

## Изменение фенологии многолетних растений в Западной Сибири на фоне глобального потепления климата

Э. С. ФОМИН<sup>1</sup>, Т. И. ФОМИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт цитологии и генетики СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10  
E-mail: fomin@bionet.nsc.ru

<sup>2</sup>Центральный сибирский ботанический сад СО РАН  
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101  
E-mail: fomina-ti@yandex.ru

Статья поступила 27.05.2021

После доработки 29.05.2021

Принята к печати 31.05.2021

### АННОТАЦИЯ

Обобщены данные по сезонному развитию 78 видов многолетних растений в условиях лесостепи Западной Сибири за 20-летний период (1996–2015 гг.) в связи с изменениями регионального климата. Показано, что метеорологические показатели теплого сезона года в Новосибирске претерпели заметные изменения: среднесуточная температура воздуха повысилась на 0,16 °С, вегетационный период удлинился на 12 дней, период активной вегетации растений при температурах выше 10 °С – на 8 дней. Выявлены корреляции сроков фенофаз отрастания и начала цветения многолетников с датой схода снежного покрова, датами перехода среднесуточных температур воздуха через 5 и 10 °С в сторону повышения, суммами этих температур. С помощью линейных фенологических трендов установлено запаздывание в пределах 2–6 дней начала вегетации и опережающее начало цветения (кроме раннелетних видов) на 2–10 дней. Сокращение длительности префлорального периода от 5 до 24 дней свидетельствует об ускорении темпов развития многолетников на фоне выявленных метеотрендов. Изменение продолжительности вегетации значительное у весенне-осеннезеленых и весенне-летне-зимнезеленых видов (10 и 12 дней соответственно). Низкие значения коэффициента детерминации для большинства трендов ( $R^2 < 0,06$ ) показывают, что изменения фенологии видов в основном обусловлены межгодовой вариабельностью.

**Ключевые слова:** изменение климата, метеорологические тренды, фенологические тренды, виды природной флоры.

Глобальное потепление климата в последние десятилетия большинством исследователей рассматривается как доминирующий фактор, влияющий на показатели биоразнообразия и смещение времени наступления фенологических событий [Bertin, 2008; Зорина и др., 2020]. Ожидается, что воздействие потепления на рост и развитие растений, осо-

бенно в сочетании с другими абиотическими и биологическими стрессорами (засуха, повышение давления патогенов), усилит проблемы как для диких, так и культурных видов [Rai, 2015; Lippmann et al., 2019].

Показано, что изменения в фенологии растений влияют на продуктивность, межвидовую конкуренцию, сезонную активность опы-

лителей, высвобождение пыльцы и др. [Rathcke, Lacey, 1985; Badeck et al., 2004]. Данные дистанционного зондирования (NDVI) свидетельствуют об удлинении вегетационного периода в Евразии и Северной Америке на 12 дней [Jeong et al., 2011]. Более раннее озеленение поверхности весной, задержка осеннего старения и опадания листвы могут изменить сезонный климат из-за взаимодействия биогеохимических процессов и физических свойств растительного покрова [Peñuelas et al., 2009]. Увеличение длительности вегетации также имеет последствия для распространения вредителей и болезней растений [Forrest, Miller-Rushing, 2010].

Результаты многолетних фенологических наблюдений указывают на общую тенденцию к раннему наступлению весенних фенофаз, примерно с 1980-х годов, более выраженную в умеренной зоне Северного полушария [Walther et al., 2002; Cleland et al., 2007; Gordo, Sanz, 2010]. Установлено, что в Европе и Северной Америке весенние фенофазы продвигаются гораздо устойчивее, чем летние или осенние, а ранневесенние – больше, чем поздневесенние или раннелетние. Это связано с опережающим повышением зимних и ранневесенних температур, следовательно, с более ранним снеготаянием, а также с большей чувствительностью весенних явлений жизненного цикла к годовым изменениям внешних факторов. Результаты сопоставимых исследований в Восточной Азии (Япония и Южная Корея) показали обратное – при тех же тенденциях изменения фенологических реакций у большинства видов сроки осенних фенофаз меняются быстрее весенних [Ibáñez et al., 2010], а удлинение вегетационного периода обусловлено продолжительным старением листьев осенью [Jeong et al., 2011]. Это подчеркивает необходимость изучения множества видов на многих участках для прогнозирования региональных изменений в фенологии.

По данным T. L. Root et al. [2003], за последние полвека ускорение весенних фенофаз за десятилетие для широтных поясов 50–72° с. ш. составило в среднем  $5,5 \pm 0,1$  дней. Изменения в летних и осенних фенофазах менее последовательны по направлению и величине, хотя наиболее типичной реакцией осенних фенофаз является небольшая задержка

[Walther et al., 2002]. Она может отражать как меньшие климатические изменения в течение лета или осени, так и меньшую чувствительность этих фенофаз к происходящим изменениям – закладка почек, листопад и формирование холодостойкости у многолетних растений обычно вызываются фотопериодом [Gordo, Sanz, 2010; Franks et al., 2013].

Однако, несмотря на эту преобладающую тенденцию, различные виды даже в одной местности реагируют неодинаково [Miller-Rushing et al., 2008; Жмылева и др., 2011]. С. Parmesan и G. Yohe [2003] проанализировали за почти 50-летний период весеннюю фенологию 385 видов растений преимущественно из умеренных областей Северного полушария. У 72 % видов она варьирует согласованно с климатическими изменениями, у 12 % имеет противоположную тенденцию, тогда как остальные виды оказались фенологически устойчивыми. Аналогичные результаты получены V. P. Khanduri et al. [2008] для более чем 650 видов растений, наблюдаемых в различные временные промежутки с медианой 59 лет.

Изучение этого вопроса осложняется различными временными периодами в разных исследованиях, региональными различиями в климатических изменениях, которые не зависят от широтного эффекта, а также географической вариабельностью фенологии одного и того же вида [Bertin, 2008]. Кроме того, высокая межгодовая изменчивость погодных факторов затрудняет обнаружение тенденций в фенологии в связи с глобальным потеплением. Поэтому картину необходимо модифицировать отклонением сезонных тенденций от годовых, а региональных паттернов изменения климата – от глобального. В целом ученые сходятся в том, что фенологические реакции на антропогенное изменение климата будут гетерогенными, сильно изменчивыми на региональном уровне благодаря локальным адаптациям и фенотипической пластичности [Franks et al., 2013; Gratani, 2014; Park et al., 2019].

Фенологические наблюдения в местном масштабе дают ценную информацию об ответных реакциях отдельных видов и их внутривидовой изменчивости [Badeck et al., 2004]. Интродукция растений в ботанические сады позволяет обеспечить ряды локальных наблюдений для большого числа видов, выявить закономерности фенологических реакций

в новых условиях [Wolkovich et al., 2014; McDonough MacKenzie et al., 2020]. Более того, для большинства видов растений живые коллекции являются единственным источником долгосрочных фенологических данных, без которых невозможен прогноз последствий изменения климата для биоразнообразия [Khanduri et al., 2008; Robbirt et al., 2011], а также решение практических задач в растениеводстве, лесном хозяйстве и озеленении [Hunter, 2011; Chmielewski, 2013].

Цель исследования – оценка изменчивости сроков фенологического развития многолетних растений в связи с тенденцией изменения климата Новосибирска.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН, г. Новосибирск (55°2'29,4" с. ш., 82°56'4,6" в. д.). Объектами послужили 78 видов многолетних растений из коллекции декоративных видов природной флоры, для которых фенологические наблюдения выполнялись на временном промежутке с 1996 по 2015 г. Для характеристики климатических показателей за период исследования использовали данные по метеостанции Огурцово (№ 29638)<sup>1</sup>.

Данные фенологических и метеорологических наблюдений обработаны стандартными статистическими методами с использованием пакетов R, MS Excel и собственных программ, написанных на C++. Для расчета корреляций использовали линейный коэффициент Пирсона  $r$  и следующую категориальную шкалу для интерпретации величины корреляции:  $|r| \leq 0,1$  – слабая,  $0,1 < |r| < 0,3$  – средняя и  $|r| \geq 0,3$  – высокая. Данная шкала учитывает отсутствие в результатах корреляционного анализа больших значений,  $|r| \sim 1$ , обусловленное высокой инерционностью фенологических реакций растений в ответ на непрерывные, разномасштабные и разнонаправленные изменения погодных условий. Границы категорий в этой шкале смещены в сторону низких значений, при этом малое значение  $r$  необязательно означает малые последствия [Котеров и др., 2019].

За период исследования нами вычислены внутрисезонные тренды температуры воз-

духа  $T$  и количества осадков  $R$  – с 1 апреля по 31 октября – путем построения множества отдельных, на каждую дату года, линейных трендов с последующим вычислением простого скользящего среднего в окне шириной 30 суток с целью сглаживания краткосрочных флуктуаций и выявления основных изменений. Для получения фенологических трендов и оценки их достоверности использован метод бутстрэппинга [Efron, 1979], пригодный для любых вероятностных распределений и размеров выборок. Он дает более точные результаты, чем широко используемые подходы для расчетов статистик [Singh, 1981], что обусловлено многократной генерацией и анализом случайных выборок на основе имеющихся данных.

Рассчитаны средние значения сроков наступления и продолжительности фенофаз со средним квадратическим отклонением; средние значения трендов (положительное значение означает смещение фенофаз к более поздним датам или увеличение продолжительности фенологического периода); коэффициенты детерминации  $R^2$  (доли вариаций, описываемых трендами, остальная изменчивость обязана межгодовым колебаниям метеорологических и фенологических показателей);  $p$ -значения ( $p_v$ ) (вероятность ошибки тренда). В качестве уровня значимости принято  $\alpha = 0,05$ , т. е. условие  $p_v \leq 0,05$  означает достоверность тренда.

Климат г. Новосибирска, расположенного на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, в Северопредальтайской лесостепной провинции, относится к резко-континентальному, умеренно-холодному с недостаточным увлажнением. Средняя температура зимних месяцев равна  $-15$  °С, летних –  $16-19$  °С. Сумма температур воздуха выше  $10^\circ$ , обеспечивающих активную вегетацию растений, составляет в среднем  $1920$  °С. Безморозный период длится  $92-144$  дня. Среднегодовое количество осадков равно  $442$  мм, в том числе за период с апреля по октябрь выпадает  $338$  мм. Снежный покров в среднем  $37$  см [Научно-прикладной справочник..., 1993].

Обнаруженное во второй половине прошлого столетия в Северном полушарии интенсивное потепление климата имеет место и в Новосибирске: каждое десятилетие среднегодовая температура воздуха повышалась на  $0,27$  °С, рост сумм температур выше  $10$  °С за пери-

<sup>1</sup> <https://rp5.ru/> Архив\_погоды\_в\_Огурцово.

од вегетации составлял 80–100 °С, а продолжительность безморозного периода увеличилась в целом на 6 дней [Воронина, Гриценко, 2011; Лучицкая и др., 2014]. Изменился режим увлажнения: в теплый период года количество осадков сократилось на 11 мм, усилилась сухость климата на фоне повышения температур; снежный покров, напротив, увеличился (4 см за десятилетие) и залегает продолжительнее почти на две декады [Лучицкая и др., 2014]. В Западной Сибири потепление сопровождается положительными трендами температур холодного и переходных сезонов, тогда как летние изменяются мало, а также увеличением амплитуды межгодовых колебаний климатических показателей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Метеорологические тренды за период 1996–2015 гг.*

За период исследования среднее изменение температуры воздуха в теплый сезон года в Новосибирске составило +0,16 °С, суммарное количество осадков с апреля по октябрь не изменилось (–0,01 мм). Построение линейных трендов температур и осадков выявило внутрисезонные периоды с существенными изменениями основных метеорологических показателей (рис. 1).

Начало сезона заметно потеплело ( $\Delta T_{\text{ср}} = +0,83$ ), а поздневесенний период стал более холодным и влажным ( $\Delta T_{\text{ср}} = -1,87$ ,  $\Delta R_{\text{ср}} = +0,47$ ). В первой половине лета возросла вероятность жаркой и сухой погоды ( $\Delta T_{\text{ср}} = +0,89$ ,  $\Delta R_{\text{ср}} = -1,12$ ), но во второй значительно увеличилось количество осадков ( $\Delta R_{\text{ср}} = +0,97$ ). В начале осени сформировались условия относительного тепла и сухости ( $\Delta T_{\text{ср}} = +0,80$ ,  $\Delta R_{\text{ср}} = -0,37$ ), в конце увлажнения повысилось ( $\Delta R_{\text{ср}} = +0,30$ ), причем температурный фон не изменился. Основные метеорологические показатели теплого периода за годы исследования приведены в табл. 1.

### *Корреляции фенофаз с метеоусловиями*

В табл. 2 представлено распределение 78 исследованных видов по основным фенологическим признакам в соответствии с работой Т. И. Фоминой [2012]. Для выявления взаимосвязи между фенодатами и метеоуслови-

ями рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона  $r$ .

Анализ зависимостей показал (рис. 2), что сроки отрастания многолетников положительно коррелируют с датой схода снежного покрова. Отрицательная корреляция с весенними заморозками свидетельствует о высокой холодостойкости видов: при возврате пониженных температур растения не повреждаются, а лишь приостанавливают рост независимо от срока их отрастания. Время возобновления вегетации коррелирует на среднем уровне с датами перехода среднесуточных температур воздуха через 5 °С в сторону повышения, но дальнейшее увеличение тепла (переход через 10 °С) вызывает отчетливую реакцию во всех группах, особенно у ранних видов ( $r = 0,55$ ).

Что касается начала цветения, то положительная корреляция со сходом снежного покрова выявлена лишь для ранневесенних видов ( $r = 0,33$ ), они же не боятся заморозков (рис. 3). У видов весенних групп наблюдается достаточно высокая корреляция как с началом вегетационного периода ( $r = 0,41$  для ранневесенних и 0,30 для поздневесенних), так и с наступлением повышенных температур ( $r = 0,50$  и 0,30 соответственно). Корреляция времени начала цветения с суммами температур воздуха выше 5 и 10 °С отрицательная для видов всех групп, но закономерно ослабевает в сторону более поздних сроков цветения: наибольшая – у ранневесенних, наименьшая – у позднелетних. Значения  $r_v$  для всех рассчитанных коэффициентов корреляции находятся в пределах 0,05, т. е. достоверны.

### *Фенологические тренды*

Фенологические тренды  $\Delta \eta$  вычисляли путем построения линейной регрессии:  $\eta(\text{год}) = \alpha + \beta \times \text{год}$ , где  $\eta$  – параметр (дата наступления фенофазы или ее продолжительность);  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметры линейной регрессии с дальнейшим вычислением разности между значениями регрессии на границах интервала лет:  $\Delta \eta = \eta(2015) - \eta(1996)$ . Полученные тренды сравнивали с метеорологическими трендами за период исследования, построенными ранее.

Установлено достоверное запаздывание в пределах 5–6 дней дат начала вегетации ранних и средних видов, что полностью со-

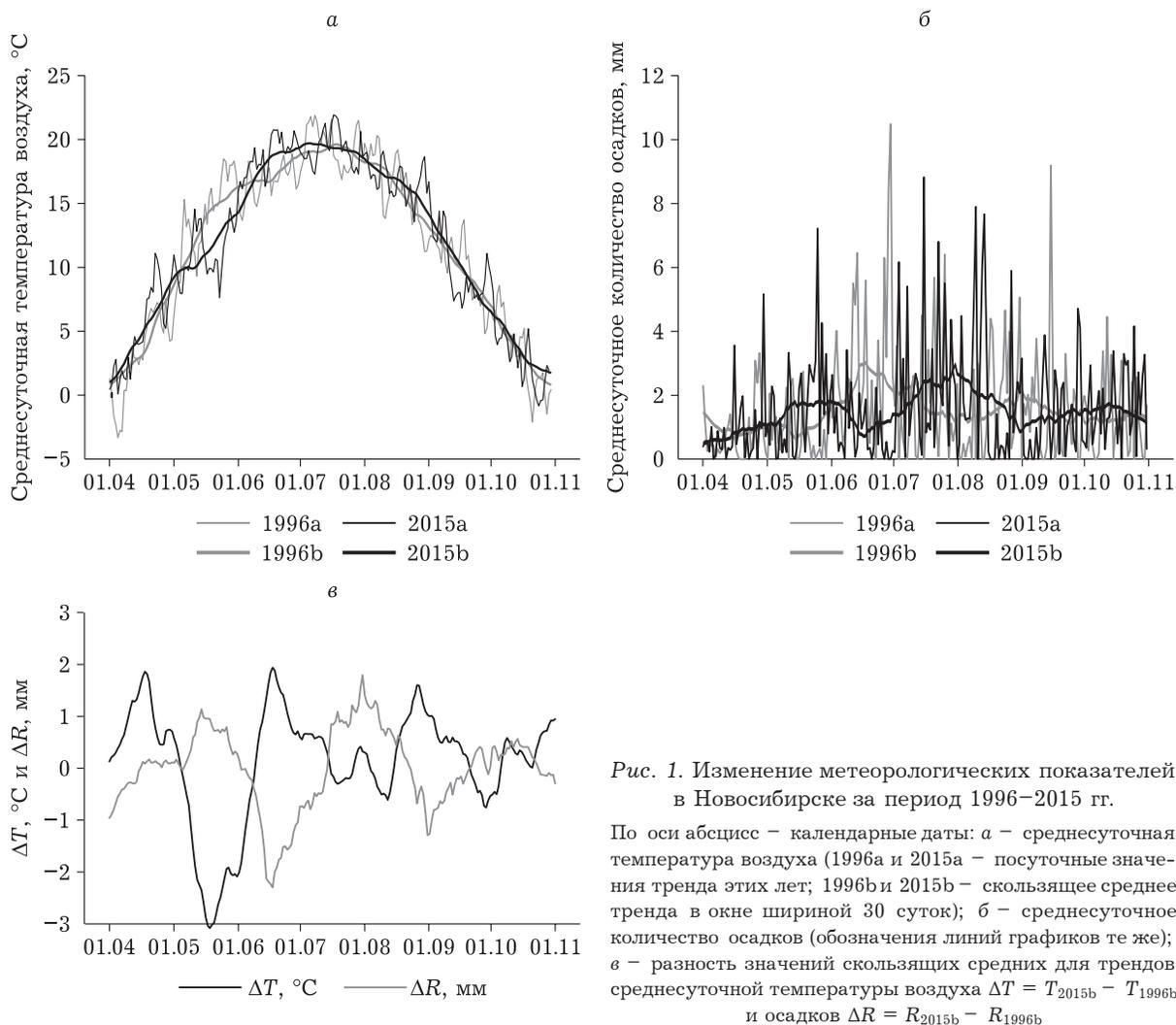


Рис. 1. Изменение метеорологических показателей в Новосибирске за период 1996–2015 гг.

По оси абсцисс – календарные даты: а – среднесуточная температура воздуха (1996а и 2015а – посуточные значения тренда этих лет; 1996б и 2015б – скользящее среднее тренда в окне шириной 30 суток); б – среднесуточное количество осадков (обозначения линий графиков те же); в – разность значений скользящих средних для трендов среднесуточной температуры воздуха  $\Delta T = T_{2015b} - T_{1996b}$  и осадков  $\Delta R = R_{2015b} - R_{1996b}$

Т а б л и ц а 1  
Метеорологические тренды теплового периода в Новосибирске (1996–2015 гг.)

Показатель	$M \pm \sigma$	$\Delta V_{1996-2015}$	$R^2$	$p_0$
Сход снежного покрова	$13.04 \pm 8$	+4	0,02	<b>0,01</b>
Последний заморозок в воздухе	$12.05 \pm 8$	+5	0,03	<b>&lt;0,01</b>
Первый заморозок в воздухе	$23.09 \pm 7$	+1	<0,01	0,42
Установление снежного покрова	$01.11 \pm 10$	-4	0,01	0,07
Период с температурами выше 5 °С	$165 \pm 14$	+12	0,06	<b>&lt;0,01</b>
Период с температурами выше 10 °С	$136 \pm 11$	+8	0,04	<b>&lt;0,01</b>
Сумма температур выше 5 °С	$2518 \pm 169$	-13	<0,01	0,69
Сумма температур выше 10 °С	$2242 \pm 200$	-85	0,02	<b>0,02</b>
ГТК	$0,91 \pm 0,37$	-0,09	<0,01	0,21

П р и м е ч а н и е.  $M \pm \sigma$  – среднее значение показателя и его стандартное отклонение;  $\Delta V_{1996-2015}$  – изменение показателя с 1996 по 2015 г. (тренд);  $R^2$  – коэффициент детерминации тренда;  $p_0$  – уровень его значимости; ГТК – гидротермический коэффициент (отношение суммы осадков за период с температурами воздуха выше 10 °С к сумме этих температур).

Вид	Феноритмотип	Группа весеннего отрастания	Группа начала цветения
<i>Achillea millefolium</i> L.	Весенне-летне-осеннезеленый	Ранняя	Раннелетняя
<i>Aconitum kusnezoffii</i> Reichenb.	Весенне-летнезеленый	»	Позднелетняя
<i>Adonis vernalis</i> L.	»	»	Ранневесенняя
<i>Aizopsis aizoon</i> (L.) Grulich	Весенне-летне-зимнезеленый	»	Раннелетняя
<i>A. hybrida</i> (L.) Grulich	Гемифемероид	»	»
<i>Allium aflatumense</i> В. Fedtsch.	»	»	Поздневесенняя
<i>A. microdictyon</i> Prokh.	Весенне-летнезеленый	»	»
<i>A. obliquum</i> L.	»	»	Раннелетняя
<i>A. ramosum</i> L.	»	»	»
<i>A. schoenoprasum</i> L.	»	»	»
<i>A. senescens</i> L. var. <i>glaucum</i> Schrad.	»	»	Летняя
<i>Anaphalis margaritacea</i> (L.) A. Gray	Весенне-летне-осеннезеленый	Средняя	Позднелетняя
<i>Anemone canadense</i> A. Löve et D. Löve	Весенне-летнезеленый	»	Раннелетняя
<i>A. dichotomum</i> (L.) Holub	»	»	Поздневесенняя
<i>Anemone altaica</i> (C. A. Mey.) Holub	Эфемероид	Ранняя	Ранневесенняя
<i>Aquilegia sibirica</i> Lam.	Весенне-летнезеленый	»	Поздневесенняя
<i>Asparagus officinalis</i> L.	»	Средняя	Раннелетняя
<i>Aster tataricus</i> L. fil.	»	Ранняя	Летняя
<i>Bergenia crassifolia</i> (L.) Fritsch.	Весенне-летне-зимнезеленый	»	Ранневесенняя
<i>Bistorta officinalis</i> Delabre	Весенне-летнезеленый	»	Поздневесенняя
<i>Brunnera sibirica</i> Stev.	»	»	Раннелетняя
<i>Campanula alliariifolia</i> Willd.	Весенне-летне-осеннезеленый	Средняя	Летняя
<i>C. persicifolia</i> L.	Весенне-летне-зимнезеленый	Ранняя	Раннелетняя
<i>C. rapunculoides</i> L.	»	»	Летняя
<i>C. trachelium</i> L.	»	»	»
<i>Centaurea dealbata</i> Willd.	»	»	Раннелетняя
<i>Clematis recta</i> L.	Весенне-летнезеленый	Поздняя	Летняя
<i>Convallaria majalis</i> L.	»	Средняя	Поздневесенняя
<i>Coreopsis grandiflora</i> Hogg	Весенне-летне-осеннезеленый	»	Летняя
<i>Corydalis bracteata</i> (Steph.) Pers.	Эфемероид	Ранняя	Ранневесенняя
<i>Dianthus versicolor</i> Fisch. ex Link	Весенне-летне-осеннезеленый	Средняя	Летняя
<i>Dracopetalum grandiflorum</i> L.	Весенне-летне-зимнезеленый	Ранняя	Поздневесенняя
<i>D. ruyshiana</i> L.	»	»	Раннелетняя
<i>Erythronium saxatile</i> (L.) Ikonn.	Весенне-летне-осеннезеленый	»	Поздневесенняя
<i>Erythronium sibiricum</i> (Fisch. et C. A. Mey.) Kruyl.	Эфемероид	»	Ранневесенняя
<i>Fili pendula palmata</i> (Pall.) Maxim.	Весенне-летнезеленый	»	Летняя
<i>F. rubra</i> (Hill) Rob.	»	Средняя	»
<i>F. ulmaria</i> (L.) Maxim.	»	Ранняя	»
<i>F. vulgaris</i> Moench	Весенне-летне-осеннезеленый	»	Раннелетняя
<i>Gentiana macrophylla</i> Pall.	»	Средняя	Летняя
<i>Geranium pratense</i> L.	»	Ранняя	»

<i>G. sanguineum</i> L.	»	Средняя	Раннелетняя
<i>Helioopsis scabra</i> Dun.	Весенне-летне-осеннезеленый	Поздняя	Летняя
<i>Heterocallis minor</i> Mill.	Весенне-летнезеленый	Ранняя	Позднелетняя
<i>Heuchera sanguinea</i> Engelm.	Весенне-летне-зимнезеленый	»	Раннелетняя
<i>Hylotelephium ewersii</i> (Ledeb.) H. Ohba	Весенне-летнезеленый	»	Позднелетняя
<i>Hysopus officinalis</i> L.	Весенне-летне-осеннезеленый	Средняя	Летняя
<i>Lavatera thuringiaca</i> L.	Весенне-летнезеленый	Ранняя	»
<i>Leontopodium leontopodioides</i> (Willd.) Beauverd.	»	Средняя	Раннелетняя
<i>Lilium pensylvanicum</i> Ker-Gawl.	»	»	»
<i>L. pilosiusculum</i> (Frey) Miscz.	»	»	»
<i>L. pumilum</i> Delile	»	Поздняя	»
<i>Lychnis chalcidonica</i> L.	»	Ранняя	Летняя
<i>Lysimachia punctata</i> L.	»	»	Раннелетняя
<i>L. vulgaris</i> L.	»	Поздняя	Летняя
<i>Lythrum salicaria</i> L.	»	»	»
<i>Mentha longifolia</i> (L.) Huds.	»	Средняя	»
<i>Monarda didyma</i> L.	Весенне-летне-осеннезеленый	»	»
<i>M. fistulosa</i> L.	»	»	»
<i>Nepeta sibirica</i> L.	»	»	»
<i>Raconia lactiflora</i> Pall.	Весенне-летнезеленый	Ранняя	Раннелетняя
<i>Phlox subulata</i> L.	»	»	Позднелетняя
<i>Physostegia virginiana</i> (L.) Benth.	Весенне-летне-зимнезеленый	»	Позднелетняя
<i>Platycodon grandiflorus</i> (Jacq.) A. DC.	Весенне-летне-осеннезеленый	Средняя	»
<i>Polemonium caeruleum</i> L.	Весенне-летнезеленый	Поздняя	»
<i>Polygonatum odoratum</i> (Mill.) Druce	Весенне-летне-осеннезеленый	Ранняя	Позднелетняя
<i>Primula macocalyx</i> Bunge	Весенне-летне-зимнезеленый	Поздняя	»
<i>Rheum rhubarbarum</i> L.	»	Ранняя	Раннелетняя
<i>Satureja montana</i> L.	Весенне-летнезеленый	»	Позднелетняя
<i>Sedum album</i> L.	Весенне-летне-осеннезеленый	Средняя	Летняя
<i>S. reflexum</i> L.	»	Ранняя	Раннелетняя
<i>S. spurium</i> Bieb.	»	»	Летняя
<i>Thalictrum aquilegifolium</i> L.	Весенне-летнезеленый	Средняя	Позднелетняя
<i>Th. flavum</i> L.	»	Поздняя	Летняя
<i>Thymus mongolicus</i> (Ronn.) Ronn.	Весенне-летне-зимнезеленый	Средняя	Раннелетняя
<i>Veronica incana</i> L.	»	»	»
<i>Viola cucullata</i> Ait.	Весенне-летне-осеннезеленый	»	Позднелетняя
<i>V. hirta</i> L.	Весенне-летне-зимнезеленый	Ранняя	Раннелетняя

Г р и м е ч а н и е. Группы весеннего отрастания: ранняя – вторая половина апреля, средняя – первая декада мая, поздняя – вторая и третья декады мая. Группы начала цветения: ранневесенняя – третья декада апреля – 15 мая, поздневесенняя – 16 мая – 25 июня, раннелетняя – 6 – 25 июня, летняя – 26 июня – 15 июля, позднелетняя – 16 июля – 15 августа. Феноритмотипы: эфемероиды вегетируют с начала весны до начала лета, гемифемероиды – с начала весны до середины лета, весенне-летнезеленые – с весны до начала осени, весенне-летне-осеннезеленые – с весны до установления снежного покрова, весенне-летне-зимнезеленые – вегетируют от снега и до снега, перезимовывающая с зелеными листьями.

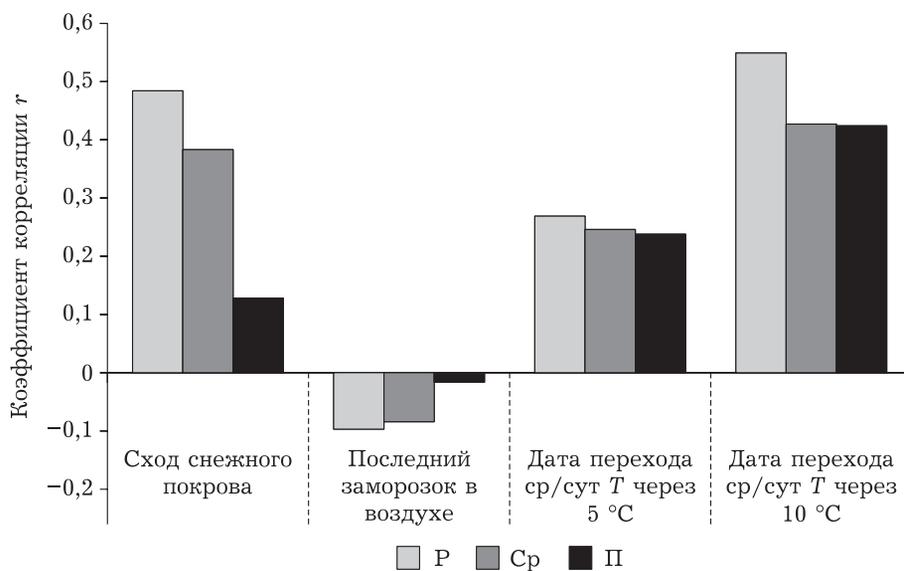


Рис. 2. Корреляции метеоявлений с началом вегетации многолетников за период 1996–2015 гг. в Новосибирске. Группы по срокам весеннего отрастания: Р – ранняя, Ср – средняя, П – поздняя

гласуется с трендом снеготаяния (+4 дня). Зависимость отрастания поздних видов со сходом снежного покрова существенно меньше по величине и уровню достоверности (табл. 3). Цветение у всех видов, кроме раннелетней группы, начинается раньше, причем опережение возрастает от более ранних сроков к более поздним, от ранневесенних видов – к позднелетним. Так, весенние многолетники

зацветают раньше на 2–3 дня, а позднелетние – на 10 дней. Низкие значения коэффициента детерминации трендов ( $R^2 \leq 0,06$ ) показывают, что значения трендов существенно меньше межгодовой вариабельности дат наступления фенофаз.

Данные табл. 4 отражают достоверное сокращение длительности префлорального периода для всех видов в диапазоне от 5 до 24

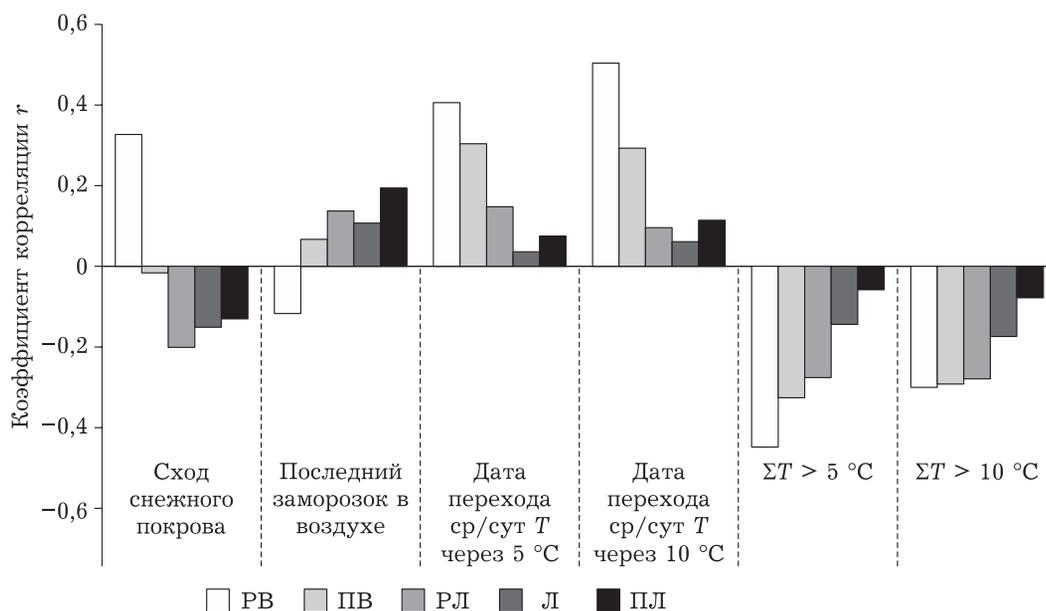


Рис. 3. Корреляции метеоявлений с началом цветения многолетников за период 1996–2015 гг. в Новосибирске. Группы по срокам начала цветения: РВ – ранневесенняя, ПВ – поздневесенняя, РЛ – раннелетняя, Л – летняя, ПЛ – позднелетняя

Тренды начала вегетации и начала цветения для различных фенологических групп

Фенологическая группа	$M \pm \sigma$	$\Delta L \pm \sigma$	$R^2$	$p_v$
Начало вегетации (отрастание)				
Ранняя	$28.04 \pm 7$	$5 \pm 1$	0,04	<b>&lt;0,01</b>
Средняя	$04.05 \pm 8$	$6 \pm 2$	0,06	<b>&lt;0,01</b>
Поздняя	$14.05 \pm 6$	$2 \pm 3$	0,03	0,20
Начало цветения				
Ранневесенняя	$03.05 \pm 8$	$-2 \pm 3$	0,02	0,29
Поздневесенняя	$28.05 \pm 8$	$-3 \pm 2$	0,02	0,09
Раннелетняя	$16.06 \pm 8$	$1 \pm 2$	0,01	0,40
Летняя	$04.07 \pm 9$	$-4 \pm 2$	0,02	<b>0,02</b>
Позднелетняя	$29.07 \pm 13$	$-10 \pm 7$	0,05	0,07

П р и м е ч а н и е. ( $M \pm \sigma$ ) – средние даты фенофаз отрастания и начала цветения с их стандартным среднеквадратическим отклонением;  $\Delta L \pm \sigma$  – смещение дат фенофаз в днях, при этом отрицательное значение означает более раннее наступление фенофазы, а положительное – более позднее;  $R^2$  – коэффициент детерминации тренда;  $p_v$  – уровень значимости.

дней. Изменение, заметное у многолетников, зацветающих весной – в начале лета, значительно возрастает у летних и позднелетних видов. Периоды цветения отличаются очень высокой вариабельностью для всех групп ( $C_v = 35-68\%$ ), а их тренды характеризуются разнонаправленностью и различной величиной. Цветение ранневесенних видов стало короче всего на 1 день, ранне- и позднелетних – на две недели, тогда как у поздневесенних и летних видов оно удлинилось на неделю.

Как следует из табл. 5, изменения длительности фенологических периодов у видов разных феноритмотипов (групп по срокам и длительности вегетации) весьма различают-

ся. Среди коротковегетирующих видов у эфемероидов смещения незначительные ( $\pm 1$  день) и недостоверные ( $p_v > 0,3$ ), напротив, у гемиефемероидов значительно сократились периоды цветения ( $p_v = 0,04$ ) и вегетации – на одну и две недели соответственно. Для весенне-летнезеленых видов отмечено уменьшение префлорального периода ( $-6$  дней) и периода цветения ( $-5$  дней), но тренд изменения длительности вегетации не выявлен. Ритм развития весенне-осеннезеленых видов достоверно изменился: цветение начинается раньше на 11 дней, период вегетации сократился на 10 дней. Такой же тренд продолжительности вегетации наблюдается у весенне-летне-зимне-

Тренды продолжительности фенологических периодов для видов с разными сроками начала цветения

Фенологическая группа	$M \pm \sigma$	$\Delta L \pm \sigma$	$R^2$	$p_v$
Ранневесенняя	$7 \pm 6$	$-8 \pm 2$	$0,13$	<b>&lt;0,01</b>
	$20 \pm 8$	$-1 \pm 4$	0,02	0,46
Поздневесенняя	$29 \pm 10$	$-6 \pm 3$	$0,03$	<b>0,04</b>
	$25 \pm 17$	$7 \pm 5$	0,02	0,07
Раннелетняя	$46 \pm 12$	$-5 \pm 3$	$0,02$	<b>0,04</b>
	$42 \pm 28$	$-15 \pm 10$	0,03	0,06
Летняя	$62 \pm 11$	$-10 \pm 2$	$0,06$	<b>&lt;0,01</b>
	$49 \pm 23$	$7 \pm 6$	0,01	0,13
Позднелетняя	$86 \pm 19$	$-24 \pm 9$	$0,12$	<b>0,01</b>
	$52 \pm 18$	$-13 \pm 9$	0,05	0,06

П р и м е ч а н и е. Верхняя строка – показатели для префлорального периода, в днях; нижняя строка – то же, для периода цветения. Остальные обозн. см. в табл. 3.

Тренды продолжительности периодов сезонного развития для различных феноритмотипов

Феноритмотипы	$M \pm \sigma$	$\Delta L \pm \sigma$	$R^2$	$p_v$
Префлоральный период				
Эфемероид	$3 \pm 3$	$1 \pm 3$	0,07	0,39
Гемизфемероид	$38 \pm 8$	$0 \pm 6$	0,07	0,45
Весенне-летнезеленый	$49 \pm 22$	$-6 \pm 4$	0,01	0,06
Весенне-летне-осеннезеленый	$57 \pm 19$	$-11 \pm 5$	0,03	<b>0,02</b>
Весенне-летне-зимнезеленый	$38 \pm 21$	$3 \pm 7$	0,01	0,32
Период цветения				
Эфемероид	$15 \pm 4$	$-1 \pm 3$	0,04	0,37
Гемизфемероид	$14 \pm 5$	$-7 \pm 3$	0,16	<b>0,04</b>
Весенне-летнезеленый	$35 \pm 20$	$-5 \pm 4$	0,01	0,14
Весенне-летне-осеннезеленый	$54 \pm 26$	$5 \pm 8$	0,01	0,27
Весенне-летне-зимнезеленый	$41 \pm 27$	$-7 \pm 10$	0,01	0,23
Период вегетации				
Эфемероид	$35 \pm 5$	$1 \pm 5$	0,13	0,31
Гемизфемероид	$93 \pm 16$	$-14 \pm 9$	0,12	0,09
Весенне-летнезеленый	$144 \pm 17$	$0 \pm 4$	<0,01	0,54
Весенне-летне-осеннезеленый	$181 \pm 11$	$-10 \pm 3$	0,05	<b>&lt;0,01</b>
Весенне-летне-зимнезеленый	$185 \pm 12$	$-12 \pm 4$	0,08	<b>&lt;0,01</b>

П р и м е ч а н и е. Обозначения – см. табл. 3.

зеленых видов, составляя 12 дней. Удлинение префлорального периода и сокращение длительности цветения для этого феноритмотипа показано при  $p_v$  выше уровня значимости.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Метеоданные характеризуются высокой изменчивостью как в пределах сезона, так и в разные годы. Основные тенденции их изменения (тренды) намного меньше, чем внутрисезонные или межгодовые колебания. Выявление трендов требует усреднения по различным временным интервалам. При этом длина ряда, даты его начала и окончания имеют решающее значение для выявления тенденций. Т. Н. Sparks и А. Menzel [2002] рекомендуют рассматривать 20 лет как минимально допустимую продолжительность для обнаружения изменений.

За период исследования изменение средне-суточной температуры воздуха в теплый сезон года (с апреля по октябрь) в Новосибирске составило  $+0,16$  °С, суммарное количество осадков не изменилось ( $-0,01$  мм). Тенденция потепления климата региона проявляется уве-

личением продолжительности вегетационного периода (с температурами воздуха выше  $5$  °С) на 12 дней, хотя изменение суммы этих температур недостоверно ( $p_v = 0,69$ ). Период активной вегетации растений при температурах выше  $10$  °С удлинился на 8 дней, но сумма этих температур уменьшилась на 3,7 %. Значение гидротермического коэффициента ГТК не изменилось.

В целом изменение количества тепла и влаги в течение теплого сезона происходит неравномерно, более сухие и теплые периоды чередуются с более прохладными и влажными, в которых тренды температуры и осадков по абсолютной величине существенно превышают общие тренды. Выявленные тенденции изменения климата были слабыми ( $0 \leq R^2 \leq 0,06$ ), разнонаправленными и неустойчивыми вследствие значительных колебаний погодных факторов в масштабе от межгодовых до десятилетних. Это вполне согласуется с тенденцией замедления потепления климата в Северном полушарии, включая территорию России [Шестое национальное сообщение..., 2013; IPCC, 2014],

на фоне “паузы” 2002–2009 гг. в глобальном тренде [England et al., 2014].

Известно, что временные сдвиги в сезонных явлениях жизни растений обусловлены реакциями на изменение экологических условий (температура, фотопериод, осадки, доступность ресурсов и др.), которые могут напрямую контролировать время фенологических событий или действовать как сигналы, запускающие внутренние “биологические часы” организма [Ausín et al., 2005; Chmura et al., 2019]. Способность растений избегать экологического стресса, изменяя ритмы роста и развития, рассматривается как важный механизм их устойчивости [Трулевич, 1991; Шумик и др., 2016].

В сезонном цикле развития наиболее важными этапами, определяющими репродуктивный успех особей, являются время перехода от вегетативной фазы к цветению, а также сроки возобновления роста и окончания вегетации. Поэтому среди фенологических признаков для выявления их изменения в связи с климатическими трендами наиболее значимыми представляются сроки начала и окончания вегетации, начала цветения и продолжительность периодов: с даты весеннего отрастания до начала цветения (префлоральный период), цветения, вегетации (феноритмотип).

Анализ зависимостей показал (см. рис. 2), что многолетники синхронно реагируют на метеоусловия весны, но величина реакции тем больше, чем раньше возобновляется рост. Установлена положительная корреляция сроков отрастания с датой схода снежного покрова, особенно в ранней и средней группах ( $r = 0,48$  и  $0,38$  соответственно), с датами перехода среднесуточных температур воздуха через  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сторону повышения (средняя для всех групп) и датами их перехода через  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (высокая, особенно у ранних видов). Поздневесенние заморозки не влияют на сроки отрастания. Ранние и средние виды возобновляют вегетацию достоверно раньше на 5–6 дней.

Даты начала цветения весенних групп проявили высокую положительную корреляцию с переходом среднесуточных температур воздуха через  $5$  и  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сторону повышения, а ранневесенних видов – также со сходом снежного покрова. Фенофаза начала цветения отрицательно коррелирует с суммами температур воздуха выше  $5$  и  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ : накопле-

ние тепла после схода снежного покрова приводит к более раннему цветению многолетних растений (за исключением раннелетней группы). Кроме того, эта закономерность возрастает от более ранних сроков цветения к более поздним, достигая максимума в 10 дней у позднелетних видов. Тренды начала цветения согласованы с трендом увеличения среднесуточных температур воздуха с середины июня по середину июля на  $\Delta T_{\text{cp}} = +0,89$  при  $\Delta T_{\text{макс}} = +1,94$  на третьей неделе июня, когда летние виды вступают в фазу цветения.

Длительность префлорального периода, характеризующая интенсивность сезонного развития, достоверно сократилась у всех видов. У видов, цветущих в первой половине сезона, уменьшение составило 5–8 дней, у летних – 10 дней, тогда как позднелетние начинают цвести на 24 дня раньше. Очевидно воздействие повышенных летних температур и сухости, сопровождающее климатический тренд. Периоды цветения отличаются очень высокой вариабельностью для всех групп при трендах разного направления и различной величины.

Вероятной причиной положительного тренда для поздневесенних видов (удлинение периода цветения на неделю) может быть прохладная и влажная погода во второй половине мая – первой половине июня. Цветение ранне- и позднелетних видов проходит на фоне увеличения среднесуточных температур воздуха и сокращения осадков, поэтому заканчивается на две недели раньше. Напротив, цветение летних многолетников продлевается благодаря повышенному увлажнению с третьей недели июля по вторую неделю августа. В целом продолжительность цветения полностью согласуется с метеотрендами, отражая высокую вариабельность погодных условий сезона.

Изменения длительности фенологических периодов у разных феноритмотипов неоднозначны. У эфемероидов смещения самые незначительные ( $\pm 1$  день), что обусловлено коротким циклом сезонного развития, приходящимся на ранневесенний период с наиболее неустойчивой погодой. Наибольшие сдвиги отмечены в фенологии весенне-осеннезеленых видов: цветение начинается раньше на 11 дней ( $p_v = 0,04$ ), период цветения удлинился (только у этого феноритмотипа), а длительность вегетации сократилась на 10 дней ( $p_v =$

= 0,01). Такой же тренд продолжительности вегетации наблюдается у весенне-летне-зимнезеленых видов, следуя за трендом снегозалегания – снег на 4 дня позже сходит и на 4 дня раньше ложится.

Таким образом, полученные данные отражают заметные сдвиги во времени сезонных явлений у многолетних растений на фоне региональных климатических изменений. Согласованность фенологических трендов между собой и с метеорологическими трендами свидетельствует в пользу обоснованности результатов исследования, несмотря на то что многие  $r$ -значения выявленных трендов выше уровня значимости 0,05. В настоящее время существует острая потребность как в мониторинге фенологии, так и в анализе накопленных данных [Forrest, Miller-Rushing, 2010]. Обстоятельства и степень, в которых те или иные факторы объясняют региональные особенности реакции видов на климат, в настоящее время неизвестны. На самом деле фенология каждого вида изменяется уникальным образом в зависимости от множества факторов, что затрудняет прогнозирование будущих изменений [Primack, Miller-Rushing, 2011; Park et al., 2019].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метеорологические тренды теплого периода года в Новосибирске в течение 1996–2015 гг. свидетельствуют о потеплении климата региона, проявляющемся в изменении климатических показателей (повышении среднесуточной температуры воздуха, удлинении вегетационного периода) и характеристик сезонов: весна стала затяжной, более холодной и влажной, начало лета и начало осени – более теплыми и сухими.

Сроки начала вегетации многолетних растений положительно коррелируют с датой схода снежного покрова, датами перехода среднесуточных температур воздуха через 5 и 10 °C в сторону повышения. Выявлено запаздывание дат отрастания для всех видов, согласованное с трендом снеготаяния. Сроки начала цветения положительно коррелируют с датами перехода среднесуточных температур воздуха через 5 и 10 °C в сторону повышения (ранневесенних видов – также с датой схода снежного покрова) и отрицательно – с суммами этих температур, т. е. накоплением тепла

приводит к более раннему наступлению фенофазы. Цветение видов во всех группах, кроме раннелетней, наступает с опережением среднемноголетних дат.

Префлоральный период стал значительно короче, с усиливающейся тенденцией при переходе от весенних групп к летним, что свидетельствует об ускорении темпов развития многолетников. В то же время тренды длительности цветения сильно варьируют по величине и разнонаправленны. Изменение продолжительности фенологических периодов у видов разных феноритмотипов неодинаково. Самые незначительные изменения в сезонном цикле отмечены для эфемероидов, наибольшие – для весенне-осеннезеленых и весенне-летне-зимнезеленых видов. Для них показан достоверный тренд уменьшения длительности вегетации, повторяющий тренд снегозалегания. У весенне-осеннезеленых видов также существенно сократился префлоральный период.

В целом фенологические тренды согласованы с трендами климатических показателей и описывают 1–16 % вариабельности сроков фенофаз и длительности фенологических периодов. Остальная их изменчивость обусловлена межгодовыми и внутрисезонными колебаниями погодных факторов, а также высокой инерционностью процессов сезонного развития у многолетних растений.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по проекту АААА-А21-121011290025-2 “Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами” и в рамках бюджетного проекта № 0259-2021-0009 “Системная биология и биоинформатика: реконструкция, анализ и моделирование структурно-функциональной организации и эволюции генных сетей человека, животных, растений и микроорганизмов”. При подготовке статьи использовались материалы Биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ “Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте”, USU 440534.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Воронина Л. В., Гриценко А. Г. Климат и экология Новосибирской области. Новосибирск: СГГА, 2011. 227 с.  
Жмылева А. П., Карпухина Е. А., Жмылев П. Ю. Фенологическая реакция лесных растений на потепление климата: рано- и поздноцветущие виды // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 5–15.

- Зорина А. А., Шуйская Е. А., Куракина И. В., Волков В. П., Огурцов С. С., Степанов С. Н. Климатические причины смещения сроков цветения растений в Центральном лесном заповеднике // Поволжский экол. журн. 2020. № 1. С. 52–65. doi: 10.35885/1684-7318-2020-1-52-65
- Котеров А. Н., Ушенкова Л. Н., Зубенкова Э. С., Калинина М. В., Бирюков А. П., Ласточкина Е. М., Молдцова Д. В., Вайнсон А. А. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции // Мед. радиология и радиац. безопасность. 2019. Т. 64, № 6. doi: 10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24
- Лучицкая И. О., Белая Н. И., Арбузов С. А. Климат Новосибирска и его изменения / под ред. Р. А. Ягудина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 224 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 717 с. (Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 20).
- Трулевич Н. В. Эколого-фитоценологические основы интродукции растений. М.: Наука, 1991. 216 с.
- Фомина Т. И. Биологические особенности декоративных растений природной флоры в Западной Сибири. Новосибирск: Акад. изд-во “ГЕО”, 2012. 179 с.
- Шестое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола / А. В. Фролов, А. А. Макоско, В. Г. Блинов и др. М., 2013. 281 с.
- Ausin I., Alonso-Blanco C., Martinez-Zapater J. M. Environmental regulation of flowering // *Int. J. Dev. Biol.* 2005. Vol. 49. P. 689–705. doi:10.1387/ijdb.052022ia
- 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. P. 295–309. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x
- Bertin R. I. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change // *J. Torrey Botanical Society*. 2008. Vol. 135, N 1. P. 126–146. doi: 10.3159/07-RP-035R.1
- Chmielewski F.-M. Phenology in agriculture and horticulture // *Phenology: An integrative environmental science* / Ed. M. D. Schwartz. Second ed. 2013. P. 539–561. doi: 10.1007/978-94-007-6925-0\_29
- Chmura H. E., Kharouba H. M., Ashander J., Ehlman S. M., Rivest E. B., Yang L. H. The mechanisms of phenology: the patterns and processes of phenological shifts // *Ecol. Monogr.* 2019. Vol. 89, N 1: e01337. doi: 10.1002/ecm.1337
- Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A., Schwartz M. D. Shifting plant phenology in response to global change // *Trends in Ecol. and Evolut.* 2007. Vol. 22, N 7. P. 357–365. doi: 10.1016/j.tree.2007.04.003
- Efron B. Bootstrap methods: Another look at the jack-knife // *Ann. Stat.* 1979. Vol. 7, N 1. P. 1–26. doi: 10.1214/aos/1176344552
- England M. H., McGregor S., Spence P., Meehl G. A., Timmermann A., Cai W., Gupta A. S., McPhaden M. J., Purich A., Santoso A. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // *Nat. Climate Change*. 2014. Vol. 4. P. 222–227. doi: 10.1038/nclimate2106
- Forrest J., Miller-Rushing A. J. Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution // *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2010. Vol. 365. P. 3101–3112. doi: 10.1098/rstb.2010.0145
- Franks S. J., Weber J. J., Aitken S. N. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations // *Evolut. Applicat.* 2013. doi: 10.1111/eva.12112
- Gordo O., Sanz J. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems // *Global Change Biol.* 2010. Vol. 16. P. 1082–1106. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02084.x
- Gratani L. Plant phenotypic plasticity in response to environmental factors // *Advances in Botany*. Vol. 2014. Article ID 208747. 17 p. doi: 10.1155/2014/208747
- Hunter M. C. Using ecological theory to guide urban planting design: An adaptation strategy for climate change // *Landscape J.* 2011. Vol. 30. P. 2–11.
- Ibáñez I., Primack R. B., Ellwood E., Miller-Rushing A. J., Higuchi H., Lee S. D., Kobori H., Silander J. A. Forecasting phenology under global warming // *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2010. Vol. 365, N 1555. P. 3247–3260. doi: 10.1098/rstb.2010.0120
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Jeong S. J., Ho C. H., Gim H. J., Brown M. E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008 // *Global Change Biol.* 2011. Vol. 17. P. 2385–2399. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x
- Khanduri V. P., Sharma C. M., Singh S. P. The effects of climate change on plant phenology // *Environmentalist*. 2008. Vol. 28. P. 143–147. doi: 10.1007/s10669-007-9153-1
- Lippmann R., Babben S., Menger A., Delker C., Quint M. Development of wild and cultivated plants under global warming conditions // *Cur. Biol.* 2019. Vol. 29. P. R1326–R1338. doi: 10.1016/j.cub.2019.10.016
- McDonough MacKenzie C., Gallinat A. S., Zipf L. Low-cost observations and experiments return a high value in plant phenology research // *Appl. in Plant Sci.* 2020. Vol. 8, N 4. e11338. doi: 10.1002/aps3.11338
- Miller-Rushing A. J., Inouye D. W., Primack R. B. How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling // *J. Ecol.* 2008. Vol. 96. P. 1289–1296. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01436.x
- Park I., Jones A., Mazer S. J. PhenoForecaster: A software package for the prediction of flowering phenology // *Appl. Plant Sci.* 2019. Vol. 7, N 3. e1230. doi: 10.1002/aps3.1230
- Parmesan C., Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems // *Nature*. 2003. Vol. 421. P. 37–42. doi: 10.1038/nature01286
- Peñuelas J., Rutishauser T., Filella I. Phenology feedbacks on climate change // *Science*. 2009. Vol. 324. doi: 10.1126/science.1173004
- Primack R. B., Miller-Rushing A. J. Broadening the study of phenology and climate change // *New Phytologist*. 2011. Vol. 191. P. 307–309.
- Rai P. K. A concise review on multifaceted impacts of climate change on plant phenology // *Environmental Skeptics and Critics*. 2015. Vol. 4, N 4. P. 106–115.
- Rathcke B., Lacey E. P. Phenological patterns of terrestrial plants // *Ann. Rev. Ecol., Evolut. and Systemat.* 1985. Vol. 16. P. 179–214.

- Robbirt K. M., Davy A. J., Hutchings M. J., Roberts D. L. Validation of biological collections as a source of phenological data for use in climate change studies: a case study with the orchid *Ophrys sphegodes* // *J. Ecol.* 2011. Vol. 99. P. 235–241. doi: 10.1111/j.1365-2745.2010.01727.x
- Root T. L., Price J. T., Hall K. R., Schneider S. H., Rosenzweig C., Pounds J. A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants // *Nature*. 2003. Vol. 421. P. 57–60. doi: 10.1038/nature01333
- Singh K. On the asymptotic accuracy of Efron's bootstrap // *Ann. Statist.* 1981. Vol. 9, N 6. P. 1187–1195. doi: 10.1214/aos/1176345636
- Sparks T. H., Menzel A. Observed changes in seasons: An overview // *Int. J. Climatol.* 2002. Vol. 22. P. 1715–1725. doi: 10.1002/joc.821
- 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. P. 389–395.
- Wolkovich E. M., Cook B. I., Davies T. J. Progress towards an interdisciplinary science of plant phenology: building predictions across space, time and species diversity // *New Phytologist*. 2014. Vol. 201. P. 1156–1162. doi: 10.1111/nph.12599

## Changes in the phenology of perennial plants in Western Siberia against the background of global climate warming

E. S. FOMIN<sup>1</sup>, T. I. FOMINA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Cytology and Genetics of SB RAS  
630090, Novosibirsk, prosp. Akademika Lavrentyeva, 10  
E-mail: fomin@bionet.nsc.ru*

<sup>2</sup>*Central Siberian Botanical Garden of SB RAS  
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101  
E-mail: fomina-ti@yandex.ru*

Data on the seasonal development of 78 species of perennial plants in the Western Siberia forest-steppe due to changes in the regional climate are summarized over a 20-year period 1996–2015. It is shown that the meteorological indicators of the warm season in Novosibirsk have undergone noticeable changes: the average daily air temperature has increased by 0.16 °C, the growing season has extended by 12 days, and the period of active vegetation of plants at temperatures above 10 °C – by 8 days. Correlations of the dates of regrowth and flowering in perennials with the date of snowfall, the dates when the average daily air temperatures exceed 5 °C and 10 °C, and the sums of these temperatures were revealed. Using linear phenological trends, a delay within 2–6 days of the spring regrowth and an advance in the flowering by 2–10 days, except for early summer species, were established. A reduction of the prefloral period duration from 5 to 24 days indicated an acceleration in the rate of seasonal development in perennials against the background of the identified meteorological trends. The change in the duration of vegetation period was significant in spring-summer-fall green species and spring-summer-winter green species — 10 and 12 days, respectively. Low values of the coefficient of determination for most of the trends  $R^2 < 0.06$  showed changes in the phenology were mainly due to interannual variability.

**Key words:** climate change, meteorological trends, phenological trends, natural flora.