

УДК 630*181

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГОРОДСКОГО «ОСТРОВА ТЕПЛА» НА СЕЗОННОЕ РАЗВИТИЕ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ЮГА ПРИМОРЬЯ¹

© 2024 г. А. А. Марченко^а, А. В. Иванов^{б, в, *}

^аПриморская государственная сельскохозяйственная академия, пр-кт Блюхера, д. 44, Уссурийск, 692510 Россия

^бИнститут геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Релочный, д. 1, Благовещенск, 675011 Россия

^вДальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства,
ул. Волочаевская, д. 71, Хабаровск, 680020 Россия

*E-mail aleksandr86@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2024 г.

После доработки 20.04.2024 г.

Принята к публикации 08.07.2024 г.

Показано влияние вариаций температуры, осадков и эффекта городского теплового острова на сезонное развитие древесных растений. Определены сдвиги фенодат у древесных растений, вызванные изменениями температуры и связанные с эффектом городского теплового острова. Синхронные фенологические наблюдения проводились в 2019–2021 гг. в Уссурийском лесничестве и г. Уссурийске (Приморский край). По данным метеостанции Тимирязевский отмечен значимый тренд увеличения среднегодовой температуры в период с 2011 по 2023 гг. с темпом $0.15\text{ }^{\circ}\text{C год}^{-1}$. Сравнение температурного режима в городе и в лесу подтверждает наличие эффекта городского теплового острова. Разница в среднемесячных температурах между городом и лесом колебалась в 2019 г. в интервале $0.2\text{--}2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в 2020 г. — $0.1\text{--}1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура каждого месяца в городе была выше, чем в лесу. Различия в метеорологических показателях леса и города приводят к соответствующему сдвигу в сроках наступления фенофаз у растений. По результатам сравнения фенологического развития 8 видов древесных растений в городе и в лесу установлено, что среднее значение сдвига даты наступления фенологических фаз в городе на более ранние сроки относительно леса составляет 5.2 дня, а у теплолюбивых, южных видов, — 7.7 дня. Различия в суммах эффективных температур для наступления определенной фазы при этом находятся в пределах $1\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Черемуха обыкновенная является лучшим биоиндикатором климатических изменений в условиях Южного Приморья, это вид с наиболее тесной связью суммы эффективных температур и весенних фенологических фаз. С использованием опубликованных данных фенологических наблюдений на исследуемой территории определен средний сдвиг фенодат у растений за 85 лет, который в среднем составил 7 дней. Продолжительность вегетационного периода в Южном Приморье определяется среднегодовой температурой воздуха. Получена линейная зависимость, показывающая, что при увеличении температуры на 1, вегетационный период удлиняется на 4.4 суток, и это в первую очередь связано со смещением начала периода вегетации на более ранние сроки.

Ключевые слова: фенология, городской остров тепла, изменения климата, вегетационные период.

DOI: 10.31857/S0024114824050057 EDN: OXDUIP

¹Работа выполнена при поддержке ВИП ГЗ "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6) и темы ГЗ ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразии и экосистемные функции лесов» (рег. № 124013000750-1).

Изменения климата оказывают влияние на структуры и процессы биосферы. Фенологические сдвиги — смещения сроков сезонного развития растений — являются доступными и надежными индикаторами отклика растений на глобальные изменения климата (Walther et al., 2002). В частности, реакция растительности на современное потепление заключается в более раннем наступлении

весенних фенологических фаз и запаздывании осенних (Menzel et al., 2020; Rosbakh et al., 2021; Сандалов и др., 2022).

В связи с возросшим интересом к проблеме глобального изменения климата работы в области фенологии растений получили новый импульс к развитию (Парилова и др., 2006; Семенов и др., 2006; Gaira et al., 2014; Garamszegi, Kern, 2014; Каменева и др., 2018). Сезонное развитие растений рассматривается как надежный биоиндикатор изменения климата и погодных вариаций (Gordo, Sanz, 2010; Каменева и др., 2018). Весенние фенологические события более чувствительны к состоянию атмосферы, чем осенние, поэтому претерпевают наибольшие изменения (Gordo, Sanz, 2010; Каменева и др., 2018).

Температура – основной движитель многих процессов роста и развития у растений. Чаще всего более высокая температура ускоряет развитие растений и приводит к довольно раннему переходу их к следующей стадии онтогенеза. Растения чутко реагируют на сезонность внешней среды, в которой находятся, и сдвиги в сроках деятельности растений дают наиболее очевидные свидетельства того, что виды и экосистемы испытывают влияние глобальных внешних изменений. Сдвиги фенологического развития наблюдаются в разных масштабах – от более раннего цветения отдельных особей и популяций до более раннего позеленения земной поверхности, наблюдаемого из космоса (Badeck et al., 2004).

На локальном уровне изменения дат наступления и продолжительности фенофаз у растений отражаются на всех сторонах жизнедеятельности человека – от сельскохозяйственного землепользования и животноводства до рекреации (Янцер, 2015). В масштабах планеты эти изменения приводят к увеличению первичной продукции экосистем суши, которое наиболее сильно проявляется в Северном полушарии (Dang et al., 2023).

В процессе урбанизации возникает эффект городского теплового острова (UHI, urban heat island), связанный с более высокими температурами в городах на фоне загородных территорий. Эффект возникает в связи с заменой естественного грунтового покрытия непроницаемыми материалами, такими как бетон, асфальт и металл, имеющими специфические тепловые свойства (Walker et al., 2015; Jochner, Menzel, 2015). Города, характеризующиеся наличием городского острова тепла и повышенной концентрацией CO₂, часто используются в качестве природных лабораторий для понимания реакций растительности на глобальные изменения климата (Zhou et al., 2016; Yang, Zhao, 2023). «Поскольку параметры окружающей среды в городах на десятилетия опережают прогнозируемые средние мировые показатели, городские районы

являются идеальными местами для изучения реакции растительности на будущее изменение климата» (Ruan et al., 2019).

Взаимодействие растительности с городской средой, особенности фенологического развития растений в городе на фоне загородных территорий остаются окончательно не изученными ввиду сложности и многофакторности взаимосвязей (Wang et al., 2022). Для всестороннего понимания причин конкретных фенологических событий у древесных растений (включая различия между естественными экосистемами и урбозкосистемами) необходимо учитывать специфику конкретных видов, географическое положение, особенности климата определенного сезона, интенсивность урбанизации, концентрацию CO₂, накопление азота и др.

Цель настоящей работы – установить сдвиги наступления фенологических фаз у древесных растений, вызванные изменениями показателей погоды и климата и связанные с эффектом городского теплового острова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Наблюдения за деревьями проводились в Уссурийском лесничестве на территории лесного участка Приморского государственного аграрно-технологического университета (ПГАТУ) и в условиях г. Уссурийска (Приморский край). Климат района муссонный, характеризуется, по данным метеостанции Тимирязевский (N 43.8568, E 131.9539), следующими показателями (за 2023 г.): среднегодовой температурой – 5.96 ± 0.27 °C, средней температурой января – -17.37 ± 0.35 °C, июля – 21.42 ± 0.21 °C, суммой осадков – 1096 мм, безморозный периодом (с температурой воздуха >0 °C) – 228 дней. Лето теплое и влажное, первые заморозки наступают в начале октября, а морозная погода устанавливается в ноябре. Зимы холодные, снежный покров обычно незначительный. Минимальные температуры преобладают во второй половине декабря и первой половине января. Леса в районе исследования смешанные хвойно-широколиственные и широколиственные (Ivanov et al., 2022).

На участке ПГАТУ (лес) и в Уссурийске (город) для наблюдений были выбраны модельные деревья восьми видов (табл. 1). В городе дополнительно наблюдали еще за шестью видами (Марченко, Иванов, 2021). Деревья отбирали хорошего роста, с равномерно развитой кроной, не имеющие признаков ослабления и повреждения. В лесном насаждении выбирали деревья, произрастающие в наиболее освещенных условиях с низко опущенной кроной; участок наблюдений располагался на выровненной террасе в 200 м от р. Комаровки, в окрестностях лесного питомника ПГАТУ. На каждом дереве в нижней части кроны выбирали модельную ветвь, которую маркировали лентой или

(для высоко расположенных ветвей) отмечали на фото. Наблюдения в лесу и в городе выполняли синхронно (в один день) с частотой один раз в 3 дня в весеннее время и один раз в 7–10 дней летом и осенью. Для объективного определения фенофаз модельные ветви фотографировали. У вегетативных органов (почки, листья, побеги) фиксировали следующие фенологические фазы: зимний покой, сокодвижение, набухание почек, раскрытие почек, развитие листьев, интенсивный рост побега, одревеснение побега – у генеративных определяли набухание почек, цветение, образование плодов, созревание плодов, опадение плодов (Елагин, 1975; Булыгин, 1979). Одновременные наблюдения в лесу и в городе проводили в 2019–2021 гг. Наблюдения в городских условиях продолжались с 2013 до 2021 гг.

Для характеристики климата г. Уссурийска использовали метеоданные станции Тимирязевский, расположенной в 7 км от центра города. Данные по температуре воздуха на лесном участке регистрировали температурным логгером, который непрерывно записывал их с частотой одно измерение в 4 часа. Регистратор был установлен на высоте 1.5 м от поверхности почвы на открытом месте под сомкнутыми кронами древостоя. Для характеристики сезонных событий дополнительно использовали показатель суммы эффективных температур, вычисляемый на каждую дату как кумулятивная сумма среднесуточных температур воздуха, начиная с момента устойчивого перехода температуры через 0 °С.

Для сравнения температур между городом и лесом дополнительно использовался ГИС-продукт CHELSA – набор растровых изображений со значениями усредненных среднемесячных температур земной поверхности за период 1979 – 2013 гг. и пространственным разрешением 1 км на пиксель⁻¹.

Продолжительность вегетационного периода в лесном массиве дополнительно оценивали по архивам космических снимков Landsat и Sentinel на ресурсе sentinel-hub.com/explore/eobrowser. Начало и окончание периода вегетации определяли в визуальных каналах по массовой смене цвета пикселей с бурого на салатный (развертывание листьев весной) и наоборот (осенью).

Обработку и графическое представление данных выполняли в MS Excel и R-Studio.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика среднегодовой температуры. Данные по температуре воздуха метеостанции Тимирязевский представляют собой непрерывный ряд с частотой 8 значений в сутки за период 2011–2023 гг. За этот период получены среднегодовые значения температуры воздуха (рис. 1), которые образуют

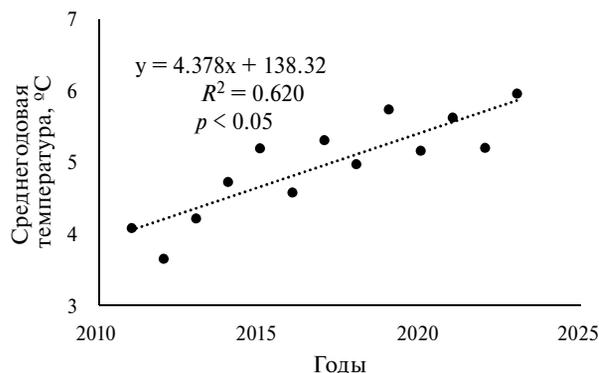


Рис. 1. Тренд увеличения среднегодовой температуры воздуха за период 2011–2023 гг. (по данным метеостанции Тимирязевский (R^2 – коэффициент детерминации, p – уровень значимости)).

значимый тренд роста: среднегодовая температура воздуха в Уссурийском городском округе за 12 лет увеличивалась с темпом 0.15 °С в год (рис. 1). Различия между годами в сумме температур на конец лета доходят до 200 °С.

Закономерностей в распределении суммы осадков по годам не прослеживается. В целом по сравнению с другими регионами Дальнего Востока Приморский край является наиболее влагообеспеченным регионом: сумма осадков в Уссурийском городском округе колеблется в пределах 500–1100 мм/год со средним значением 774 мм/год.

Влияние городского острова тепла на фенологическое развитие деревьев. Различия в среднемесячных температурах между городом и лесом (по данным непосредственных измерений) колебались в 2019 г. от 0.2 в декабре до 2.5 °С в сентябре. В 2020 г. различия составляли 0.1–1.9 °С, при этом разница в среднесуточных температурах за отдельные даты доходила до 5 °С. В январе и феврале 2020 г., в отличие от других месяцев 2019–2020 гг., в городе было холоднее, чем в лесу. Это, вероятно, связано с расположением Уссурийска на равнине и свободным проникновением сюда холодных воздушных масс зимой по Приханкайской низменности. Для Москвы (крупнейший остров тепла России) и Московской области различия в температурах июня и июля составляли в 2021 г. 3 и 2 °С соответственно.

На рис. 2 представлены диаграммы размаха среднесуточных температур по месяцам 2019 (А) и 2020 (Б) гг. для двух точек наблюдений (город и лес). В целом температура каждого месяца в городе выше, чем в лесу (за исключением января и февраля 2020 г.), что наглядно иллюстрирует эффект городского острова тепла для Уссурийска. Сумма эффективных температур на конец лета между городом и лесом в 2019 г. различалась на 255 °С.

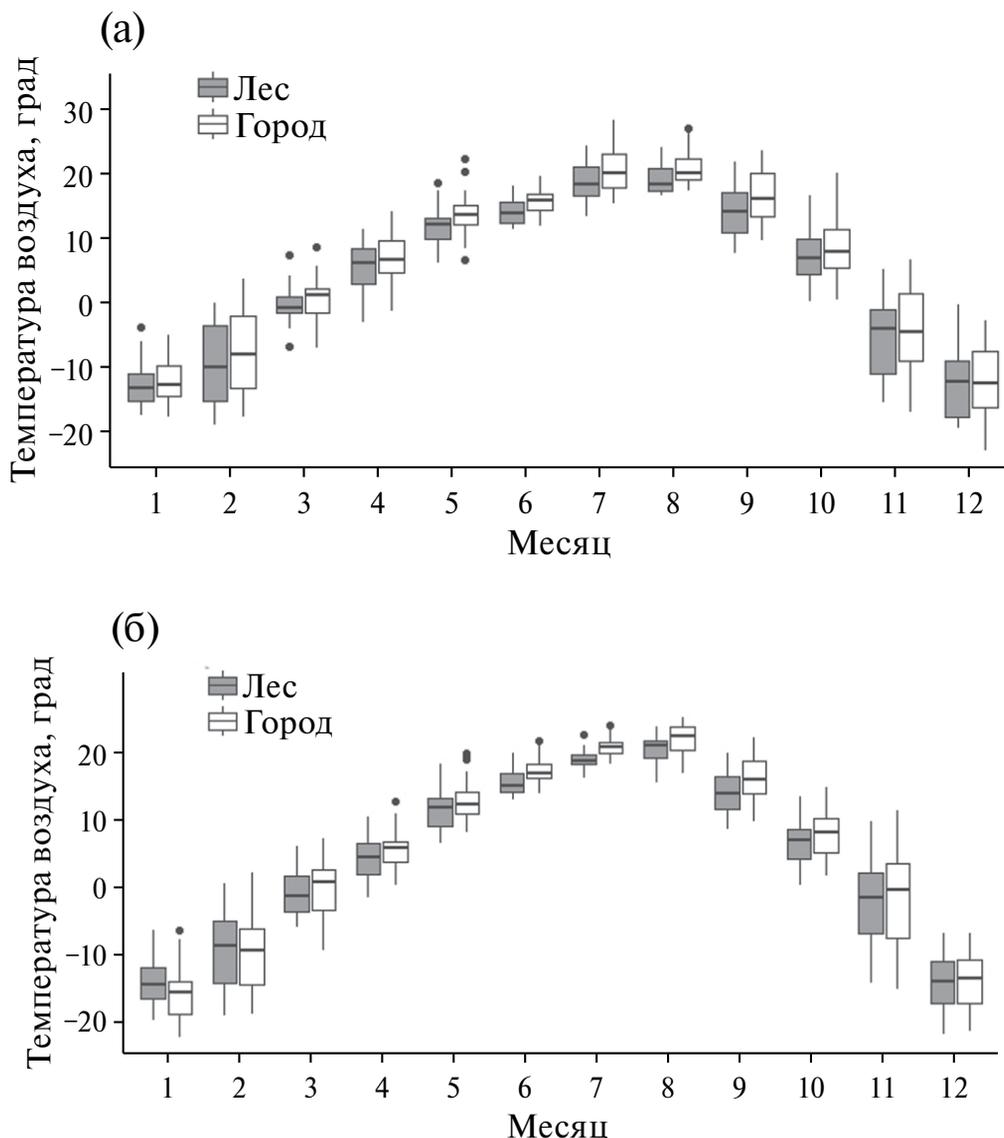


Рис. 2. Диаграммы размаха месячных температур в городе и в лесу в 2019 (А) и 2020 (Б) гг. Прямоугольники показывают диапазон от 25-го до 75-го процента данных, черные горизонтальные линии внутри — медианы, планки составляют 1.5 межквартильного размаха, точками обозначены «выбросы».

Для дополнительного сравнения температур в городе и в лесу использовали дистанционные данные климатического проекта CHELSA (Climatologies..., 2024). Был создан векторный слой из двух полигонов — г. Уссурийска и лесного массива вокруг с. Каменушка. На 12 растровых слоях, соответствующих 12 месяцам, для этих полигонов рассчитали средние значения температуры по всем пикселям (размер 1×1 км), попавшим в полигоны. За период 1979–2013 гг. по всем месяцам, за исключением ноября, различия составили 0.19 – 1.16 °С, в ноябре лесной массив был в среднем холоднее на 3.68 °С. Температурный контраст между г. Уссурийском и окружающим его лесным массивом за период 2011–2023 гг. оказался существенно сильнее,

чем за период 1979–2013 гг. Такое положение подтверждается найденными для всей территории России трендами потепления, которые усиливаются в XXI в. (Третий оценочный доклад ..., 2022).

Различия в температурном режиме между городом и лесом приводят к соответствующему сдвигу в сроках наступления фенологических фаз у растений. Для сезонов 2019–2021 гг. зафиксированы сроки наступления весенних фенофаз и сумм эффективных температур, необходимые для восьми видов. В табл. 1 приведены фенодаты, величина сдвига (разница между датами наступления одной фенофазы в городе и в лесу) и разница в суммах эффективных температур, рассчитанных для каждого фенологического события.

Таблица 1. Сравнительная характеристика фенологического развития восьми видов деревьев в лесу и в городских условиях

| ФАЗА | Город | Лес | Сдвиг, сут. | $\Delta\Sigma t_{эф}$, °C | Город | Лес | Сдвиг, сут. | $\Delta\Sigma t_{эф}$, °C | Город | Лес | Сдвиг, сут. | $\Delta\Sigma t_{эф}$, °C |
|------------------------------|---------|---------|----------------|-------------------------------|---------|---------|----------------|-------------------------------|---------|---------|----------------|-------------------------------|
| | 2019 | | | | 2020 | | | | 2021 | | | |
| Ильм мелколистный | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 19 апр. | 26 апр. | 7 | 32.9 | 28 апр. | 27 апр. | -1 | -64.2 | 22 апр. | 23 апр. | 1 | -34.3 |
| 2 | 28 апр. | 1 май | 3 | -18.3 | 30 апр. | 1 май | 1 | -49.2 | 24 апр. | 25 апр. | 1 | -58.0 |
| 3 | 1 май | 3 май | 2 | -30.9 | 3 май | 4 май | 1 | -56.4 | 26 апр. | 28 апр. | 2 | -52.0 |
| 4 | 5 май | 8 май | 3 | -29.8 | 14 май | 16 май | 2 | -52.4 | 10 май | 12 май | 2 | -51.8 |
| Лиственница Каяндера | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8 апр. | 14 апр. | 6 | 7.5 | 25 апр. | 24 апр. | -1 | -54.8 | 13 апр. | 16 апр. | 3 | -17.4 |
| 2 | 13 апр. | 19 апр. | 6 | 17.9 | 27 апр. | 28 апр. | 1 | -48.0 | 15 апр. | 19 апр. | 4 | -6.8 |
| 3 | 25 апр. | 26 апр. | 1 | -31.6 | 30 апр. | 30 апр. | 0 | -62.1 | 17 апр. | 22 апр. | 5 | 5.5 |
| 4 | 5 июнь | 15 июнь | 10 | 32.9 | 5 июнь | 14 июнь | 9 | 38.6 | 10 июнь | 16 июнь | 6 | -21.06 |
| Аралия высокая | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 15 апр. | 26 апр. | 7 | 64.8 | 26 апр. | 3 май | 7 | 18.1 | 18 апр. | 22 апр. | 4 | -1.7 |
| 2 | 24 апр. | 5 мая | 11 | 65.6 | 30 апр. | 8 май | 8 | 31.0 | 21 апр. | 26 апр. | 5 | -7.6 |
| 3 | 30 апр. | 10 май | 10 | 51.5 | 2 май | 12 май | 10 | 47.2 | 24 апр. | 8 май | 14 | 78.1 |
| 4 | 7 май | 15 май | 8 | 33.2 | 9 май | 20 май | 11 | 48.4 | 5 май | 15 май | 10 | 39.1 |
| Маакия амурская | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 30 апр. | 10 май | 10 | 51.5 | 2 май | 10 май | 8 | 24.3 | 3 май | 10 май | 7 | 8.0 |
| 2 | 4 май | 15 май | 11 | 64.7 | 8 май | 13 май | 5 | -12.3 | 6 май | 12 май | 6 | -9.5 |
| 3 | 9 май | 20 май | 11 | 79.7 | 11 май | 15 май | 4 | -26.9 | 11 май | 16 май | 5 | -14.4 |
| 4 | 18 май | 25 май | 7 | 33.9 | 20 май | 22 май | 2 | -67.9 | 20 май | 21 май | 1 | -68.2 |
| Виноград амурский | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 30 апр. | | | | 2 май | 8 май | 6 | -0.7 | 1 май | 8 май | 7 | 14.2 |
| 4 | 18 май | | | | 22 май | 26 май | 4 | 44.16 | 20 май | 22 май | -2 | -50.4 |
| Береза плосколистная | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 16 апр. | 26 апр. | 10 | 46.6 | 27 апр. | 30 апр. | 3 | -29.6 | 20 апр. | 23 апр. | 3 | -11.3 |
| 2 | 22 апр. | 2 май | 10 | 41.9 | 1 май | 3 май | 2 | -33.1 | 24 апр. | 27 апр. | 3 | -24.8 |
| 3 | 28 апр. | 7 май | 9 | 36.2 | 4 май | 6 май | 2 | -45.4 | 28 апр. | 4 май | 6 | 0.5 |
| 4 | 11 июнь | 22 июнь | 11 | 36.5 | 14 июнь | 21 июнь | 7 | -30.5 | 12 июнь | 20 июнь | 8 | -4.0 |
| Липа амурская | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 28 апр. | 7 май | 9 | 44.2 | 29 апр. | 6 май | 7 | 16.1 | 25 апр. | 5 май | 10 | 38.5 |
| 2 | 3 май | 10 май | 7 | 28.8 | 3 май | 10 май | 7 | 13.5 | 28 апр. | 8 май | 10 | 43.0 |
| 3 | 7 май | 14 май | 7 | 27.7 | 6 май | 14 май | 8 | 28.5 | 4 май | 12 май | 8 | 14.7 |
| 4 | 13 май | 20 май | 7 | 40.6 | 11 май | 20 май | 9 | 20.1 | 15 май | 20 май | 12 | -2.02 |
| 5 | 8 июль | 15 июль | 7 | -31.3 | 25 июнь | 5 июль | 10 | 16.9 | 22 июнь | 5 июль | 13 | 87.75 |
| Черемуха обыкновенная | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 апр. | 14 апр. | 11 | 29.2 | 20 апр. | | | | 7 апр. | 10 апр. | 3 | -21.0 |
| 2 | 10 апр. | 17 апр. | 7 | 24.9 | 24 апр. | | | | 10 апр. | 13 апр. | 3 | -15.1 |
| 3 | 18 апр. | 20 апр. | 2 | -24.6 | 27 апр. | | | | 15 апр. | 18 апр. | 3 | -17.8 |
| 4 | 24 апр. | 28 апр. | 4 | -9.2 | 4 май | 3 май | -1 | -70.9 | 26 апр. | 28 апр. | 2 | -32.3 |
| 5 | 8 май | 13 май | 5 | -8.6 | 9 май | 12 май | 3 | -34.0 | 29 апр. | 10 май | 11 | 49.0 |

Обозначения: $\Delta\Sigma t_{эф}$ – разница в суммах эффективных температур между городом и лесом. Фенологические фазы: 1 – начало сокодвижения (весеннего «плача»), 2 – набухание почек, 3 – начало развития листьев, 4 – начало роста побега, 5 – массовое цветение.

Даты наступления фенологических фаз по годам сильно отличаются. Например, начало сокодвижения у аралии высокой (*Aralia elata* (Miq.) Seem.) в 2020 г. началось на 15 дней позже, чем в 2019 г. Поздние фазы развития по годам происходят более синхронно, чем ранние.

Среднее значение сдвига даты наступления фенологических фаз в городе на более ранние сроки относительно леса, по данным табл. 1, составляет 5.2 дня. При этом у теплолюбивых, южных видов (маакия амурская (*Maackia amurensis* Rupr.), аралия высокая), эта величина существенно больше — 7.7 дня. Полученные величины сдвига фенофаз в городе относительно леса близки к определенным в Европе (1–11 дней в Мадриде) (Galan Diaz, 2023). В обзоре о фенологии растений в городах Северного полушария максимальная разница между началом вегетации в городе и на загородной территории в азиатском регионе составила 20 дней (Ruan, 2019). Различия в суммах эффективных температур, необходимых для начала фенофаз, указанных в табл. 1 по всему массиву данных, составляют 7–80 °С со средним значением 30 °С. В целом сумма эффективных температур для конкретной фазы в городе и в лесу изменяется незначительно, что указывает на отсутствие зависимости между этим показателем и особенностями погоды и климата конкретного года. Например, для начала развития хвои у лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Мауг) в лесу в 2020 г. потребовалась сумма эффективных температур 154.5, а в 2021 г. — 163.6, при этом в 2021 г. фаза наступила на 8 дней позже. Отрицательные и положительные разности сумм эффективных температур в табл. 1 возникают, вероятно, как следствие влияния на фенологическое развитие других факторов (осадки, облачность, влажность почвы). Важным результатом здесь является иллюстрация относительно

малых различий в абсолютных значениях $\Sigma t_{эф}$ между лесом и городом на фоне значительных сдвигов в датах. Ключевую роль температуры в фенологическом развитии деревьев в регионе исследования иллюстрируют многолетние данные по климатической обусловленности фенофаз у черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.) в г. Уссурийске (рис. 3).

Сдвиги фенодат по годам у черемухи доходили до двух недель, при этом большинство фенологических фаз начиналось в разные годы при близких суммах эффективных температур. Количество осадков, напротив, было сильно различным на дату наступления конкретной фенофазы в разные годы. Древесные растения в Южном Приморье начинают рост и развитие независимо от частоты и обилия осадков и, следовательно, влажности почвы. Количество тепла является хотя и не единственным, но ключевым предиктором весенних фенологических фаз у растений в регионе исследования. В аридных регионах (Китай) главным фактором, запускающим весенние фенофазы, становятся осадки (Wang, 2022).

Из всех наблюдаемых пород у черемухи обыкновенной — вида с самым ранним фенологическим развитием — наиболее тесная связь суммы эффективных температур и наступления той или иной весенней фенофазы. Факт более высокой чувствительности к температуре раннесезонных видов растений описан и в других исследованиях (Wolkovich et al., 2012). Поэтому черемуха, по сравнению с остальными древесными породами, является лучшим биоиндикатором климатических изменений в условиях Южного Приморья и, учитывая ее повсеместное распространение, рекомендуется к включению в списки наблюдаемых видов в городах в будущем.

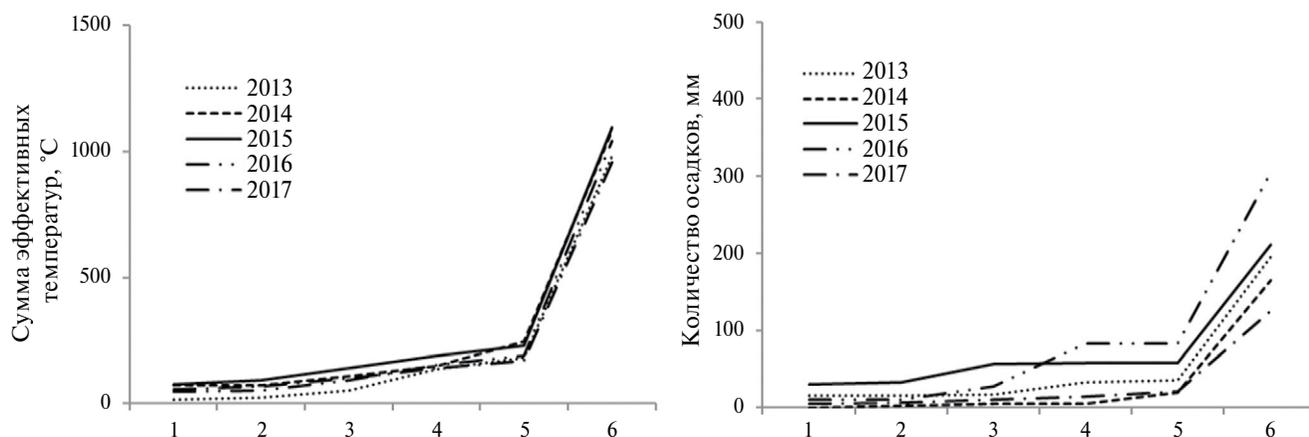


Рис. 3. Суммы эффективных температур и суммы осадков на даты начала шести фенологических фаз черемухи обыкновенной (1 — начало сокодвижения, 2 — набухание почек, 3 — раскрытие почек, 4 — разворачивание листьев, 5 — начало роста побегов, 6 — одревеснение побегов).

Ранее на основе данных фенологических наблюдений нами была составлена шкала теплолюбия древесных пород, которая в целом хорошо согласовывалась с другими шкалами теплолюбия (Иванов, Цыганова, 2014). Данные новых наблюдений позволяют расширить и уточнить эту шкалу. Ряд древесных пород, начинающийся с самой теплолюбивой, выглядит следующим образом: виноград амурский (*Vitis amurensis* Rupr.), маакия амурская, абрикос маньчжурский (*Prunus mandshurica* (Maxim.) Koehne), ель корейская (*Picea koraiensis* Nakai), аралия высокая, пихта цельнолистная (*Abies holophylla* Maxim.), липа амурская (*Tilia amurensis* Rupr.), ильм мелколистный (*Ulmus parvifolia* Jacq.), береза даурская (*Betula dahurica* Pall.), береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukacz.), лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), черемуха обыкновенная. Этот ряд согласуется и с взаимным расположением северных границ ареалов видов: например, виды, типичные только для Приморья, начинают вегетацию позже (Иванов, Цыганова, 2014).

Многолетние изменения фенологического развития анализировали, используя публикации по фенологии одних и тех же видов и территорий исследования. По результатам наблюдений Т.Ю. Епифановой (2003), в 1997–2002 г. цветение абрикоса в Уссурийске начиналось 5 мая; средняя дата, по нашим наблюдениям, 28 апреля; начало роста побегов, соответственно, 1 июня и 15 мая. Средний сдвиг фенодат у абрикоса через 17 лет составил 10 дней.

В публикации Т.В. Самойловой (1936) приводятся данные о фенологическом развитии 84 видов древесных и кустарниковых растений в сезон 1934

г. Наблюдения проводили на маршруте, расположенном в 10 км от места наших наблюдений в лесу (с. Каменушка). Четыре вида в списках наблюдений Т.В. Самойловой и нашем – общие (ильм японский (*Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg.), черемуха обыкновенная, липа амурская и аралия высокая), что дает возможность описать изменения в их фенологическом развитии за период 85 лет. Для сравнения мы использовали среднее значение фенодат по нашим наблюдениям за 2019–2021 гг.

Набухание почек сместилось на более ранние сроки: у ильма – на 9 дней, аралии – 4 дня, липы – 3 дня, черемухи – 5 дней. Для фазы начала развития листьев смещение составило: у ильма – 16 дней, аралии – 4 дня, черемухи – 2 дня. Начало развития у липы, наоборот, сместилось на поздние сроки на 4 дня. Цветение черемухи стало происходить на 9 дней раньше, аралии и липы – на 13 и 6 дней. Средний сдвиг приведенных фенологических событий за 85 лет составил 7 дней.

Сроки наступления весенних фенофаз у растений в Южном Приморье за последние 20 лет гораздо сильнее смещаются в раннюю сторону, чем за последние 85 лет. Такой результат, вероятно, отражает темпы глобального потепления, которое во второй половине XX в. происходило более быстрыми темпами.

Изменение продолжительности вегетационного периода. Для определения продолжительности вегетационного периода использовали данные дистанционного зондирования. Используя ресурс sentinel-hub.com/explore/eobrowsegi, снимки спутников Landsat и Sentinel, для лесного массива дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) в Уссурийском лесничестве определяли даты начала

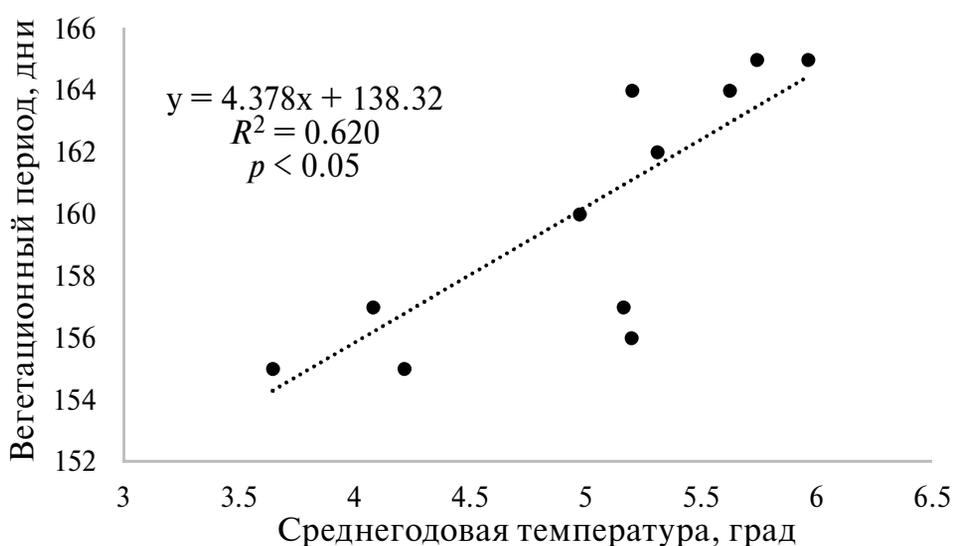


Рис. 4. Зависимость продолжительности вегетационного периода от среднегодовой температуры воздуха для пригородных лесов г. Уссурийска (R^2 – коэффициент детерминации, p – уровень значимости).

и окончания вегетации, индикаторами которых являются изменения цвета пикселей в визуальных каналах с бурой на салатную (весной) и наоборот (осенью). Для определения связи между среднегодовой температурой и продолжительностью вегетационного периода построен график (рис. 4).

Получен значимый тренд увеличения вегетационного периода у дубняков в зависимости от среднегодовой температуры воздуха. С повышением температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ вегетационный период удлиняется на 4.4 суток, и это, прежде всего, связано со смещением его начала на более ранние сроки. Выявлен значимый тренд смещения начала вегетационного периода (за 2011–2023 гг.) на более ранние даты ($R^2 = 0.44$, $p = 0.017$). Подобного закономерного смещения окончания вегетационного периода на поздние сроки не выявлено ($R^2 = 0.18$, $p = 0.170$). Для Северо-Восточного Китая, расположенного в непосредственной близости к Уссурийску, получен очень близкий тренд зависимости продолжительности вегетационного периода от суммы эффективных температур – 4.6 дня $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Wang, 2022). Среднее значение, полученное по дистанционным данным наблюдений в 32 городах Северного полушария, составляет 3.5 дня $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Ruan, 2019). Таким образом, в Южном Приморье чувствительность вегетационного периода к среднегодовой температуре оказывается выше, чем в среднем по Северному полушарию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сезонное развитие растений на юге Приморья иллюстрирует и подтверждает изменение температурного режима, а именно потепление как в краткосрочной, так и в долгосрочной ретроспективе. У древесных растений намечен тренд увеличения продолжительности периода вегетации на фоне растущей за последние годы средней температуры воздуха, при этом особенности распределения осадков в весенний период не сказываются на фенологических датах. Количественные оценки произошедших за последнее время изменений климата позволили соотнести полученные тренды с другими регионами. Полученные многолетние данные о фенологическом развитии в городских и естественных экосистемах являются основой для дальнейших более долгих и детальных наблюдений. Уссурийск – выращенный остров тепла: среднегодовая температуры в городе более чем на градус выше по сравнению с загородными территориями. Городская растительность по срокам весенних фенофаз опережает загородную в среднем на 5 дней (2019–2021 гг.). Представленные в исследовании сведения являются дополнительной иллюстрацией погодных вариаций и изменений климата в Южном Приморье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булыгин Н.Е.* Фенологические наблюдения над древесными растениями. Л.: ЛТА, 1979. 97 с.
- Елагин И.Н.* Методика проведения и обработки фенологических наблюдений за деревьями и кустарниками в лесу // Фенологические методы изучения лесных биогеоценозов. Красноярск, 1975. С. 3–20.
- Епифанова Т.Ю.* Особенности плодоношения абрикоса маньчжурского в Приморском крае // Проблемы сельскохозяйственного производства Приморского края: Матер. конф. молодых ученых. Уссурийск: ПГСХА, 2003. С. 154–157.
- Иванов А.В., Цыганова В.В.* Особенности фенологического развития деревьев, используемых в озеленении г. Уссурийска // Вестник ИрГСХА. 2014. № 64. С. 29–34.
- Каменева Л.А., Кокшеева И.М., Творогов С.П., Богачев И.Г.* Фенологический ответ *Magnolia sieboldii* K. Koch. на климатические изменения // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2018. Т. 123. № 1. С. 57–64.
- Марченко А.А., Иванов А.В.* Влияние изменения климата на фенологическое развитие древесных растений в г. Уссурийске // Проблемы региональной экологии. 2021. № 2. С. 5–9.
- Парилова Т.А., Кастрикин В.А., Бондарь Е.А.* Многолетние тенденции сроков наступления фенофаз растений в условиях потепления климата (Хинганский заповедник, Среднее Приамурье) // Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. М., 2006. С. 47–51.
- Самойлова Т.В.* Фенологические наблюдения над деревьями и кустарниками в бассейне реки Супутинки // Труды Горнотаежной станции ДВФ АН СССР. Хабаровск: Дальгиз, 1936. Т. 1. С. 133–162.
- Санданов Д.В., Rosbakh S., Батоцыренов Э.А., Дулепова Н.А.* Оценка долговременных изменений в фенологии растений на территории Сибири: Мат-лы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию организации Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, 150-летию основателя и первого директора Григория Леонидовича Граве, 140-летию эколога, профессора Владимира Владимировича Станчинского. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2022. С. 273–278.
- Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С.* Выявление климатогенных изменений. М.: Метеорология и гидрология, 2006. 324 с.
- Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.
- Янцер О.В.* Общая фенология и перспективные направления ее развития // Наука и образование: современные тренды. 2015. № 3 (9). С. 71–80.

- Badeck F.-W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S.* Responses of spring phenology to climate change // *New Phytologist*. 2004. V. 162. P. 295–309.
- Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas [Электронный ресурс]. URL: <https://chelsa-climate.org/downloads> (дата обращения: 20.01.2024).
- Dang C., Shao Z., Huang X., Zhuang Q., Cheng G., Qian J.* Climate warming-induced phenology changes dominate vegetation productivity in Northern Hemisphere ecosystems // *Ecological Indicators*. 2023. V.151. № 4. P. 1–10.
- Gaira K.S., Rawal R.S., Rawat B., Bhatt I.D.* Impact of climate change on the flowering of *Rhododendron arboretum* in central Himalaya, India // *Current Science*. 2014. V. 106. № 12. P. 1735–1738.
- Galan Díaz J., Gutierrez-Bustillo A.M., Rojo J.* Influence of urbanisation on the phenology of evergreen coniferous and deciduous broadleaf trees in Madrid (Spain) // *Landscape and Urban Planning*. 2023. V. 235. P. 1–10.
- Garamszegi B., Kern Z.* Climate influence on radial growth of *Fagus sylvatica* growing near the edge of its distribution in Bükk Mts., Hungary // *Dendrobiology*. 2014. V. 72. P. 93–102.
- Gordo O., Sanz J.J.* Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems // *Global Change Biology*. 2010. V. 16. № 3. P. 1082–1106.
- Ivanov A.V., Ivanova E.V., Gamaeva S.V.* Changes in the diversity of conifer–broadleaf forests of southern primorye resulting from selective logging and fires // *Russian Journal of Ecology*. 2022. T. 53. № 2. C. 83–90.
- Jochner S., Menzel A.* Urban phenological studies – past, present, future // *Environmental Pollution*. 2015. V. 203. P. 250–261.
- 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. V. 26. № 4. P. 2599–2612.
- Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D.V., Bukharova E.V., Miller T.K., Primack, R.B.* Siberian plants shift their phenology in response to climate change // *Global Change Biology*. 2021. V. 27. № 18. P. 4435–4448.
- Ruan Y., Zhang X., Xin Q., Ao Z., Sun Y.* Enhanced Vegetation Growth in the Urban Environment // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2019. V. 124. P. 3831–3846.
- Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F.* Ecological responses to recent climate change // *Nature*. 2002. V. 416. P. 389–395.
- Walker J.J., Beurs K.M., Henebry G.M.* Land surface phenology along urban to rural gradients in the U.S. Great Plains // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 165. P. 42–52.
- Wang L., De Boeck H., Chen L., Song C., Chen Z., McNulty S., Zhang Z.* Urban warming increases the temperature sensitivity of spring vegetation phenology at 292 cities across China // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 834. P. 1–10.
- Wolkovich E.M., Cook B.I., Allen J.M., Crimmins T.M., Betancourt J.L., Travers S.E., Pau S., Regetz J., Davies T.J., Kraft N.J. B., Ault T.R., Bolmgren K., Mazer S.J., McCabe G.J., McGill B.J., Parmesan C., Salamin N.* Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change // *Nature*. 2012. V. 485. P. 494–497.
- Yang L., Zhao S.* A stronger advance of urban spring vegetation phenology narrows vegetation productivity difference between urban settings and natural environments // *Science of the Total Environment*. 2023. V. 868. № 11. P. 1–9.
- Zhou D., Zhao S., Zhang L., Liu S.* Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 176. P. 272–281.

Temperature Variations and an Urban “Heat Spot” Affect Seasonal Development of Woody Plants in the South of Primorsky Krai

A. A. Marchenko¹, A. V. Ivanov^{2, 3, *}

¹Primorskaya State Agricultural Academy, 44 Bluhera st., Ussuriisk, 692510 Russia

²Institute of geology and natural resources management of the Far Eastern branch of the RAS, Relochniy ln. 1, Blagoveshchensk 675011 Russia

³Far East Forestry Research Institute, Volochaevskaya st. 71, Khabarovsk, 680020 Russia

*E-mail aleksandr86@mail.ru

The study demonstrates the influence of temperature variations, precipitation and the urban heat spot effect on the seasonal development of woody plants. Shifts in woody plants' phenodates caused by temperature changes and associated with the urban heat island effect were determined. Synchronous phenological observations were carried out in 2019–2021 in the Ussuriysk forest district and the city

of Ussuriysk (Primorsky Krai). According to the Timiryazevsky weather station, a significant trend of increasing average annual temperature was noted in the period from 2011 to 2023 at a rate of 0.15 °C year⁻¹. Comparison of the temperature regime in the city and in the forest confirms the presence of the urban heat spot effect. The difference in average monthly temperatures between the city and the forest fluctuated in the range of 0.2–2.5 °C in 2019, and 0.1–1.9 °C in 2020. The temperature in each month was higher in the city than in the forest. Differences in meteorological parameters of the forest and the city lead to a corresponding shift in the timing of the advancement of plants' phenophases. Based on the results of comparison of the 8 species of woody plants' phenological development in urban and forest conditions, it was found that on average the date of the phenological phases advancement in the city comes 5.2 days earlier, and for thermophilic southern species – 7.7 days earlier. Differences in the sums of temperatures required for the onset of a certain phase are within 1–80 °C. Bird cherry is the best bioindicator of climate change in the conditions of Southern Primorye, as this is the species demonstrating the closest relationship between the sum of effective temperatures and spring phenological phases. Using published data of phenological observations in the study area, the average shift in phenodates in plants over 85 years was determined, which averaged 7 days. The duration of the growing season in Southern Primorye is determined by the average annual air temperature. A linear dependence was obtained, showing that with an increase in temperature by 1, the growing season is extended by 4.4 days, and this is primarily due to the shift in the beginning of the growing season to an earlier date.

Keywords: phenology, urban heat spot, climate change, vegetation period.

Acknowledgements: The work has been carried out within the framework of the key innovative project «Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pool and greenhouse gases' fluxes on the territory of the Russian Federation; facilitating the creation of a system for registering the data on climate active substances' fluxes and carbon budget in forests and other terrestrial ecosystems» (No. 123030300031-6).

REFERENCES

- Badeck F.-W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S., Responses of spring phenology to climate change, *New Phytologist*, 2004, Vol. 162, pp. 295–309.
- Bulygin N.E., *Fenologicheskie nablyudeniya nad drevesnymi rasteniyami* (Phenological observations of woody plants), Leningrad: LTA, 1979, 97 p.
- Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas, available at: <https://chelsea-climate.org/downloads> (January 20, 2024).
- Dang C., Shao Z., Huang X., Zhuang Q., Cheng G., Qian J., Climate warming-induced phenology changes dominate vegetation productivity in Northern Hemisphere ecosystems, *Ecological Indicators*, 2023, Vol. 151, No. 4, pp. 1–10.
- Elagin I.N., Metodika provedeniya i obrabotki fenologicheskikh nablyudenii za derev'yami i kustarnikami v lesu (Methodology for conducting and processing phenological observations of trees and shrubs in the forest), In: *Fenologicheskie metody izucheniya lesnykh biogeotsenozov* (Phenological methods for studying forest biogeocenoses), Krasnoyarsk, 1975, pp. 3–20.
- Epifanova T.Y., Osobennosti plodonosheniya abrikosa man'chzhurskogo v Primorskom krae (Features of fruiting of Manchurian apricot in Primorsky Krai), *Problemy sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva Primorskogo kraya* (Problems of agricultural production of Primorsky Krai), Ussuriysk, Young Scientists Conf. Proc., Ussuriysk: PGSKhA, pp. 154–157.
- Gaira K.S., Rawal R.S., Rawat B., Bhatt I.D., Impact of climate change on the flowering of *Rhododendron arboretum* in central Himalaya, India, *Current Science*, 2014, Vol. 106, No. 12, pp. 1735–1738.
- Galan Díaz J., Gutierrez-Bustillo A.M., Rojo J., Influence of urbanisation on the phenology of evergreen coniferous and deciduous broadleaf trees in Madrid (Spain), *Landscape and Urban Planning*, 2023, Vol. 235, pp. 1–10.
- Garamszegi B., Kern Z., Climate influence on radial growth of *Fagus sylvatica* growing near the edge of its distribution in Bükk Mts., Hungary, *Dendrobiology*, 2014, Vol. 72, pp. 93–102.
- Gordo O., Sanz J.J., Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems, *Global Change Biology*, 2010, Vol. 16, No. 3, pp. 1082–1106.
- Ivanov A.V., Ivanova E.V., Gamaeva S.V., Changes in the diversity of conifer–broadleaf forests of southern Primorye resulting from selective logging and fires, *Russian Journal of Ecology*, 2022, Vol. 53, No. 2, pp. 83–90.
- Ivanov A.V., Tsyganova V.V., Osobennosti fenologicheskogo razvitiya derev'ev, ispol'zuemykh v ozelenenii g. Ussuriiska (Peculiarities of phenological development of trees used in urban gardening of Ussuriysk), *Vestnik IrGSKhA*, 2014, No. 64, pp. 29–34.

- Jochner S., Menzel A., Urban phenological studies – past, present, future, *Environmental Pollution*, 2015, Vol. 203, pp. 250–261.
- Kameneva L.A., Koksheeva I.M., Tvorogov S.P., Bogachev I.G., Fenologicheskii otvet *Magnolia sieboldii* K. Koch. na klimaticheskie izmeneniya (Phenological response *Magnolia sieboldii* K. Koch. to climate change), *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel biologicheskii*, 2018, Vol. 123, No. 1, pp. 57–64.
- Marchenko A.A., Ivanov A.V., Vliyanie izmeneniya klimata na fenologicheskoe razvitie drevesnykh rastenii v g. Ussuriiske (Impact of weather variation on phenological development of woody plants in Ussuriysk), *Problemy regional'noi ekologii*, 2021, No. 2, pp. 5–9.
- Menzel A., Yuan Y., Matiu M., Sparks T., Scheffinger H., Gehrig R., Estrella N., Climate change fingerprints in recent European plant phenology, *Global Change Biology*, 2020, Vol. 26, No. 4, pp. 2599–2612.
- Parilova T.A., Kastrikin V.A., Bondar' E.A., Mnogoletnie tendentsii srokov nastupleniya fenofaz rastenii v usloviyakh potepleniya klimata (Khinganskii zapovednik, Srednee Priamur'e) (Long-term trends in the timing of the onset of plant phenophases in conditions of climate warming (Khingan Nature Reserve, Middle Amur Region)), In: *Vliyanie izmeneniya klimata na ekosistemy basseina reki Amur* (The impact of climate change on the ecosystems of the Amur River basin), Moscow, 2006, pp. 47–51.
- Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D.V., Bukharova E.V., Miller T.K., Primack, R.B., Siberian plants shift their phenology in response to climate change, *Global Change Biology*, 2021, Vol. 27, No. 18, pp. 4435–4448.
- Ruan Y., Zhang X., Xin Q.,-Ao Z., Sun Y., Enhanced Vegetation Growth in the Urban Environment, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, Vol. 124, pp. 3831–3846.
- Samoilova T.V., Fenologicheskoe nablyudeniya nad derev'yami i kustarnikami v basseine reki Suputinki (Phenological observations of trees and shrubs in the Suputinka River basin), In: *Trudy Gornotaeznoi stantsii DVFAN SSSR* (Proceedings of the Mountain Taiga Station of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences), Khabarovsk: Dal'giz, 1936, Vol. 1, pp. 133–162.
- Sandanov D.V., Rosbakh S., Batotsyrenov E.A., Dulepova N.A., Otsenka dolgovremennykh izmenenii v fenologii rastenii na territorii Sibiri (Assessment of long-term changes in plant phenology in Siberia), Moscow, Proc. of the All-Russian conference with international participation dedicated to the 90th anniversary of the organization of the Central Forest State Nature Biosphere Reserve, the 150th anniversary of the founder and first director Grigory Leonidovich Grave, the 140th anniversary of the ecologist, professor Vladimir Vladimirovich Stanchinsky, Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, pp. 273–278.
- Semenov S.M., Yasyukevich V.V., Gel'ver E.S., *Vyyavlenie klimatogennykh izmenenii* (Identification of Climatogenic Changes), Moscow: Meteorologiya i gidrologiya, 2006, 324 p.
- Tretii otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Roshydromet's third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation), Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 676 p.
- Walker J.J., Beurs K.M., Henebry G.M., Land surface phenology along urban to rural gradients in the U.S. Great Plains, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 165, pp. 42–52.
- Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F., Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 2002, Vol. 416, pp. 389–395.
- Wang L., De Boeck H., Chen L., Song C., Chen Z., McNulty S., Zhang Z., Urban warming increases the temperature sensitivity of spring vegetation phenology at 292 cities across China, *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 834, pp. 1–10.
- Wolkovich E.M., Cook B.I., Allen J.M., Crimmins T.M., Betancourt J.L., Travers S.E., Pau S., Regetz J., Davies T.J., Kraft N.J. B., Ault T.R., Bolmgren K., Mazer S.J., McCabe G.J., McGill B.J., Parmesan C., Salamin N., Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change, *Nature*, 2012, Vol. 485, pp. 494–497.
- Yang L., Zhao S., A stronger advance of urban spring vegetation phenology narrows vegetation productivity difference between urban settings and natural environments, *Science of the Total Environment*, 2023, Vol. 868, No. 11, pp. 1–9.
- Yantser O.V., Obshchaya fenologiya i perspektivnye napravleniya ee razvitiya (General phenology and promising directions of its development), *Nauka i obrazovanie: sovremennye trendy*, 2015, No. 3 (9), pp. 71–80.
- Zhou D., Zhao S., Zhang L., Liu S., Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 272–281.