

УДК 581.5+57.04

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ СРОКОВ ЦВЕТЕНИЯ РАСТЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОМ ЗАПОВЕДНИКЕ

А. А. Зорина¹, Е. А. Шуйская², И. В. Куракина²,
В. П. Волков², С. С. Огурцов², С. Н. Степанов²

¹ *Петрозаводский государственный университет
Россия, 185910, Петрозаводск, просп. Ленина, 33
E-mail: zor-nastya@yandex.ru*

² *Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник
Россия, 172521, Тверская обл., пос. Заповедный
E-mail: elenashuy@rambler.ru*

Поступила в редакцию 20.03.2019 г., после доработки 9.05.2019 г., принята 30.10.2019 г.

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 экологический журнал. 2020. № 1. С. 52 – 65. DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-1-52-65>

Проведен анализ метеорологических рядов и фенологических данных в рамках экологического мониторинга на территории южно-таежного Центрально-Лесного заповедника. За период 1984–2017 гг. среднегодовая температура воздуха составила $4.63 \pm 0.41^\circ\text{C}$, среднегодовой показатель осадков – 2.14 ± 0.12 мм/день. Для 8 из 43 (19%) климатических характеристик обнаружены достоверные линейные тренды изменчивости: увеличение температуры воздуха в июле, августе, сентябре, декабре; увеличение температуры почвы в декабре; повышение количества осадков в ноябре и декабре; понижение осадков в сентябре. Выявлены три причины их направленных многолетних изменений: смещение сроков наступления зимы, нарушение внутригодовой динамики климатических изменений и смена типа осадков при удлинении осени – снег заменяется дождем. Из 11 видов сосудистых растений статистическая значимость многолетнего смещения фенодат доказана для *Anemone nemorosa*: чем длиннее осень и мягче начало зимы, тем раньше наступают сроки ее цветения. Рассмотрены два типа классификаций растений при выявлении межвидовой синхронности в варьировании фенологических событий. Проведена оценка компонентов изменчивости наступления феноявлений: на долю многолетних трендов смещения сроков наступления фенодат, обусловленных изменениями в климатической системе заповедника, приходится от 20 до 68% от общей дисперсии признака; межгодовые климатические флуктуации объясняют 5 – 34% ее изменчивости; высока доля изменчивости под действием неучтенных факторов (21 – 64%). Виды с высокой долей многолетней компоненты изменчивости признака (*Anemone nemorosa*: более 60%) рекомендуется использовать в качестве индикаторов климатических изменений в условиях исследуемой территории.

Ключевые слова: мониторинг, изменение климата, смещение феноявлений, компоненты изменчивости, классификация, сосудистые растения.

DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-1-52-65>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия изменение климата и перераспределение теплового баланса Земли рассматриваются в качестве доминирующего фактора, определяющего показатели биоразнообразия, а также смещение времени наступления биологических событий (Пузаченко, 2012; Ovaskainen et al., 2013). При этом реакцию биоты оценивают по степени отклонения сроков проявления феноявлений (Скорородова, Щербаков, 2011; Cleland et al., 2007). В целом отмечается неоднозначная реакция компонентов экосистем на изменения в глобальной климатической системе (Минин и др., 2017; Sherry et al., 2007; Ovaskainen et al., 2013), которые могут значительно трансформироваться на локальном уровне (Зорина и др., 2018).

Значимость экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях (ООПТ), где большинство экосистем находится в естественном состоянии при минимальном антропогенном влиянии, высока и неоспорима. Однако возникают противоречивые результаты при анализе метеорологических рядов и фенологических данных (Минаева и др., 2001; Пузаченко, 2012). Фиксация феноявлений, ведение «Летописи природы» Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (1984 – 2017), создание баз данных при проведении многолетних научно-исследовательских работ во многом зависят от локальных условий местности, методики сбора информации и человеческого фактора (Пузаченко, 2012; Прокошева, 2017; Parmesan, 2007).

Цель данной статьи – оценка многолетней изменчивости сроков наступления феноявлений сосудистых растений под влиянием изменений в климатической системе Центрально-Лесного заповедника.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Проведен анализ метеорологических рядов и фенологических данных Центрально-Лесного заповедника (далее Заповедник) за период 1984 – 2017 гг. Природный комплекс ООПТ типичен для южно-таежной подзоны и является эталоном первичного биогеоценотического покрова обширной области моренного рельефа центральной части Русской равнины. Здесь сохранился уникальный, единственный в Европе, исторически сложившийся комплекс коренных ельников. Заповедник расположен в западной подобласти лесной атлантико-континентальной климатической области, для которой определяющим фактором является воздействие теплового Северо-Атлантического течения (Минаева и др., 2001).

Исходными данными послужили материалы метеорологических и фенологических наблюдений, выполняемых по программе ведения «Летописи природы» заповедника на базе собственного метеопоста «Лесной заповедник», основанного в 1961 г. и действующего по настоящее время в сети Росгидромета (термические показатели воздуха срочные, остальные – восьмисрочные).

Проведен анализ климатических характеристик, связанных с изменениями температуры и осадков: температура воздуха (°C) среднегодовая и отдельно за 12 месяцев; минимальная температура почвы для каждого месяца; среднегодовое и среднемесячное количество осадков (мм) (РД 52.04.614-2000; РД 52.33.725-2010).

Для формирования метеорологических рядов и климатических параметров использовались медианные значения. Применение медианы вместо средней арифметической обусловлено несоответствием большинства выборок закону нормального распределения (критерий Пирсона и Шапиро – Уилка; Коросов, 2007) и их небольшими объемами. Медиана является наиболее представительной и устойчивой статистической характеристикой (центральное значение упорядоченного ряда), на которую слабо влияют выскакивающие («срочные») варианты (Коросов, 2007). Она более подходит для выявления общего тренда (направления) многолетних изменений, сглаживая резкие перепады температур или осадков в течение суток, месяца и года.

Сбор фенологических данных в Заповеднике проводится по стандартной методике (Шульц, 1981; Филонов, Нухимовская, 1985). Только для 11 (52%) фоновых видов сосудистых растений, включенных в многолетний мониторинг, удалось восстановить непрерывный ряд фенодат за 34 года исследований (с 1984 по 2017 г.). Названия видов приведены в соответствии с базой The Plant List (2018).

Проанализированы смещения сроков цветения (начало пыления и цветения) для 11 видов растений двух жизненных форм: деревья в смешанных лесах (*Alnus incana* (L.) Moench – ольха серая, *Corylus avellana* L. – лещина обыкновенная, *Malus domestica* Borkh. – яблоня домашняя, *Prunus padus* L. – черёмуха обыкновенная, *Sorbus aucuparia* L. – рябина обыкновенная); травянистые многолетники (*Anemone nemorosa* L. – ветреница дубравная в ельниках неморальных, *Epilobium angustifolium* L. – кипрей, или иван-чай узколистный на вырубках, *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. – лабазник вязолистный в ельнике черноольховом, на лугу, *Taraxacum officinale* F.H.Wigg. – одуванчик лекарственный в рудеральном биотопе, *Trollius europaeus* L. – купальница европейская на лугу, *Tussilago farfara* L. – мать-и-мачеха обыкновенная в рудеральном биотопе).

Фенологические отклики зависят от микроклимата конкретного места наблюдения, поэтому расчет медиан (медианной даты начала феноявления) проводился для выборок, включающих данные из разных местообитаний (от 3 до 8) с учетом данных по 11 фенологическим маршрутам и 4 фенологическим площадкам. В результате для каждого вида полученная дата начала феноявления характеризует все разнообразие его возможных местообитаний на территории Заповедника.

Для климатических и фенологических характеристик указаны стандартные ошибки. Использование медианы при обработке исходных данных и несоответствие выборок закону нормального распределения определили необходимость применения непараметрических показателей и методов вариационной статистики: коэффициент корреляции Спирмена, непараметрический дисперсионный анализ. Среди методов многомерной статистики применяли кластерный анализ. Для статистического подтверждения наличия кластеров на рисунках указан уровень бутстреп-поддержки в точках ветвления дендрограмм при количестве итераций для бутстрепинга равном 10000 (Шитиков, Розенберг, 2013).

В методе главных компонент после расчета факторных нагрузок для более эффективного их сопоставления проводили нормирование – в каждой компоненте по отдельности все нагрузки делили на модуль максимального значения (Коросов,

2007). Относительная величина позволяет применить простой критерий оценки достоверности отличия от нуля, для этого она должна быть по модулю больше 0.7. Статистическая обработка выполнялась в программах Microsoft Excel 2010, STATGRAPHICS Plus 5.0 и пакете PAST версии v3.17.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменчивость метеопоказателей. За 34-летний период среднегодовая температура воздуха в Заповеднике составила $4.63 \pm 0.41^\circ\text{C}$, анализ тренда многолетних изменений показывает постепенное ее увеличение со средней скоростью $0.02^\circ\text{C}/\text{год}$ ($r = 0.32$, $p = 0.07$). Минимальная среднегодовая температура поверхности почвы за анализируемый период составила -0.51 ± 0.48 , среднегодовой показатель осадков – 2.14 ± 0.12 мм/день.

Межгодовые флуктуации большинства климатических характеристик (81%) носят стохастический характер: многолетние тренды их изменчивости недостоверны. Однако из 43 проанализированных метеорологических рядов для 8 (19%) наблюдаются достоверные многолетние изменения с 1984 по 2017 г.: увеличение температуры воздуха в июле, августе, сентябре, декабре; температуры почвы в декабре; повышение количества осадков в ноябре и декабре; понижение осадков в сентябре (табл. 1).

Дать наиболее полное описание изменениям в климатической системе Заповедника с помощью минимального числа неких расчетных признаков позволяет метод главных компонент, который был проведен для климатических характеристик с достоверными трендами изменчивости за исследуемый промежуток времени. Первая главная компонента имеет наибольшую дисперсию (2.8 из 8, или 35% информации), на вторую и третью компоненты также приходится значимая ее часть – 21 и 17% соответственно (табл. 2).

Варьирование восьми значимых климатических характеристик удалось заметить тремя расчетными факторами. В первой компоненте факторные нагрузки пяти переменных по модулю больше 0.7, причем осадки в сентябре противопоставляются температурам в июле, сентябре и декабре. Таким образом, первая компонента отражает «смещение сроков наступления зимы»: более теплая осень и начало зимы сопровождаются уменьшением количества осадков в начале осени.

Таблица 1

Климатические характеристики
Центрально-Лесного заповедника
с достоверными линейными трендами изменчивости
за период 1984 – 2017 гг.

Месяцы	<i>r</i>	<i>p</i>	Скорость изменения
Температура воздуха			
Июль	0.42	0.01	0.03 °C/год
Август	0.44	0.01	0.08
Сентябрь	0.37	0.03	0.03
Декабрь	0.37	0.03	0.02
Температура почвы минимальная			
Декабрь	0.43	0.01	0.07 °C/год
Осадки			
Сентябрь	-0.41	0.01	-0.05 мм/год
Ноябрь	0.38	0.03	0.02
Декабрь	0.41	0.02	0.06

Примечание. *r* – коэффициент корреляции Спирмена, показывающий зависимость величины признака от года исследования, *p* – уровень значимости.

Факторные нагрузки второй главной компоненты подчеркивают значимость повышения температуры в декабре, несмотря на многолетний положительный тренд изменения температуры со второй половины лета и количества осадков в

Таблица 2

Нормированные факторные нагрузки компонентного анализа климатических характеристик с достоверными трендами изменчивости

Месяцы	Факторные нагрузки		
	a_1	a_2	a_3
Температура воздуха			
Июль	-0.88	-0.84	0.67
Август	-0.58	-0.86	0.09
Сентябрь	-0.82	-0.47	-0.28
Декабрь	-0.97	1.00	-0.37
Температура почвы минимальная			
Декабрь	-0.99	0.98	-0.30
Осадки			
Сентябрь	1.00	0.28	-0.14
Ноябрь	-0.45	-0.71	-1.00
Декабрь	-0.57	0.51	0.98
S^2	2.8	1.7	1.3
$S^2, \%$	35	21	17

Примечание. Достоверное отличие от нуля отмечено полужирным начертанием значений факторных нагрузок; курсивом выделены дисперсии главных компонент (S^2) и их информационная значимость ($S^2, \%$)

торные нагрузки по третьей главной компоненте (см. табл. 2) показывают противопоставление осадков в ноябре и декабре, что можно объяснить изменением их качественного состава: снег заменяется дождем. Третью компоненту можно охарактеризовать как «смена типа осадков при удлинении осени».

В результате были выделены три причины достоверных многолетних изменений климатических характеристик на территории Заповедника за период 1984 – 2017 гг.: «смещение сроков наступления зимы», «нарушение внутригодовой динамики климатических изменений» и «смена типа осадков при удлинении осени». Это противоречит заключению Росгидромета России о том, что осенние сезоны в последние годы стали более холодными, а весенние – потеплели (Изменение климата России..., 2018).

Изменчивость фенодат. Анализ фенодат одиннадцати видов сосудистых растений показал, что для большинства фенологических явлений (10 из 11) наблюдается отрицательный (в сторону более раннего начала события) линейный многолетний тренд изменчивости. Положительный линейный тренд начала цветения *Epilobium angustifolium* статистически недостоверен (табл. 3).

Статистическую значимость смещения фенодат удалось доказать только для одного вида – раньше наступают сроки цветения *Anemone nemorosa* ($r = -0.59$, $p = 0.001$; см. табл. 3). Подобная закономерность уже была отмечена для других видов растений (Кузнецова и др., 2014).

ноябре. Выявленная закономерность нарушает обычную внутригодовую флуктуацию климатических параметров, когда высокие летние температуры сменяются существенным похолоданием в ноябре и декабре с выпадением снега. Следовательно, вторая главная компонента характеризует «нарушение внутригодовой динамики климатических изменений» (см. табл. 2).

Увеличение температуры в конце лета, осенью и в начале зимы приводит к достоверному изменению количества осадков: уменьшение их количества в начале осени (сентябре) компенсируется их повышением в ноябре – декабре (см. табл. 1). Однако нормированные фак-

Таблица 3

Характеристика фенологических явлений фоновых видов сосудистых растений
Центрально-Лесного заповедника за 34-летний период

Название вида	Феноявление	Средняя дата	r^{**}	p
<i>Alnus incana</i>	Начало пыления	11.04±9* (11 апреля ± 9 дней)	-0.18	0.32
<i>Anemone nemorosa</i>	Начало цветения	22.04±8	-0.59	0.00
<i>Epilobium angustifolium</i>		27.06±8	0.07	0.79
<i>Corylus avellana</i>		12.04±10	-0.19	0.26
<i>Filipendula ulmaria</i>		27.06±9	-0.04	0.80
<i>Malus domestica</i>		18.05±6	-0.24	0.19
<i>Prunus padus</i>		11.05±7	-0.12	0.58
<i>Sorbus aucuparia</i>	Начало цветения	26.05±8	-0.02	0.93
<i>Taraxacum officinale</i>		10.05±6	-0.15	0.40
<i>Trollius europaeus</i>		15.05±4	-0.20	0.27
<i>Tussilago farfara</i>		11.04±8	-0.18	0.31

Примечание. * – стандартная ошибка; ** – коэффициент корреляции Спирмена (полу-жирное начертание при $p < 0.05$).

Определение наличия межвидовых группировок, характеризующихся синхронностью в варьировании фенологических процессов, сначала проводилось по апробированной методике (Зорина и др., 2018) с помощью кластерного анализа календарных дат, переведенных в непрерывный ряд чисел, на основе метода ближайшего соседа и евклидовой меры расстояния (рис. 1).

Несмотря на то, что в основу классификации заложены сроки начала феноявлений, многолетние тренды изменчивости и их направленности (отрицательный, положительный или колеблется около нуля), два кластера сосудистых растений сформировались на основе одного признака – начала цветения. Первый класс включает раннецветущие виды (Cav, Ain, An, Tf), второй – все остальные растения. Классификация растений совсем не связана с их жизненной формой, эколого-морфологическими признаками, условиями их обитания, не соответствует экологическим группам по отношению к факторам среды, что указывает на необходимость изменения подхода к кластеризации (Зорина и др., 2018).

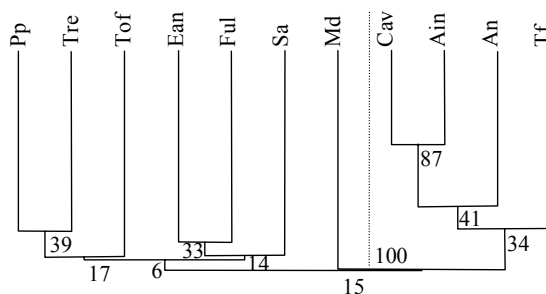


Рис. 1. Дендрограмма сходства растений по динамике фенодат за период 1984 – 2017 гг. в Центрально-Лесном заповеднике, полученная методом ближайшего соседа по матрице нормированных евклидовых дистанций с нанесенными оценками бутстреп-вероятностей ветвей; пунктиром разделены кластеры растений с доверительной вероятностью > 95%: Pp – *Prunus padus*, Tre – *Trollius europaeus*, Tof – *Taraxacum officinale*, Ean – *Epilobium angustifolium*, Ful – *Filipendula ulmaria*, Sa – *Sorbus aucuparia*, Md – *Malus domestica*, Cav – *Corylus avellana*, Ain – *Alnus incana*, An – *Anemone nemorosa*, Tf – *Tussilago farfara*

Варьирование сроков наступления фенодат обусловлено, как минимум, двумя причинами: влиянием многолетних изменений климатических условий и межгодовыми флуктуациями – отличиями климатических параметров смежных лет. Оценка климатических изменений может зависеть от выбора точки отчета (Сапельникова, Базильская, 2015; Минин и др., 2017) и периода исследований. Результаты редко совпадают даже для одного и того же вида при неодинаковой и небольшой длине временного ряда. Например, анализ смещения дат начала цветения *A. nemorosa* за период 2006 – 2016 гг. на территории Заповедника не показал достоверных изменений. Продолжительность цветения затягивается при жарких засухах (2015 г.) и при раннем наступлении весны (2007 и 2014 гг.). Быстрое прохождение цветения наблюдается как при «холодных» засухах (2006 г.), так и большом количестве осадков (2011 и 2016 гг.). Таким образом, влияние межгодовых климатических флуктуаций нарушает выявление многолетних трендов смещения фенодат.

Для оценки двух компонентов изменчивости в наступлении фенодат – межгодовые климатические флуктуации (фактор *B*) и многолетние тренды изменений, предположительно связанные с изменениями в климатической системе на глобальном уровне (фактор *A*), – был проведен двухфакторный дисперсионный анализ. Схема организации факторов в градации включает деление 34-летней последовательности фенодат для определенного вида на 6 градаций фактора *A*, в каждой из которых по 5 (в последней – четыре) градаций фактора *B*. Таким образом, межгодовые флуктуации дат начала феноявления в зависимости от погодных условий конкретного года исследования характеризуются по степени их изменчивости в течение пяти последовательных лет наблюдений. Вторую компоненту изменчивости, обусловленную глобальными климатическими тенденциями, оценивают по интенсивности смещения фенодат при смене одного пятилетнего периода другим в течение 34-летнего мониторинга. Оценки компонентов изменчивости наступления феноявлений одиннадцати видов сосудистых растений Заповедника представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оценки компонентов изменчивости наступления феноявлений
11 видов сосудистых растений Центрально-Лесного заповедника за 34-летний период

Вид	Компоненты изменчивости (% от общей дисперсии признака)			Принадлежность вида к кластерам	
	Фактор <i>A</i> *	Фактор <i>B</i> *	Неучтенные*	по началу цветения	по соотношению компонентов изменчивости
<i>Alnus incana</i>	43	13	44	I	IV
<i>Anemone nemorosa</i>	68	11	21	I	V
<i>Corylus avellana</i>	29	16	55	I	I
<i>Tussilago farfara</i>	27	34	39	I	II
<i>Epilobium angustifolium</i>	39	22	39	II	III
<i>Filipendula ulmaria</i>	20	16	64	II	I
<i>Prunus padus</i>	34	13	54	II	I
<i>Sorbus aucuparia</i>	56	10	34	II	V
<i>Malus domestica</i>	34	5	61	II	I
<i>Trollius europaeus</i>	40	23	37	II	III
<i>Taraxacum officinale</i>	42	10	48	II	IV

Примечание. * – описание факторов см. в тексте.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ СРОКОВ ЦВЕТЕНИЯ РАСТЕНИЙ

Результаты подтвердили достоверное влияние фактора *A* (многолетние климатические изменения) на смещение фенодат *A. nemorosa* ($p = 0.001$), при этом на данную компоненту изменчивости приходится 68% от общей дисперсии признака, тогда как доля межгодовых флуктуаций составляет 11% (см. табл. 4). Еще одна компонента изменчивости – «погрешность» в 21% – представляет собой долю неучтенных факторов.

Таким образом, оценка вариации признаков с использованием двухфакторно-го дисперсионного анализа (см. табл. 4) позволила оценить не две, а три компоненты изменчивости в наступлении феноявлений. Многолетние тренды смещения фенодат предположительно связаны с изменениями в климатической системе заповедника, что, в свою очередь, обусловлено изменениями климатических параметров на глобальном уровне. Межгодовые флуктуации определяются отличиями климатических параметров смежных лет, на которые влияют общая циркуляция атмосферы, воздушные течения, рельеф земной поверхности и т.д. Они формируют краткосрочные состояния атмосферы, т.е. погоду (Хромов, Петросянц, 2001).

Третья компонента изменчивости – «погрешность» – представляет собой долю неучтенных факторов, для оценки которых недостаточно данных. К подобным факторам можно отнести эффект сочетанного действия двух предыдущих компонентов изменчивости, методическую ошибку, случайное варьирование фенодат в пределах нормы реакции вида. Сопrotивляемость вида изменениям факторов среды характеризуется экологической пластичностью организмов (экологической валентностью) или степенью приспособляемости вида (Шилов, 2003).

Разное соотношение компонентов изменчивости наступления феноявлений одиннадцати сосудистых растений Заповедника за 34-летний период позволило оценить вклад многолетних изменений, межгодовых флуктуаций и неучтенных факторов в общую дисперсию признаков и провести кластеризацию видов (см. табл. 4, рис. 2). В методе Уорда (англ. Ward's method) для оценки расстояний между кластерами используются методы дисперсионного анализа и образуются кластеры приблизительно равных размеров с минимальной внутрикластерной вариацией.

Высокая экологическая валентность (более 50%) таких растений, как *Corylus avellana*, *Prunus padus*, *Filipendula ulmaria*, *Malus domestica*, существенно снижает значимость других компонентов изменчивости (особенно межгодовых флуктуаций) наступления феноявлений. Ко второму кластеру относится только

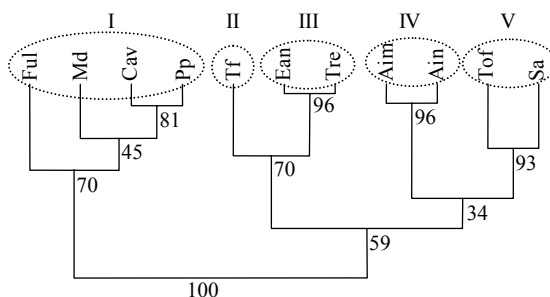


Рис. 2. Дендрограмма сходства растений по соотношению компонентов изменчивости наступления феноявлений за период 1984 – 2017 гг. в Центрально-Лесном заповеднике, полученная методом Уорда, с нанесенными оценками бутстреп-вероятностей ветвей; пунктиром с римскими цифрами отмечены кластеры растений с доверительной вероятностью > 95% и > 90%; условные обозначения см. рис. 1

один вид *Tussilago farfara*, у которого соотношение всех трех компонентов изменчивости существенно не отличается. Третья группа включает *Epilobium angustifolium* и *Trollius europaeus* – виды, сопоставимые в процентном соотношении по фактору А и неучтенным факторам, доля фактора В более 20%.

Для *Alnus incana* и *Taraxacum officinale* многолетние смещения сроков цветения практически соответствуют изменчивости неучтенных факторов при низкой доле межгодовых флуктуаций (см. табл. 4, рис. 2). Возможно, некий компонент «погрешности» коррелирует с многолетними изменениями сроков фенодат. В пятую группу с высокой долей многолетних изменений, кроме *Anemone nemorosa* с достоверным трендом смещения сроков фенодат за 34-летний период, входит еще один вид – *Sorbus aucuparia* (с доверительной вероятностью > 90%), многолетняя значимость изменения фенодат которой нарушается влиянием «неучтенных факторов» (см. табл. 4, рис. 2). Вероятно, в данном случае влияние «погрешности» обусловлено не высокой экологической пластичностью вида, а методической ошибкой сбора данных (человеческим фактором, особенно если сбор полевой информации проводится несколькими исследователями): определение даты начала цветения травянистого цветкового растения *Anemone nemorosa* определяется с большей точностью, чем дерева (реже кустарника) *Sorbus aucuparia*. В связи с этим определение «неучтенных факторов», их выявление и анализ обретают особую актуальность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Локальные изменения в климатической системе Заповедника за период 1984 – 2017 гг. связаны с более поздним наступлением осени и зимы, что подтверждается достоверными многолетними изменениями 19% климатических характеристик. Направленные многолетние смещения фенодат для одного вида из 11 сосудистых растений свидетельствуют о слабой реакции биоты на изменения в глобальной климатической системе.

Оценка компонентов изменчивости наступления феноявлений изученных растений и анализ их соотношения в общей дисперсии позволили апробировать новую классификацию видов, среди достоинств которой можно выделить следующие:

- универсальность – возможность использования для любых признаков разных видов;
- возможность оценки реакции признака на следующие факторы: многолетние изменения климатических систем и межгодовые флуктуации климатических характеристик;
- определение климатических индикаторов (видов с высокой долей многолетней компоненты изменения наступления феноявления);
- перспективность метода: определение оптимального периода наблюдений для оценки реакции биоты на изменения в глобальной климатической системе; изучение компоненты изменчивости «неучтенные факторы» и т.д.

Авторы выражают благодарность сотрудникам метеостанции «Лесной заповедник» Т. П. Голубцовой и Е. Д. Коробову за консультации по анализу метеорологических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зорина А. А., Шуйская Е. А., Куракина И. В., Огурцов С. С., Степанов С. Н. Реакция биоты на локальные климатические изменения в Центрально-Лесном заповеднике // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2018. № 1. С. 58 – 77.

Изменение климата России / Росгидромет. М., 2018. URL : http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=32&Itemid=75&lang=ru/ (дата обращения: 25.08.2018).

Коросов А. В. Специальные методы биометрии. Петрозаводск : Изд-во Петрозавод. гос. ун-та, 2007. 364 с.

Кузнецова В. В., Минин А. А., Голубева Е. И. Фенологические явления в системе биоиндикации климатических трендов // Проблемы региональной экологии. 2014. № 5. С. 66 – 71.

Летопись природы Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Книги 24 – 57 (1984 – 2017). Архив заповедника (Рукописи). Заповедный : Центрально-Лесной государственный заповедник, 1984 – 2017.

Минаева Т. Ю., Истомина А. В., Абражко В. И., Баженова Т. П., Кораблев Н. П., Кураева Е. Н., Куракина И. В., Пугачевский А. В., Русанович Н. Р., Шапошников Е. С. К изучению реакции биоты Центрально-Лесного заповедника на изменения климата // Влияние изменения климата на экосистемы / ред. А. О. Кокорин, А. В. Кожаринов, А. А. Минин. М. : Русский университет, 2001. С. 87 – 100.

Минин А. А., Ранькова Э. Я., Рыбина Е. Г., Буйволово Ю. А., Сапельникова И. И., Филатова Т. Д. Феноиндикация изменений климата за период 1976 – 2015 гг. в центральной части европейской территории России : береза бородавчатая (повислая) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.)), черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 3. С. 5 – 22.

Прокошева И. В. Динамика фенологических процессов в горнотаежном поясе Вишерского заповедника (Северный Урал) под влиянием климатических изменений // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 2. С. 40 – 55. DOI: <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-2-40-55>

Пузаченко Ю. Г. Вековые изменения климата в районе заповедника // Тр. Центрально-Лесного гос. природного биосферного заповедника / под ред. А. С. Желтухина. Великие Луки : ООО «Великолукская городская типография», 2012. Вып. 6. С. 6 – 32.

РД 52.04.614-2000 : Руководящий документ. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. II. Обработка материалов метеорологических наблюдений по подготовке метеорологических ежегодников. СПб. : Гидрометеиздат, 2000. 90 с.

РД 52.33.725-2010 : Руководящий документ. Методические указания по составлению агрометеорологического ежегодника для сельскохозяйственной зоны Российской Федерации. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2010. 142 с.

Сапельникова И. И., Базильская И. В. Долговременные изменения некоторых фенологических параметров календарного года в Воронежском биосферном заповеднике // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2015. Т. 26, № 1. С. 49 – 67.

Скороходова С. Б., Щербakov А. Н. Тренды наступления фенологических событий в заповеднике «Кивач» за 1966–2005 годы // Тр. гос. природного заповедника «Кивач» / под ред. А. П. Кутенкова, Э. К. Поповой. Петрозаводск, 2011. Вып. 5. С. 207 – 221.

Филонов К. П., Нухимовская Ю. Д. Летопись природы в заповедниках СССР : метод. пособие. М. : Наука, 1985. 143 с.

Хромов С. П., Петросянци М. А. Метеорология и климатология. М. : Изд-во МГУ, 2001. 528 с.

Шилов И. А. Экология. М. : Высш. шк., 2003. 512 с.

Шутиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп : статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти : Кассандра, 2013. 314 с.

Шульц Г. Э. Общая фенология. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. 188 с.

Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A., Schwartz M. D. Shifting Plant Phenology in Response to Global Change // *Trends in Ecology & Evolution*. 2007. Vol. 22, iss. 7. P. 357 – 365.

Ovaskainen O., Skorokhodova S., Yakovleva M., Sukhov A., Kutenkov A., Kutenkova N., Shcherbakov A., Meyke E., Delgado Maria Del Mar. Community-level Phenological Response to Climate Change // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2013. Vol. 110, № 33. P. 13434 – 13439.

Parmesan C. Influences of Species, Latitudes and Methodologies on Estimates of Phenological Response to Global Warming // *Global Change Biology*. 2007. Vol. 13, № 9. P. 1860 – 1872. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x>

Sherry R. A., Zhou X., Gu S., Arnone J. A., Schimel D. S., Verburg P. S., Wallace L. L., Luo Y. Divergence of Reproductive Phenology Under Climate Warming // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2007. Vol. 104, № 1. P. 198 – 202.

The Plant List. Version 1.1. 2018. Available at: <http://www.theplantlist.org/> (accessed 12 September 2018).

**Climatic Causes of Plant Flowering Time Displacement
in the Central Forest Reserve**

Anastasia A. Zorina¹, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2501>; zor-nastya@yandex.ru

Elena A. Shuyskaya², elenashuy@rambler.ru

Irina V. Kurakina², crocus_vernus@mail.ru

Vladislav P. Volkov², vladlenvolkov@listr.ru

Sergey S. Ogurtsov², etundra@mail.ru

Sergey N. Stepanov², c_forest@mail.ru

¹ *Petrozavodsk State University*

33 Lenin St., Petrozavodsk 185910, Russia

² *Central Forest State Nature Biosphere Reserve*

Zapovedny, Tver Region 172521, Russia

Received 20 March 2019, revised 9 May 2019, accepted 30 October 2019

Zorina A. A., Shuyskaya E. A., Kurakina I. V., Volkov V. P., Ogurtsov S. S., Stepanov S. N. Climatic Causes of Plant Flowering Time Displacement in the Central Forest Reserve. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2020, no. 1, pp. 52–65 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-1-52-65>

Meteorological series and phenological data in the framework of our environmental monitoring in the South taiga Central Forest Reserve were analyzed. During 1984–2017, the average annual air temperature was $4.63 \pm 0.41^\circ\text{C}$, and the average annual rainfall was 2.14 ± 0.12 mm/day. For eight of the 43 (19%) climatic parameters, reliable linear trends of variability were found: an increase of air temperature in July, August, September, and December; an increase of soil temperature in December; an increase of precipitation in November and December; and a decrease of precipitation in September. Three causes of their directed long-term changes were revealed, namely: a shift of the winter timing, violation of the annual dynamics of climatic parameters and a change in the precipitation type during a longer autumn – snow to be replaced by rain. Of the 11 species of vascular plants, the statistical significance of the long-term displacement of phenological dates was proven for *Anemone nemorosa*: the longer the autumn and softer the beginning of the winter, the earlier the onset of its flowering. Two classification types of vascular plants in identifying interspecific synchrony in the phenological events variation were considered. Variability components of phenological phenomena occurrence was estimated: the share of long-term trends of the shift in phenological dates timing due to changes in reserve climatic system is from 20 to 68% of the total sign dispersion; interannual climatic fluctuations explain 5–34% of its variability; and the proportion of variability under unaccounted factors influence is high (21–64%). Species with a high proportion of their long-term variability components (*Anemone nemorosa*: more than 60%) are recommended to use as indicators of climate change under the conditions of the study area.

Keywords: monitoring, climate change, phenological phenomena offset, variability components, classification, vascular plants.

DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-1-52-65>

REFERENCES

- Zorina A. A., Shuyskaya E. A., Kurakina I. V., Ogurtsov S. S., Stepanov S. N. Biota Response to Local Climate Changes in the Central Forest Reserve. *Bulletin of Tver State University, Ser. Biology and Ecology*, 2018, no. 1, pp. 58–77 (in Russian).
- Climate Change in Russia*. Moscow, Rosgidromet Publ., 2018. Available at: http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=32&Itemid=75&lang=ru/ (accessed 25 August 2018) (in Russian).
- Korosov A. V. *Spetsial'nye metody biometrii* [Special Methods of Biometrics]. Petrozavodsk, Izdatel'stvo Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta, 2007. 364 p. (in Russian).
- Kuznetsova V. V., Minin A. A., Golubeva E. I. Phenological Phenomena in the System of Bioindication of Climatic Trends. *Problems of Regional Ecology*, 2014, no. 5, pp. 66–71 (in Russian).
- Letopis' prirody Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika. Knigi 24 – 57 (1984 – 2017). Arkhiv zapovednika (Rukopisi)* [Nature Chronicle of Central Forest State Natural Biosphere Reserve. Books 24–57 (1984–2017). Reserve Archive (Manuscripts)]. Zapovednyi, Tsentral'no-Lesnoi gosudarstvennyi zapovednik, 1984–2017 (in Russian).
- Minayeva T. Yu., Istomin A. V., Abrazhko V. I., Bazhenova T. P., Korablev N. P., Kurayeva E. N., Kurakina I. V., Pugatchevsky V. A., Rusanovich N. R., Shaposhnikov E. S. Study on Biota Reaction on Climate Changes in the Central Forest Reserve. In: *Vliianie izmeneniia klimata na ekosistemy* [A. O. Kokorin, A. V. Kozarinov, A. A. Minin, eds. Climate Change Impact on Ecosystems]. Moscow, Russkii universitet Publ., 2001. pp. 87–100 (in Russian).
- Minin A. A., Rankova E. J., Rybina G. E., Buyvolov Y. A., Sapelnikova I. I., Filatova T. D. The Phenomenon of Climate Change in the Period 1976–2015 in the Central Part of the European Territory of Russia: Warty Birch (Hanging) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.)), Common Bird Cherry (*Padus avium* Mill.), Rowan (*Sorbus aucuparia* L.), Small-leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.). *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling*, 2017, vol. 28, no. 3, pp. 5–22 (in Russian).
- Prokosheva I. V. Dynamics of Phenological Processes in the Mountain Taiga belt of the Vishera Reserve (Northern Urals) Under the Influence of Climate Change. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling*, 2017, vol. 28, no. 2, pp. 40–55 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-2-40-55>
- Puzachenko Yu. G. A Century of Climate Change in Reserve Area. *Proceedings of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve*. A. S. Zheltukhin, ed. Velikie Luki, Velikolukskaia gorodskaa tipografiia Publ., 2012, iss. 6, pp. 6–32 (in Russian).
- RD 52.04.614-2000: *Rukovodiashchii dokument. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiiam i postam. Vyp. 3, ch. II. Obrabotka materialov meteorologicheskikh nabliudenii po podgotovke meteorologicheskikh ezhegodnikov* [RD 52.04.614-2000: Guidance document. Manual for Hydrometeorological Stations and Posts. Iss. 3, part II. Processing of Meteorological Observations for the Preparation of Meteorological Yearbooks]. Saint Petersburg, Hydrometeoizdat, 2000. 90 p. (in Russian).
- RD 52.33.725-2010: *Rukovodiashchii dokument. Metodicheskie ukazaniia po sostavleniiu agrometeorologicheskogo ezhegodnika dlia zemledel'cheskoi zony Rossiiskoi Federatsii* [RD 52.33.725-2010: Guidance document. Methodical Instructions on Drawing up the Agrometeorological Yearbook for the Agricultural Zone of the Russian Federation]. Obninsk, VNIIGMI-MTsD Publ., 2010. 142 p. (in Russian).
- Sapelnikova I. I., Bazil'skaya I. V. Long-term Changes of Some Phenological Parameters of the Calendar Year in the Voronezh Biosphere Reserve. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling*, 2015, vol. 26, no. 1, pp. 49–67 (in Russian).

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ СРОКОВ ЦВЕТЕНИЯ РАСТЕНИЙ

Skorohodova S. B., Cherbakov A. N. Trends in Phenological Events Occurrence in the Kivach Reserve for 1966–2005 years. *Proceedings of the State Nature Reserve "Kivach"*. A. P. Kutenkov, E. K. Popova, eds. Petrozavodsk, 2011, iss. 5, pp. 207–221 (in Russian).

Filonov K. P., Nukhimovskaya J. D. *Letopis' prirody v zapovednikakh SSSR* [Chronicle of Nature Reserves of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 143 p. (in Russian).

Hromov S. P., Petrosyanc M. A. *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and Climatology]. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2001. 528 p. (in Russian).

Shilov I. A. *Ekologiya* [Ecology]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 2003. 512 p. (in Russian).

Shitikov V. K., Rozenberg G. S. *Randomizatsiya i butstrep: statisticheskiy analiz v biologii i ekologii s ispol'zovaniem R* [Randomization and Bootstrap: Statistical Analysis in Biology and Ecology Using R]. Togliatti, Kassandra Publ., 2013. 314 p. (in Russian).

Schulz G. E. *Obshchaia fenologiya* [General Phenology]. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 188 p. (in Russian).

Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A., Schwartz M. D. Shifting Plant Phenology in Response to Global Change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, vol. 22, iss. 7, pp. 357–365.

Ovaskainen O., Skorokhodova S., Yakovleva M., Sukhov A., Kutenkov A., Kutenkova N., Shcherbakov A., Meyke E., Delgado Maria Del Mar. Community-level Phenological Response to Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, vol. 110, no. 33, pp. 13434–13439.

Parmesan C. Influences of Species, Latitudes and Methodologies on Estimates of Phenological Response to Global Warming. *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, no. 9, pp. 1860–1872. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x>

Sherry R. A., Zhou X., Gu S., Arnone J. A., Schimel D. S., Verburg P. S., Wallace L. L., Luo Y. Divergence of Reproductive Phenology Under Climate Warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, vol. 104, no. 1, pp. 198–202.

The Plant List. Version 1.1. 2018. Available at: <http://www.theplantlist.org/> (accessed 12 September 2018).