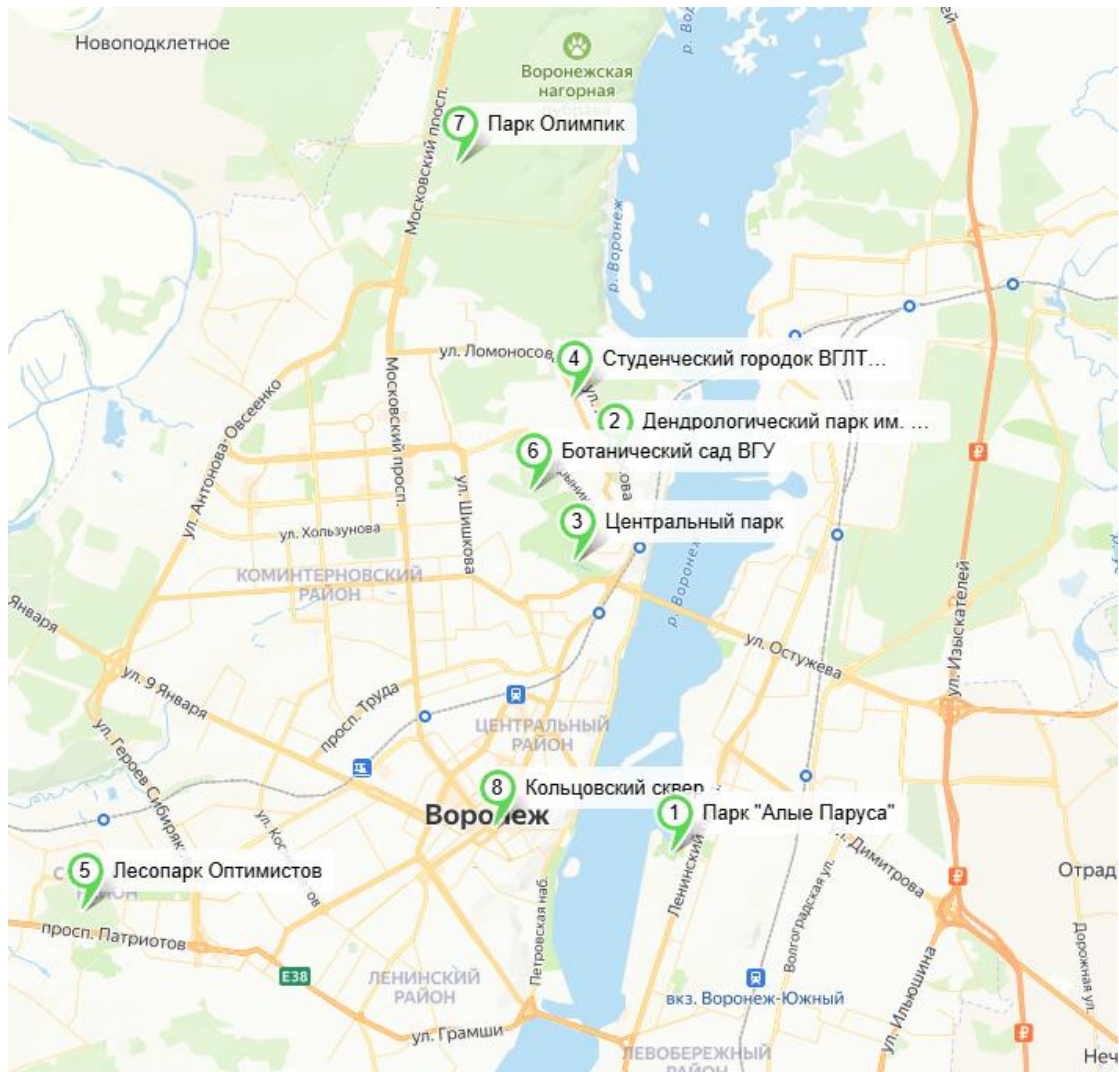


Рис. 1. Расположение фенологических площадок на территории г. Воронежа

Fig. 1. The location of phenological sites on the territory of Voronezh

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

4. Статистический анализ

В целях установления количественных зависимостей между параметрами температурного режима и сроками наступления фенологических фаз был применен корреляционный анализ посредством расчета коэффициента линейной корреляции Пирсона (r). Анализ проводился отдельно для каждой исследуемой древесной породы и каждой фенофазы. В качестве сопоставляемых переменных использовались преобразованные в числовой непрерывный формат усредненные

календарные даты наступления фенофаз (например, порядковый номер дня в году) и совокупность рассчитанных температурных показателей (среднесезонные, среднемесячные, среднедекадные значения) за соответствующий год наблюдений. Интерпретация силы выявленных корреляционных связей осуществлялась на основе общепринятой градации: значения $|r| < 0.3$ рассматривались как слабая связь, $0.3 \leq |r| < 0.7$ – как умеренная, а $|r| \geq 0.7$ – как сильная. Отрицательный знак коэффициента свидетельствовал об обратной

зависимости, то есть о смещении даты наступления фенофазы на более ранний срок при повышении температуры. Для наглядного представления результатов была построена матричная тепловая карта (heatmap), где цветовая интенсивность ячейки соответствовала величине коэффициента корреляции. Все статистические вычисления и графические построения выполнены с использованием программного пакета PAST 4.03 и Microsoft Excel 365.

Результаты

Полученные данные демонстрируют комплексное взаимодействие между климатическим фактором и биологическим ответом экосистемы. Установленные температурные тренды весеннего сезона служат основой для интерпретации наблюдаемых фенологических сдвигов. Последующий корреляционный анализ позволил перейти от констатации фенологических изменений к количественной оценке силы и специфики влияния различных временных срезов термического режима. Интеграция этих трех аспектов — климатического, фенологического и статистического — формирует целостную картину реакции городских древесных насаждений на современные изменения погодно-климатических условий.

3.1. Динамика температурного режима весеннего сезона (2021–2024 гг.) Анализ данных метеостанции за четырехлетний период выявил неоднородную динамику температур весенних месяцев в г. Воронеже (табл. 1). Наблюдался общий тренд к потеплению среднесезонной температуры весны: с $+6.2^{\circ}\text{C}$ в 2022 г. до $+9.8^{\circ}\text{C}$ в 2024 г. Март характеризовался наибольшей межгодовой изменчивостью: среднемесячная температура

варьировала от -2.7°C (2022 г.) до $+2.7^{\circ}\text{C}$ (2023 г.). Ключевой особенностью стала аномально теплая третья декада марта, средняя температура которой устойчиво повышалась, достигнув в 2024 г. значения $+6.2^{\circ}\text{C}$. Для апреля был зафиксирован наиболее выраженный тренд потепления, особенно во второй и третьей декадах, где в 2024 г. температуры превысили $+15^{\circ}\text{C}$. Температурный режим мая отличался большей стабильностью, однако во вторую декаду мая отмечалось устойчивое похолодание, что увеличивало климатические риски для вегетирующих растений.

3.2. За период наблюдений у обеих исследуемых пород зафиксирована устойчивая тенденция к смещению сроков наступления весенних фенофаз на более ранние даты. Реакция видов имела выраженную специфичность.

У березы повислой (*Betula pendula* Roth.) начало распускания листьев сместилось в среднем на 13 дней: с 22 апреля в 2021 г. до 9 апреля в 2024 г. Начало цветения демонстрировало еще более значительный сдвиг – в среднем на 14 дней, с 23 апреля (2021 г.) на 9 апреля (2024 г.). Смещение фаз было синхронным на всех площадках, что указывает на доминирующую роль регионального климатического фактора над локальными условиями.

У липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) динамика была менее линейной, но общий тренд к ускорению также проявился. Распускание листьев сместилось на 17 дней – с первой декады мая в 2021 г. на вторую декаду апреля в 2024 г. Сроки начала цветения показали зависимость от температурного фона сезона: в холодном 2022 г. фаза наступила 24 июня, тогда как в аномально теплом 2024 г. – 13 июня, что составило смещение на 7 дней относительно 2021 г. (18 июня).

Динамика температурных показателей весеннего сезона (г. Воронеж, 2021–2024 гг.)

Table 1

Dynamics of spring season temperature indicators (Voronezh, 2021–2024)

Показатель / Год / Indicator / Year	2021	2022	2023	2024
Среднее за сезон, °C / Season average, °C	+8.2	+6.2	+9.4	+9.8
Март, °C / March, °C	-0.5	-2.7	+2.7	+1.2
1 декада / 1st decade	-1.7	-2.7	+0.5	-2.7
2 декада / 2nd decade	-2.5	-6.2	+2.4	-0.4
3 декада / 3rd decade	+2.6	+3.1	+7.7	+6.2
Апрель, °C / April, °C	+8.9	+10.2	+9.8	+14.6
1 декада / 1st decade	+6.6	+7.7	+9.2	+13.9
2 декада / 2nd decade	+11.6	+11.6	+9.01	+15.1
3 декада / 3rd decade	+8.6	+11.1	+11.4	+14.7
Май, °C / May, °C	+16.2	+11.8	+14.8	+14.0
1 декада / 1st decade	+12.9	+10.1	+10.2	+10.9
2 декада / 2nd decade	+17.5	+12.3	+16.1	+11.2
3 декада / 3rd decade	+17.9	+13.0	+17.7	+19.3

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Выявленные температурные тренды напрямую определили фенологическую реакцию исследуемых древесных пород.

Для количественной оценки силы влияния выявленных температурных трендов на зафиксированные фенологические сдвиги был проведен корреляционный анализ.

3.3. Корреляционный анализ связи температурных параметров и сроков наступления фенофаз.

Результаты корреляционного анализа выявили статистически значимые связи между температурным режимом и фенологическими датами. Для всех исследуемых фенофаз коэффициенты корреляции с температурными показателями имели отрицательный знак, подтверждая гипотезу о более раннем наступлении фаз при повышении температуры.

1. Связь со среднесезонной температурой весны

Наиболее сильная отрицательная корреляция установлена для начала цветения: $r = -0.77$ у березы и $r = -0.83$ у липы. Связь сроков распускания листьев с сезонной температурой была умеренной ($r = -0.63$ и $r = -0.70$ соответственно).

2. Помесячный и декадный анализ. Анализ выявил, что ключевым месяцем, определяющим фенологический «график» обоих видов, является апрель. Корреляция с его среднемесячной температурой достигала значений от -0.79 до -0.97 . Детализация по декадам показала, что:

- Для березы *повислой* критически важны температуры третьей декады марта (r до -0.84) и первой и третьей декад апреля (r от -0.91 до -0.95).
- Для липы *мелколистной* решающее влияние оказывают температуры первой декады апреля на распускание листьев ($r = -0.99$) и третьей декады мая на начало цветения ($r = -0.87$) (табл.2, рис.2).

3. Интерпретация по шкале силы связи. В соответствии с принятой градацией, выявлены преимущественно сильные ($|r| \geq 0.7$) корреляции для фаз цветения и распускания листьев березы, а также распускания листьев липы с температурой апреля. Умеренные связи ($0.3 \leq |r| < 0.7$) характерны для зависимости фенофаз от температуры марта в целом.

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона (фрагмент ключевых связей)

Table 2

Pearson correlation coefficient matrix (fragment of key relationships)

Фенофаза / Температурный показатель / Phenophase / Temperature indicator	Весна (сред.) / Spring (avg.)	Март (3 дек.) / March (3rd dec.)	Апрель (1 дек.) / April (1st dec.)	Апрель (сред.) / April (avg.)	Май (3 дек.) / May (3rd dec.)
Береза: Начало цветения / Birch: Flowering onset	-0.77	-0.84	-0.95	-0.84	-0.58
Береза: Распускание листьев / Birch: Leaf unfolding	-0.63	-0.84	-0.92	-0.82	-0.39
Липа: Начало цветения / Lime: Flowering onset	-0.83	-0.44	-0.83	-0.79	-0.87
Липа: Распускание листьев / Lime: Leaf unfolding	-0.70	-0.59	-0.99	-0.97	-0.61

Примечание: Полужирным выделены сильные корреляционные связи ($|r| \geq 0.7$) / Note: Strong correlation relationships ($|r| \geq 0.7$) are highlighted in bold.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

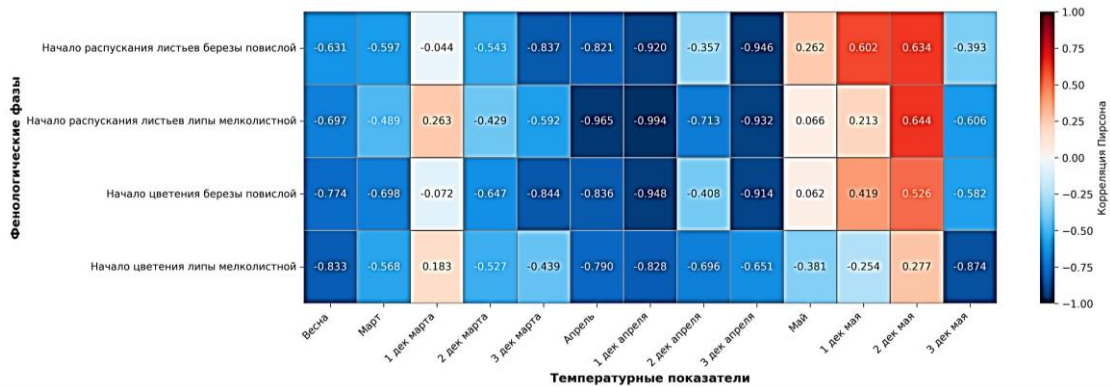


Рис. 2. Тепловая карта корреляций между температурными параметрами весеннего сезона и сроками наступления фенофаз у *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.

Fig. 2. Heat map of correlations between the temperature parameters of the spring season and the timing of the onset of phenophases in *Betula pendula* Roth. and *Tilia cordata* Mill.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таким образом, результаты подтвердили, что динамика температур весеннего сезона, особенно в критические внутримесячные периоды, является основным драйвером смещения фенологических ритмов у изучаемых древесных пород в условиях урбоэкосистемы.

Выявленная видоспецифичность отклика указывает на различную фенологическую пластичность березы повислой и липы мелколистной.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. На протяжении 2021–2024 гг. на территории г. Воронежа зафиксирован устойчивый тренд к потеплению весеннего сезона, характеризующийся значительной внутрисезонной неоднородностью. Ключевыми особенностями являются выраженное потепление третьей декады марта, аномально высокие температуры апреля и тенденция к похолоданию во второй декаде мая, что создает специфический и потенциально стрессовый режим для начала вегетации растений.
2. У исследуемых видов (*Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.) выявлена устойчивая тенденция к смещению сроков наступления весенних фенофаз (распускание листьев и начало цветения) на более ранние даты. Береза повислая проявила большую чувствительность, продемонстрировав сдвиг фаз на 13–14 дней, в то время как реакция липы мелколистной (сдвиг на 7–17 дней) в большей степени модулировалась общим температурным фоном сезона. Синхронность сдвигов на площадках с разным уровнем антропогенной нагрузки подтверждает доминирующую роль регионального климатического сигнала над локальными условиями в регулировании сроков наступления изученных фенофаз.
3. Корреляционный анализ статистически подтвердил сильную обратную связь между температурными показателями и датами наступления фенофаз. Установлена критическая значимость конкретных внутрисезонных периодов: для березы повислой решающими являются температуры третьей декады марта и первой–третьей декад апреля ($|r| = 0.82–0.95$), а для липы мелколистной — первой декады апреля для распускания листьев ($|r|$

$= -0.99$) и третьей декады мая для начала цветения ($|r| = -0.87$). Это свидетельствует о различной стратегии фенологического ответа на теплообеспеченность: береза реагирует на раннее весеннее тепло, активируя вегетацию, тогда как липа, будучи более поздней породой, интегрирует температурную информацию на протяжении всей весны для инициации цветения.

Научно-практическая значимость

Результаты работы обосновывают использование фенологического мониторинга березы повислой и липы мелколистной в качестве эффективного инструмента биоиндикации весеннего потепления в условиях урбоэкосистем. Выявленная видоспецифичность реакций должна учитываться при разработке адаптационных стратегий городского озеленения:

- Для прогноза и мониторинга: Наблюдения за фенофазой «распускание листьев» у березы могут служить ранним индикатором наступления фенологической весны и оценки рисков повреждения поздневесенними заморозками.
- Для подбора ассортимента: При проектировании устойчивых зеленых насаждений в условиях меняющегося климата необходимо учитывать различную фенологическую пластичность пород. Высокая чувствительность березы делает ее уязвимой к резким температурным колебаниям, в то время как липа, с ее более «консервативной» и протяженной реакцией на тепло, может проявлять большую устойчивость.
- Для лесовосстановления: Полученные данные о температурных порогах и критических периодах могут быть использованы для моделирования фенологических событий и оценки потенциальных изменений в сезонном развитии лесных экосистем региона.

Таким образом, работа вносит вклад в понимание механизмов фенологического отклика древесных растений на изменение термического режима в специфических условиях городской среды. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение отдаленных последствий фенологических сдвигов (влияние на

репродуктивный успех, устойчивость к патогенам) и на интеграцию фенологических моделей с прогнозами климатических сценариев для территории Центрального Черноземья.

Заключение

Результаты настоящего исследования выявили статистически значимые и видоспецифические закономерности реакции фенологических ритмов древесных пород на динамику весенних температур в условиях урбоэкосистемы. Установлено, что смещение сроков наступления фенофаз у *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. носит нелинейный характер и определяется не общим трендом потепления, а изменением термического режима в строго определенные внутрисезонные периоды (декады). Верифицирована гипотеза о ведущей роли температур апреля как ключевого регулятора фенологического «графика» для обеих пород, при этом для березы повислой критически значимым является также прогрев в третьей декаде марта, а для липы мелколистной — термические условия третьей декады мая.

Апробированный методологический подход, сочетающий высокоразрешенный (декадный) климатический анализ с полевым фенологическим мониторингом на трансекте антропогенной нагрузки, доказал свою эффективность для количественной оценки и прогнозирования биологических откликов на климатические изменения в гетерогенной городской среде. Выявленные сильные корреляционные зависимости ($|r| \geq 0.7$) между конкретными температурными параметрами и датами наступления фенофаз позволяют

рассматривать фенологию модельных пород в качестве оперативного диагностического инструмента для системы мониторинга состояния городских насаждений и оценки климатических рисков.

С практической точки зрения, полученные данные формируют основу для разработки адаптационных мер в сфере городского озеленения и лесовосстановления. Учет различной фенологической пластичности пород, подтвержденный результатами работы, необходим для научно обоснованного подбора ассортимента, создания устойчивых дендрокомпозиций и минимизации ущерба от поздневесенних заморозков. В частности, высокая чувствительность березы повислой к ранневесеннему потеплению делает ее удобным индикаторным видом, но требует осторожности при использовании в зонах с высоким риском возвратных холодов.

В перспективе целесообразно расширение временного ряда наблюдений для усиления репрезентативности моделей, а также интеграция полученных региональных зависимостей в общегосударственные базы фенологических данных и климатические сценарии. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение сопряженности выявленных фенологических сдвигов с физиологическим статусом растений, их продуктивностью и устойчивостью к биотическим стрессам в условиях продолжающихся климатических изменений.

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2023. – URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
2. Menzel A., Yuan Y., Matiu M., Sparks T., Scheifinger H., Gehrig R., Estrella N. Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*. 2020; 26 (4): 2599-2612. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>.
3. Zhao L., Dai J., Tang Q., Zhang H. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982–2016). *Scientific Reports*. 2021; 11: 17746. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97331-2>.
4. Vitasse Y., Baumgarten F., Zohner C.M., Fu Y.H., Walde J., Frei E.R., Wohlgemuth T. The great acceleration of plant phenological shifts. *Nature Climate Change*. 2022; 12: 300–304. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01283-y>.

5. Piao S., Liu Q., Chen A., Janssens I.A., Fu Y., Dai J., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*. 2022; 28 (6): 1922-1940. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16057>.
6. Richardson A.D., Hufkens K., Milliman T. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 331: 109315. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109315>.
7. Guesmi B. Climate as the Major Factor Controlling Phenology. *Agrometeorology*. IntechOpen, 2021. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95893>.
8. Meng L., Mao J., Zhou Y., Richardson A.D., Lee X., Thornton P.E., Ricciuto D.M., Li X. Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (8): 4228-4233. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1911117117>.
9. Meng L., Zhou Y., Li X., Asrar G.R., Mao J., Wanamaker A.D., Wang Y. Divergent responses of spring phenology to daytime and nighttime warming. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020; 281: 107832. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107832>.
10. Чичагов В.П., Полякова А.В. Реакция фенологии древесных растений на изменение климата в условиях средней полосы России. *Лесоведение*. – 2021. – № 5. – С. 502–515.
11. Серебряков О.В., Яковенко Н.В. Влияние современных климатических тенденций на фенологию древесных пород: последствия для устойчивого лесовосстановления в Центральном Черноземье. *Научно-агрономический журнал*. – 2025. – № 4 (131). – С. 5-17. – DOI: <https://doi.org/10.34736/FNC.2025.131.4.001>.
12. Емельянова О.Ю., Цой М.Ф., Масалова Л.И. Фенологические наблюдения как основа формирования базы данных феноспектров древесных растений. *Овощи России*. – 2020. – № 6. – С. 77-84. – DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-6-77-84>.
13. Li Y., Qin Y., Ma L., Pan Z. Climate change: vegetation and phenological phase dynamics. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2020; 12 (4): 495–509. – DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2019-0037>.
14. Yu H., Mo Z., Tan T., Li X., Wang Y., Zhang Y., Wu C. Earlier spring onset and autumn warming increase the discrepancy between leaf coloration and photosynthetic cessation. *Communications Earth & Environment*. 2026; 7: 12. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03239-y>.
15. Liu Q., Fu Y.H., Zhu Z., Liu Y., Liu Z., Huang M., Janssens I.A., Piao S. Species-specific responses of spring phenology to climate change in a temperate forest. *Ecological Indicators*. 2020; 117: 106704. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106704>.
16. Van der Meersch V., Wolkovich E.M. Summer solstice optimizes the thermal growing season. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2025; 122 (23): e2506796122. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2506796122>.
17. Meyer B.F., Buras A., Gregor K., Layritz L.S., Principe A., Kreyling J., Rammig A., Zang C.S. Frost matters: incorporating late-spring frost into a dynamic vegetation model regulates regional productivity dynamics in European beech forests. *Biogeosciences*. 2024; 21: 1355–1370. – DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-1355-2024>.
18. Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Сезонная изменчивость листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения окружающей среды (Уфимский промышленный центр, Республика Башкортостан). *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2025. – Т. 29. – № 3. – С. 65–91. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-3-65-91>.
19. Жуйкова Т.В., Мелинг Э.В., Попова А.С. Групповая изменчивость морфологических признаков листа *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) в градиентах погодных условий и техногенной трансформации почв. *Поволжский экологический журнал*. – 2023. – № 1. – С. 37–57. – DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-37-57>.
20. Минин А.А., Буйволов Ю.А., Самохина О.Ф., Бардин М.Ю., Демидов В.Э., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Рыжков О.В., Сапельникова И.И., Фомин Б.Н., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. Фенологические тренды в природе России: насколько они следуют за

изменениями климата? *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2024. – Т. 10. – № 3. – С. 378-398. – DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-3-378-398>.

21. Delgado M., Roslin T., Tikhonov G., Ovaskainen O., Soininen J., Vierola A., Ilmonen J., Paasivirta L., Roininen H., Ayres M., Bäessler C., Forshage M., Fritze M., Halme P., Heikkala O., Hunter M., Kähkönen K., Kakko M., Komonen A., Koricheva J., Kouki J., Lanta V., Liira J., Lundell J., M. Müller J., Nyman T., Pöyry J., Schmidt N.M., Stone D., Tiisanen M., Várkonyi G., Villforth L., Vrezec A., Yakovlev R., Zverev V. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (49): 31249–31258. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2002713117>.
22. Минин А.А., Ананин А.А., Буйолов Ю.А., Ларин Е.Г., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Руденко М.И., Сапельникова И.И., Федотова В.Г., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. – 2020. – Т. 5. – № 4. – С. 89-110. – DOI: <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.060>.

References

1. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, 2023. – URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
2. Menzel A., Yuan Y., Matiu M., Sparks T., Scheifinger H., Gehrig R., Estrella N. Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*. 2020; 26 (4): 2599-2612. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>.
3. Zhao L., Dai J., Tang Q., Zhang H. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982–2016). *Scientific Reports*. 2021; 11: 17746. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97331-2>.
4. Vitasse Y., Baumgarten F., Zohner C.M., Fu Y.H., Walde J., Frei E.R., Wohlgemuth T. The great acceleration of plant phenological shifts. *Nature Climate Change*. 2022; 12: 300–304. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01283-y>.
5. Piao S., Liu Q., Chen A., Janssens I.A., Fu Y., Dai J., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*. 2022; 28 (6): 1922-1940. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16057>.
6. Richardson A.D., Hufkens K., Milliman T. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 331: 109315. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109315>.
7. Guesmi B. Climate as the Major Factor Controlling Phenology. *Agrometeorology*. IntechOpen, 2021. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95893>.
8. Meng L., Mao J., Zhou Y., Richardson A.D., Lee X., Thornton P.E., Ricciuto D.M., Li X. Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (8): 4228-4233. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1911117117>.
9. Meng L., Zhou Y., Li X., Asrar G.R., Mao J., Wanamaker A.D., Wang Y. Divergent responses of spring phenology to daytime and nighttime warming. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020; 281: 107832. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107832>.
10. Chichagov V. P., Polyakova A. V. Reaktsiya fenologii drevesnykh rasteniy na izmenenie klimata v usloviyakh sredney polosy Rossii. [Response of tree plant phenology to climate change in Central Russia]. *Lesovedenie*, 2021; 5: 502–515.
11. Serebryakov O. V., Yakovenko N. V. Vliyanie sovremennykh klimaticheskikh tendentsiy na fenologiyu drevesnykh porod: posledstviya dlya ustoychivogo lesovosstanovleniya v Tsentral'nom Chernozem'e. [Influence of modern climatic trends on tree species phenology: consequences for sustainable reforestation in the Central Chernozem Region]. *Nauchno-agronomicheskiy zhurnal*, 2025; 4 (131): 5-17. – DOI: <https://doi.org/10.34736/FNC.2025.131.4.001>.
12. Emel'yanova O. Yu., Tsoy M. F., Masalova L. I. Fenologicheskie nablyudeniya kak osnova formirovaniya bazy dannykh fenospektrov drevesnykh rasteniy. [Phenological observations as a basis for the formation

- of a database of phenospectra of woody plants]. *Ovoshchi Rossii*, 2020; 6: 77-84. – DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-6-77-84>.
13. Li Y., Qin Y., Ma L., Pan Z. Climate change: vegetation and phenological phase dynamics. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2020; 12 (4): 495–509. – DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2019-0037>.
 14. Yu H., Mo Z., Tan T., Li X., Wang Y., Zhang Y., Wu C. Earlier spring onset and autumn warming increase the discrepancy between leaf coloration and photosynthetic cessation. *Communications Earth & Environment*. 2026; 7: 12. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03239-y>.
 15. Liu Q., Fu Y.H., Zhu Z., Liu Y., Liu Z., Huang M., Janssens I.A., Piao S. Species-specific responses of spring phenology to climate change in a temperate forest. *Ecological Indicators*. 2020; 117: 106704. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106704>.
 16. Van der Meersch V., Wolkovich E.M. Summer solstice optimizes the thermal growing season. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2025; 122 (23): e2506796122. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2506796122>.
 17. Meyer B.F., Buras A., Gregor K., Layritz L.S., Principe A., Kreyling J., Rammig A., Zang C.S. Frost matters: incorporating late-spring frost into a dynamic vegetation model regulates regional productivity dynamics in European beech forests. *Biogeosciences*. 2024; 21: 1355–1370. – DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-1355-2024>.
 18. Tagirova O. V., Kulagin A. Yu. Sezonnaya izmenchivost' list'ev berezy povisloy (*Betula pendula* Roth) v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy (Ufimskiy promyshlennyy tsentr, Respublika Bashkortostan). [Seasonal variability of silver birch (*Betula pendula* Roth) leaves under industrial environmental pollution (Ufa industrial center, Republic of Bashkortostan)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025; 29 (3): 65–91. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-3-65-91>.
 19. Zhuykova T. V., Meling E. V., Popova A. S. Gruppovaya izmenchivost' morfologicheskikh priznakov lista *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) v gradientakh pogodnykh usloviy i tekhnogennoy transformatsii pochv. [Group variability of morphological characteristics of *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) leaf in gradients of weather conditions and technogenic soil transformation]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2023; 1: 37–57. – DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-37-57>.
 20. Minin A. A., Buyvolov Yu. A., Samokhina O. F., Bardin M. Yu., Demidov V. E., Lebedev P. A., Polikarpova N. V., Prokosheva I. V., Ryzhkov O. V., Sapel'nikova I. I., Fomin B. N., Shuyskaya E. A., Yakovleva M. V., Yantser O. V. Fenologicheskie trendy v prirode Rossii: naskol'ko oni sleduyut za izmeneniyami klimata? [Phenological trends in Russian nature: how closely do they follow climate changes?]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2024; 10 (3): 378-398. – DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-3-378-398>.
 21. Delgado M., Roslin T., Tikhonov G., Ovaskainen O., Soininen J., Vierola A., Ilmonen J., Paasivirta L., Roininen H., Ayres M., Bäessler C., Forshage M., Fritze M., Halme P., Heikkala O., Hunter M., Kähkönen K., Kakko M., Komonen A., Koricheva J., Kouki J., Lanta V., Liira J., Lundell J., M. Müller J., Nyman T., Pöyry J., Schmidt N.M., Stone D., Tiusanen M., Várkonyi G., Villforth L., Vrezec A., Yakovlev R., Zverev V. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (49): 31249–31258. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2002713117>.
 22. Minin A. A., Ananin A. A., Buyvolov Yu. A., Larin E. G., Lebedev P. A., Polikarpova N. V., Prokosheva I. V., Rudenko M. I., Sapel'nikova I. I., Fedotova V. G., Shuyskaya E. A., Yakovleva M. V., Yantser O. V. Rekomendatsii po unifikatsii fenologicheskikh nablyudeniy v Rossii. [Recommendations for the unification of phenological observations in Russia]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, 2020; 5 (4): 89-110. – DOI: <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.060>.

Информация об авторах

Серебряков Олег Владимирович – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0009-0006-1171-0368, e-mail: o-ser00@mail.ru.

✉ *Яковенко Наталия Владимировна* – доктор географических наук, главный научный сотрудник дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

Information about the authors

Oleg V. Serebryakov – Postgraduate Student of the Department of Ecology, Forest Protection and Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0009-0006-1171-0368, e-mail: o-ser00@mail.ru.

✉ *Nataliya V. Yakovenko* – Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher at the Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

✉ Для контактов | Corresponding author