



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

^{1*} Фомин Э.С., ² Фомина Т.И.

¹ ИЦиГ СО РАН, ² ЦСБС СО РАН, Новосибирск,

* E-mail: fomin@bionet.nsc.ru

Мотивация и цели. Глобальное потепление рассматривается большинством исследователей как доминирующий фактор, влияющий на показатели биоразнообразия, сдвиг и изменение длительности фенологических событий [1]. Изменения в фенологии растений влияют на продуктивность, межвидовую конкуренцию, сезонную активность опылителей, выделение пыльцы [2], а также имеют последствия для распространения вредителей и болезней растений [3]. Ожидается, что влияние потепления на рост и развитие растений, особенно в сочетании с другими абиотическими и биологическими стрессорами — засухой и усилением пресса патогенов — усугубит проблемы как для дикорастущих, так и для культивируемых видов [4]. Целью исследования явилось выявление отклонений локальных метеотрендов от глобальных и оценка изменчивости сроков фенологического развития многолетних растений в связи с локальным трендом изменения климата Новосибирска.

Методы и алгоритмы. Работа выполнена в ЦСБС СО РАН (55°2'29,4" с.ш., 82°56'4,6" в.д.). Фенологические наблюдения выполнялись над 78 видами многолетних растений из коллекции декоративных видов природной флоры с 1996 по 2015 гг. Климатические данные получены с метеостанции Огурцово (№ 29638). Данные наблюдений обрабатывались статистическими методами с использованием пакетов R и MS Excel. Метеорологические и фенологические тренды и оценка их достоверности рассчитывались методом бутстрэппинга [5].

[1] Зорина А. А. и др. Климатические причины смещения сроков цветения растений в Центрально-лесном заповеднике. Поволжский экологический журнал. 2020. № 1. С. 52–65.

[2] Badeck, F.-W. et al. Responses of spring phenology to climate change, *New Phytol.* 2004; 162: 295-309.

[3] Forrest J. et al. Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2010; 365: 3101–3112.

[4] Lippmann R. et al. Development of wild and cultivated plants under global warming conditions. *Curr. Biol.* 2019; 29: R1326–R1338.

[5] Efron B. Bootstrap methods: Another look at the jack-knife. *Ann. Stat.* 1979; 7(1): 1–26.



Метеорологические тренды

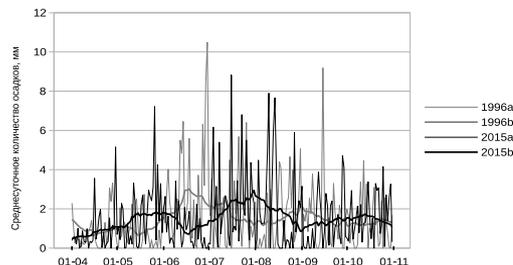
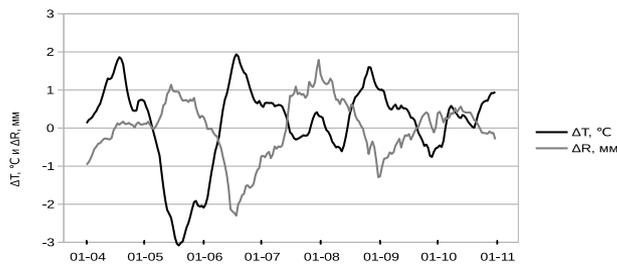
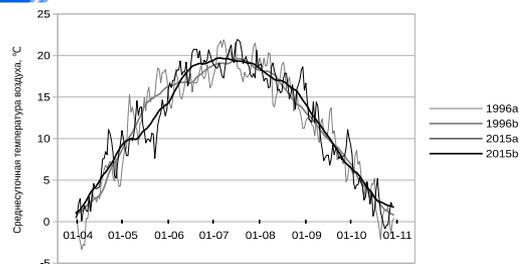


Рис. 1. Изменение метеорологических показателей в Новосибирске за период 1996–2015 гг. По оси абсцисс – календарные даты; А – среднесуточная температура воздуха (1996а и 2015а – посуточные значения тренда этих лет; 1996б и 2015б – скользящее среднее тренда в окне шириной 30 суток); В – среднесуточное количество осадков; С – разность значений скользящих средних для трендов среднесуточной температуры воздуха $\Delta T = T_{2015b} - T_{1996b}$ и осадков $\Delta R = R_{2015b} - R_{1996b}$.

Выводы

- 1) Метеорологические тренды теплого сезона года в Новосибирске в течение 1996–2015 гг. свидетельствуют о потеплении климата региона.
- 2) Тенденция потепления климата в Новосибирске характеризуется увеличением продолжительности вегетационного периода (с температурами воздуха выше 5 °C) на 12 дней, хотя изменение суммы этих температур недостоверно ($p_v = 0.69$).
- 3) Период активной вегетации растений при температурах выше 10 °C удлинился на 8 дней, однако, сумма этих температур уменьшилась на 3.7 %.
- 4) Значение гидротермического коэффициента ГТК не изменилось.

Табл. 1. Метеорологические тренды теплого периода в Новосибирске (1996–2015 гг.)

Показатель	$M \pm \sigma$	Тренд	R^2	p_v
Сход снежного покрова	13.04±8	+4	0.02	0.01
Последний заморозок в воздухе	12.05±8	+5	0.03	<0.01
Первый заморозок в воздухе	23.09±7	+1	<0.01	0.42
Установление снежного покрова	01.11±10	-4	0.01	0.07
Период с температурами выше 5 °C	165±14	+12	0.06	<0.01
Период с температурами выше 10 °C	136±11	+8	0.04	<0.01
Сумма температур выше 5 °C	2518±169	-13	<0.01	0.69
Сумма температур выше 10 °C	2242±200	-85	0.02	0.02
Гидротермический коэффициент	0.91±0.37	-0.09	<0.01	0.21

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



Фенологические тренды

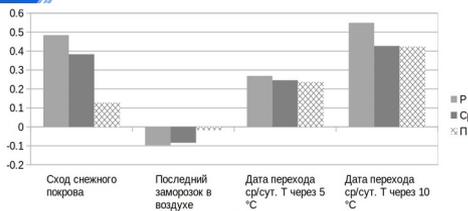


Рис. 2. Корреляция метеоявлений с началом вегетации многолетников за период 1996-2015 гг. в Новосибирске. Группы по срокам весеннего отрастания: Р – ранняя, Ср – средняя, П – поздняя.

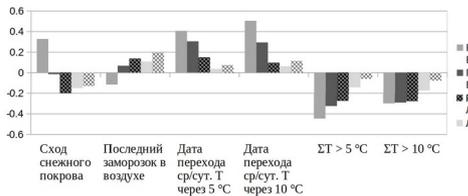


Рис.3. Корреляции метеоявлений с началом цветения многолетников за период 1996-2015 гг. в Новосибирске. Группы по срокам начала цветения: РВ – ранневесенняя, ПВ – поздневесенняя, РЛ – раннелетняя, Л – летняя, ПЛ – позднелетняя.

Табл. 2. Тренды начала вегетации и начала цветения для различных фенологических групп (ФГ)

ФГ	M ± σ	ΔL ± σ	R ²	p _v
Начало вегетации (отрастание)				
Р	28.04 ± 7	5±1	0.04	<0.01
Ср	04.05 ± 8	6±2	0.06	<0.01
П	14.05 ± 6	2±3	0.03	0.20
Начало цветения				
РВ	03.05 ± 8	-2±3	0.02	0.29
ПВ	28.05 ± 8	-3±2	0.02	0.09
РЛ	16.06 ± 8	1±2	0.01	0.40
Л	04.07 ± 9	-4±2	0.02	0.02
ПЛ	29.07 ± 13	-10±7	0.05	0.07

(M ± σ) – средние даты фенофаз отрастания и начала цветения ± стандартное отклонение; (ΔL ± σ) – смещение дат фенофаз в днях, при этом отрицательное значение означает более раннее наступление фенофазы, а положительное – более позднее; r² – коэффициент детерминации тренда; p_v – уровень значимости.

Табл. 3. Тренды продолжительности фенологических периодов для видов с разными сроками начала цветения

ФГ	M ± σ	ΔL ± σ	R ²	p _v
Префлоральный период				
РВ	7±6 20±8	-8±2 -1±4	0.13 0.02	<0.01 0.46
ПВ	29±10 25±17	-6±3 7±5	0.03 0.02	0.04 0.07
Период цветения				
РЛ	46±12 42±28	-5±3 -15±10	0.02 0.03	0.04 0.06
Л	62±11 49±23	-10±2 7±6	0.06 0.01	<0.01 0.13
ПЛ	86±19 52±18	-24±9 -13±9	0.12 0.05	0.01 0.06

Верхняя строка – показатели для префлорального периода, в днях; нижняя строка – то же, для периода цветения. Обозначения – см. табл. 2.

Табл. 4. Тренды продолжительности периодов сезонного развития для различных феноритмотипов (ФРТ)

ФРТ	M ± σ	ΔL ± σ	R ²	p _v
Префлоральный период				
Э	3±3	1±3	0.07	0.39
ГЭ	38±8	0±6	0.07	0.45
ВЛЗ	49±22	-6±4	0.01	0.06
ВЛОЗ	57±19	-11±5	0.03	0.02
ВЛЗЗ	38±21	3±7	0.01	0.32
Период цветения				
Э	15±4	-1±3	0.04	0.37
ГЭ	14±5	-7±3	0.16	0.04
ВЛЗ	35±20	-5±4	0.01	0.14
ВЛОЗ	54±26	5±8	0.01	0.27
ВЛЗЗ	41±27	-7±10	0.01	0.23
Период вегетации				
Э	35±5	1±5	0.13	0.31
ГЭ	93±16	-14±9	0.12	0.09
ВЛЗ	144±17	0±4	<0.01	0.54
ВЛОЗ	181±11	-10±3	0.05	<0.01
ВЛЗЗ	185±12	-12±4	0.08	<0.01

Э - Эфемероид, ГЭ - Гемизфемероид, ВЛЗ - Весенне-летнезеленый, ВЛОЗ - Весенне-летне-осеннезеленый, ВЛЗЗ — Весенне-летне-зимнезеленый



Выводы

- 1) Сроки начала вегетации многолетников положительно коррелируют с датами схода снежного покрова и перехода среднесуточных температур воздуха через 5 °С и 10 °С в сторону повышения. Выявлено запаздывание дат отрастания для всех видов в пределах 2–6 дней, согласованное с трендом снеготаяния.
- 2) Сроки начала цветения положительно коррелируют с датами перехода среднесуточных температур воздуха через 5 °С и 10 °С в сторону повышения (ранневесенних видов – также с датой схода снежного покрова) и отрицательно – с суммами этих температур, т.е. накопление тепла приводит к более раннему наступлению фенофазы. Цветение видов во всех группах, кроме раннелетней, начинается раньше на 2–10 дней.
- 3) Префлоральный период стал короче на 5–24 дней (с возрастающими значениями при переходе от весенних групп к летним), что свидетельствует об ускорении темпов развития многолетников.
- 4) 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, на 10 и 12 дней, соответственно, повторяющий тренд снегозалегаия. У весенне-осеннезеленых видов, кроме того, на 11 дней сократился префлоральный период.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по проектам АААА-А21-121011290025-2 и №0259-2021-0009 При подготовке статьи использовались материалы Биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте», USU 440534.