

УДК 574.3

## АНАЛИЗ СМЕЩЕНИЯ ФЕНОДАТ У ПТИЦ КАК ИНДИКАТОРОВ КЛИМАТОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2021 г. А. А. Зорина<sup>а, \*</sup>, Е. А. Шуйская<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Петрозаводский государственный университет, Россия 185910 Петрозаводск, просп. Ленина, 33

<sup>б</sup>Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник,  
Россия 172521 Тверская обл., пос. Заповедный

\*e-mail: zor-nastya@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.08.2020 г.

После доработки 22.09.2020 г.

Принята к публикации 05.10.2020 г.

Апробирован новый метод оценки реакции биоты на климатические изменения в экосистеме. В Центрально-Лесном биосферном заповеднике за период 1990–2019 гг. среднегодовая температура воздуха составила  $4.8 \pm 0.13^\circ\text{C}$  (скорость роста  $0.35^\circ\text{C}/10$  лет), показатель осадков –  $781 \pm 22.9$  мм/год ( $22.6$  мм/10 лет). Достоверное изменение сроков сезонной активности установлено для 11 феноявлений у 9 видов птиц (52%). Кластеризация фенологических событий у птиц зависит от характера их сезонных миграций, влияния агро- и гидрометеорологических, трофических факторов, использования весенних или осенних фенодат. Интегральный индекс на основе нормированного отклонения наряду с методами многомерной статистики позволяет проводить биологически и статистически обоснованное объединение метеорологических рядов и фенологических признаков в целях повышения чувствительности индикационных свойств биоты под действием климатогенных изменений.

**Ключевые слова:** мониторинг, заповедник, климатические изменения, феноявления у птиц, кластеризация, интегральный индекс

**DOI:** 10.31857/S0367059721020116

В условиях сезонной смены климатических режимов проявляются периодические процессы у живых организмов, которые охватывают комплекс физиологических систем, обеспечивающих биологически значимые изменения форм деятельности. Эволюционно сезонность возникла как адаптация живых организмов к циклическим изменениям климатических характеристик в результате взаимодействия врожденных эндогенных биологических циклов с окологодовой периодичностью (цирканнуальных или цирканных ритмов) и информацией о состоянии внешних условий среды [1]. Поэтому смещение сроков наступления и продолжительности фенологических фаз биологических видов считают биоиндикаторами абиотических изменений в природной среде [2–6].

В качестве определяющего фактора смещения фенодат (времени наступления биологических событий) выделяют устойчивую тенденцию изменения климата [7–10]. Однако генетически детерминированная изменчивость феноявлений находится в пределах нормы реакции биологического вида, что определяет диапазон их адаптации к спонтанному варьированию или законо-

мерным трендам смещения экологических условий годовых циклов. Отмечается неоднозначная реакция компонентов экосистем на изменения в глобальной климатической системе [11, 12].

Большинство исследователей проводят статистический анализ временных рядов фенологических данных сезонного развития растений и животных отдельно [2, 3, 5, 11]. Однако сходная реакция и причины смещения фенодат видов [4, 10] в ответ на изменения в климатических системах изучаемых территорий определяют целесообразность поиска аргументированного с биологических позиций и статистически обоснованного интегрального индекса. Индекс, характеризующий смещение совокупности признаков (феноявлений) организмов, позволит комплексно оценить индикационные свойства биоты под действием климатогенных изменений.

Цель данной статьи – выявление климатических причин смещения феноявлений на примере птиц южно-таежного Центрально-Лесного биосферного заповедника с помощью интегрального индекса на основе нормированного отклонения.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Центрально-Лесной заповедник (далее заповедник) расположен в южно-таежной подзоне на моренном рельефе центральной части Русской равнины ( $56^{\circ}26' - 56^{\circ}39'$  с.ш. и  $32^{\circ}29' - 33^{\circ}01'$  в.д.;  $S \approx 24700$  га), в западной подобласти лесной атлантико-континентальной климатической области, подверженной влиянию теплого Северо-Атлантического течения. Климат территории заповедника также определяется положением природного комплекса на юго-западном наветренном склоне Валдайской возвышенности [11, 13].

Исходными данными послужили материалы метеорологических и фенологических наблюдений, выполняемых по программе ведения Летописи природы на базе метеопоста Тверского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды “Лесной заповедник”, расположенного на центральной усадьбе заповедника. Анализ метеорологических рядов и фенологических данных выполнен за 30 лет – с 1990 г. по 2019 г.

Обработано 46 климатических характеристик и метеоявлений: температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) среднегодовая и отдельно за 12 мес.; среднегодовая сумма осадков и отдельно за 12 мес. (мм); даты установления среднесуточных температур ниже и выше  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $t < 0^{\circ}\text{C}$ ;  $t > 0^{\circ}\text{C}$ ;  $t < -5^{\circ}\text{C}$ ;  $t > -5^{\circ}\text{C}$ ); даты установления максимальной температуры ниже и выше  $0^{\circ}\text{C}$  ( $t < 0^{\circ}\text{C}$ ;  $t > 0^{\circ}\text{C}$ ); даты образования и разрушения устойчивого снежного покрова, схода снежного покрова на открытых местах и в лесу; даты первого заморозка на почве (осенние), первых заберегов на водоеме, первого и окончательного ледостава на водоеме, появления первых кольцевых проталин вокруг деревьев, первых проталин на открытых местах, начала фенологической зимы, весны, лета, осени [14, 15].

Для формирования метеорологических рядов и климатических параметров использовали медианные значения, что обусловлено несоответствием выборок закону нормального распределения и их небольшими объемами. Медиана является наиболее представительной и устойчивой статистической характеристикой, на которую слабо влияют “выскакивающие” варианты [16].

Сбор фенологических данных в заповеднике проводится по стандартной методике [17] в рамках программы “Летопись природы”. К сожалению, непрерывный ряд многолетних данных за 30 лет исследований для большинства видов птиц восстановить не удалось. Виды, вариационные ряды которых меньше 20, были исключены из анализа.

Проанализированы смещения сроков 21 фенода-ты для 16 видов птиц. Названия фенологических явлений даны по руководству С.М. Преображенского и Н.Н. Галахова [18]. Номенклатура видов птиц указана в соответствии с базой данных Fau-

на Europaea [19], русские названия видов приведены по “Списку птиц Российской Федерации” [20]. Разнообразие мест обитания заповедника учитывали вычислением медианной даты начала феноявления для выборок из разных участков (от 3 до 8) с учетом данных по 11 фенологическим маршрутам.

Для подтверждения результатов кластерного анализа указан уровень бутстреп-поддержки в точках ветвления дендрограмм при количестве итераций для бутстрепинга 10000 [21]. При обработке данных проводилось нормирование факторных нагрузок компонентного анализа – в каждой компоненте все факторные нагрузки по отдельности делили на модуль максимального значения [16]. Для полученных относительных величин применили простой критерий оценки достоверности их отличия от нуля – для этого они должны быть по модулю больше 0.7.

Базовый способ унификации данных в вариационной статистике – нормированное отклонение [16] – использован при создании интегрального индекса. Сначала проводится нормирование каждого признака (феноявления) отдельного вида ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) определенного года ( $i = 1, 2, \dots, n$ ):  $t_{ij} = (x - M)/S$ , где  $x$  – календарная дата, переведенная в непрерывный ряд,  $M$  – среднее арифметическое за  $N$  лет,  $S$  – стандартное отклонение. Далее безразмерные признаки (феноявления видов) усредняются по каждому году:  $t_i = 1/m \sum_{(1 \rightarrow m)} t_{ij}$ . В результате получают многолетние ряды значений индекса  $t_i$ , который за каждый год включает информацию по нескольким феноявлениям, объединение которых биологически обосновано. При необходимости (например, при сравнении удаленных друг от друга территорий) оценка величины интегрального индекса  $t$  за весь период исследования проводится усреднением выборки значений по всем годам:  $t = 1/n \sum_{(1 \rightarrow n)} t_i$ .

Нормирование метеорологических рядов с достоверными трендами изменчивости и вычисление индекса климатогенных изменений ( $In_{cl}$ ) выполнено по аналогичному алгоритму.

Методы многомерной статистики обеспечивают, с одной стороны, более полное (многоплановое) количественное описание биообъектов и окружающей среды (с помощью большого числа переменных), а с другой – представляют огромные массивы информации в более наглядном, интегрированном, обобщенном виде [16]. Предлагается авторами интегральный индекс предназначен для аналогичных целей. Более того, во многих случаях обработка многомерного массива начинается с нормирования данных по формуле нормированного отклонения.

Статистическая обработка выполнялась в программах Microsoft Excel 2010, STATGRAPHICS Plus 5.0 и бесплатном пакете PAST v3.17.

**Таблица 1.** Нормированные факторные нагрузки компонентного анализа климатических характеристик и метеоявлений с достоверными трендами изменчивости

Характеристики	Факторные нагрузки			
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
Температура воздуха:				
среднегодовая	<b>0.76</b>	<b>-1.00</b>	0.11	0.12
май	<b>0.75</b>	0.49	<b>-0.78</b>	0.24
август	<b>1.00</b>	-0.12	-0.08	0.18
сентябрь	<b>0.70</b>	-0.59	0.57	-0.54
ноябрь	0.50	<b>-0.71</b>	0.19	<b>1.00</b>
Сумма осадков:				
сентябрь	-0.62	0.54	-0.24	<b>0.82</b>
декабрь	0.19	-0.22	<b>-1.00</b>	<b>-0.78</b>
Метеоявления:				
<i>t</i> <sub>макс</sub> ниже 0°C	<b>0.94</b>	<b>0.91</b>	0.50	0.00
окончательный ледостав на водоеме	<b>0.91</b>	<b>0.97</b>	0.33	-0.17
начало фенологического лета	<b>-0.81</b>	0.10	<b>0.81</b>	-0.28
<i>S</i> <sup>2</sup>	3.2	1.6	1.4	1.1
<i>S</i> <sup>2</sup> , %	32	16	14	11

Примечание. Полу жирным отмечено достоверное отличие от нуля, курсивом выделены дисперсии главных компонент (*S*<sup>2</sup>) и их информационная значимость (*S*<sup>2</sup>, %).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

За 30-летний период среднегодовая температура воздуха в заповеднике составила  $4.8 \pm 0.13^\circ\text{C}$  при средней скорости роста  $0.35^\circ\text{C}/10$  лет (коэффициент корреляции Спирмена  $r = 0.47$ ,  $p = 0.01$ ); среднегодовой показатель осадков —  $781 \pm 22.9$  мм/год ( $22.6$  мм/10 лет,  $r = 0.08$ ,  $p = 0.70$ ). Из 46 метеорологических рядов только для 10 наблюдаются достоверные многолетние изменения за период 1990–2019 гг. ( $p < 0.05$ ): увеличение температуры воздуха среднегодовой ( $r = 0.47$ ), в мае ( $r = 0.44$ ), августе ( $r = 0.39$ ), сентябре ( $r = 0.37$ ), ноябре ( $r = 0.35$ ); понижение суммы осадков в сентябре ( $r = -0.37$ ) и их повышение в декабре ( $r = 0.41$ ); положительное смещение дат наступления максимальной температуры ниже  $0^\circ\text{C}$  ( $r = 0.41$ ) и образования окончательного ледостава на водоеме ( $r = 0.41$ ); отрицательное смещение дат начала фенологического лета ( $r = -0.44$ ).

Для наиболее полной характеристики изменений в климатической системе заповедника для 10 метеорологических рядов с достоверными трендами изменчивости был проведен компонентный анализ (табл. 1).

Первые четыре главные компоненты “забирают” наибольшую часть информации (73%), при этом первая главная компонента (PC1) имеет максимальную дисперсию — 3.2 из 10. Нормированные на максимальное значение факторные нагрузки в PC1 (a<sub>1</sub>, см. табл. 1) имеют достовер-

ные величины (по модулю  $>0.7$ ) для температурных показателей (кроме ноября), для дат наступления  $t_{\text{макс}} < 0^\circ\text{C}$ , образования окончательного ледостава на водоеме и начала фенологического лета. Повышение температуры сопоставимо с положительным изменением дат зимних процессов, поэтому PC1 можно назвать “смещение сроков наступления зимы”.

Факторные нагрузки в PC2 (a<sub>2</sub>, см. табл. 1) выражают обратную связь между среднегодовыми и ноябрьскими температурами и смещением дат наступления  $t_{\text{макс}} < 0^\circ\text{C}$ , образования ледостава на водоеме. Подобное отклонение от закономерности, выявленной в PC1, может быть связано с возрастанием температуры поверхности воды в теплый период года или другими причинами. Следовательно, вторую компоненту называем “нарушение внутригодовой динамики климатических характеристик и метеоявлений”. Факторные нагрузки третьей компоненты (a<sub>3</sub>) характеризуют “смещение сроков наступления фенологического лета”: чем меньше осадков в декабре и температура мая, тем позднее наступает лето. Нормированные факторные нагрузки PC4 (a<sub>4</sub>) показывают противопоставление осадков в сентябре и декабре, а также влияние на качество осадков температуры ноября: дождь заменяется снегом, или “смена типа осадков при удлинении осени”.

“Смещение сроков наступления зимы”, или рост продолжительности безморозного периода

**Таблица 2.** Характеристика фенологических явлений для исследованных видов птиц заповедника за период 1990–2019 гг.

Название вида		Феноявление	N <sup>a</sup>	Средняя дата	r <sup>b</sup>	p <sup>c</sup>
латинское	русское					
<i>Dendrocopos major</i> (L.)	Большой пестрый дятел	Первая барабанная дробь	21	16.02 ± 17* (16 февраля ± 17 дней)	–0.29	0.11
<i>Parus major</i> (L.)	Большая синица	Первая песня	24	17.02 ± 13	<b>–0.50</b>	<b>0.01</b>
<i>Lyrurus tetrix</i> (L.)	Тетерев	Начало токования	25	07.03 ± 16	–0.37	0.07
<i>Tetrao urogallus</i> (L.)	Глухарь	Начало токования	25	12.03 ± 21	<b>–0.69</b>	<b>&lt;0.01</b>
<i>Sturnus vulgaris</i> (L.)	Обыкновенный скворец	Первая встреча	28	22.03 ± 8	–0.35	0.07
<i>Alauda arvensis</i> (L.)	Полевой жаворонок	Первая песня	25	25.03 ± 9	–0.04	0.87
<i>Anas platyrhynchos</i> (L.)	Кряква	Первая встреча	25	25.03 ± 14	<b>–0.54</b>	<b>&lt;0.01</b>
<i>Motacilla alba</i> (L.)	Белая трясогузка	Первая встреча	24	30.03 ± 8	<b>–0.59</b>	<b>&lt;0.01</b>
<i>Lyrurus tetrix</i> (L.)	Тетерев	Массовое токование	25	01.04 ± 12	–0.10	0.63
<i>Grus grus</i> (L.)	Серый журавль	Первая стая	25	04.04 ± 7	<b>–0.41</b>	<b>0.04</b>
<i>Anser anser</i> (L.)	Серый гусь	Первая стая	25	05.04 ± 9	<b>–0.40</b>	<b>0.046</b>
<i>Fringilla coelebs</i> (L.)	Зяблик	Первая встреча	20	06.04 ± 6	<b>–0.61</b>	<b>&lt;0.01</b>
<i>Scolopax rusticola</i> (L.)	Вальдшнеп	Первая тяга	27	07.04 ± 7	<b>–0.55</b>	<b>0.01</b>
<i>Tetrao urogallus</i> (L.)	Глухарь	Массовое токование	25	11.04 ± 7	–0.38	0.06
<i>Scolopax rusticola</i> (L.)	Вальдшнеп	Массовая тяга	20	14.04 ± 6	–0.13	0.59
<i>Cuculus canorus</i> (L.)	Обыкновенная кукушка	Первая песня	28	23.04 ± 7	–0.29	0.13
<i>Hirundo rustica</i> (L.)	Деревенская ласточка	Первая встреча	28	27.04 ± 7	–0.17	0.39
<i>Luscinia luscinia</i> (L.)	Обыкновенный соловей	Первая песня	24	03.05 ± 7	–0.38	0.07
<i>Crex crex</i> (L.)	Коростель	Первая песня	25	12.05 ± 6	<b>–0.49</b>	<b>0.01</b>
<i>Anser</i> sp. Brisson	Гуси	Окончание осеннего пролета	22	26.09 ± 12	<b>0.57</b>	<b>&lt;0.01</b>
<i>Grus grus</i> (L.)	Серый журавль	Окончание осеннего пролета	23	01.10 ± 11	<b>0.58</b>	<b>&lt;0.01</b>

Примечание. \* – стандартное отклонение; *a* – объем выборки для вида; *b* – коэффициент корреляции Спирмена; *c* – уровень значимости (полужирным обозначен уровень  $p < 0.05$ ).

[7], отражается на годовых циклах жизнедеятельности биоты, которые мы рассмотрели для нескольких видов птиц. Для весенних фенодат наблюдается отрицательный многолетний линейный тренд изменчивости фенологических явлений в сторону более раннего начала событий (табл. 2, рис. 1). Положительный линейный тренд выявлен для двух осенних феноявлений, что подтверждает результат анализа климатических характеристик и метеоявлений заповедника за период 1990–2019 гг.

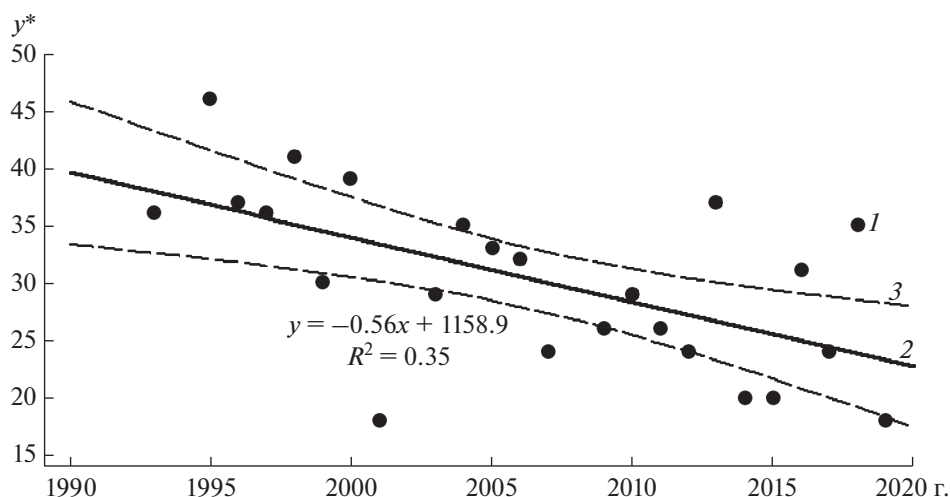
Значимое смещение фенодат удалось доказать для 9 видов, более того, для двух из них (гуси и журавли) наблюдаются достоверные изменения как весенних (более ранний прилет), так и осенних (поздний отлет) феноявлений (см. табл. 2).

Выявление причин изменчивости фенодат теплокровных животных усложняется их опосредованной реакцией на климатические изменения. Кластерный анализ птиц проведен для уста-

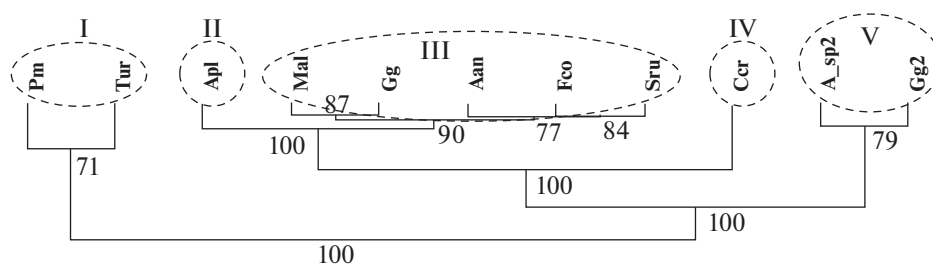
новления межвидовой синхронности в варьировании фенологических событий (рис. 2).

*Parus major* и *Tetrao urogallus* формируют первую группу (I кластер), которая по характеру сезонных миграций включает полуседлых (глухарь) и кочующих (большая синица) видов. Прилет кряквы (II кластер) приходится на период вскрытия водоемов. Первое время прилетевшие кряквы живут стайками на наиболее кормных участках больших водоемов и сырых лугах [20].

Третий кластер (III, см. рис. 2) включает пять видов птиц, средние даты феноявлений которых приходятся на конец марта–начало апреля. Сроки их весеннего прилета (или пролета) определяются как трофическим фактором, так и освобождением водоемов от ледового покрова: белая трясогузка питается наземными и водными насекомыми; журавль серый, особенно в период прилета, характеризуется всеядностью; для пролета гусей важной защитой являются открытые водоемы, а пища – бо-



**Рис. 1.** Линейный тренд изменчивости фенодат первой встречи белой трясогузки в заповеднике за период 1990–2019 гг.:  $y^*$  – календарные даты переведены в непрерывный ряд: 1 – исходные данные; 2 – линия тренда; 3 – границы доверительного интервала.



**Рис. 2.** Дендрограмма сходства достоверных трендов смещения феноявлений птиц в заповеднике за период 1990–2019 гг., полученная методом ближайшего соседа по матрице нормированных евклидовых дистанций с нанесенными оценками бутстреп-вероятностей ветвей; пунктиром разделены кластеры птиц с доверительной вероятностью >95%: первая песня большой синицы (**Pm**) и коростель (**Ccr**), начало токования глухаря (**Tur**), первая встреча кряквы (**Apl**), белой трясогузки (**Mal**) и зяблика (**Fco**), первая стая серого журавля (**Gg**) и серого гуся (**Aan**), первая тяга вальдшнепа (**Sru**), окончание осеннего пролета гусей (**A\_sp2**) и журавлей (**Gg2**).

лотные, водные и наземные растения; зерноядность зябликов определяет их концентрацию во время прилета на полях, огородах, около населенных пунктов; основу питания вальдшнепа составляют дождевые черви, насекомые и их личинки, пауки и пилильщики, иногда корма растительного происхождения [22].

В IV кластер входит только один вид – коростель, средняя дата прилета которого приходится на середину мая. *Crex crex* питается насекомыми, пауками, моллюсками, иногда мелкими лягушками и млекопитающими, семенами и зелеными частями трав [22].

Пятая группа (V, см. рис. 2) феноявлений птиц, сформированная по результатам кластерного анализа, объединяет положительное смещение сроков окончания осеннего пролета гусей и журавлей: чем теплее осень, тем позднее наблюдается пролет птиц.

Анализ смещения отдельных признаков (феноявлений) биологических видов под действием климатогенных изменений слабо характеризует преобразования в климатической системе исследуемой территории. Объединение свойств разных видов в единый интегральный индекс ( $In$ ) должно быть аргументировано с биологических позиций и статистически обосновано. При классификации достоверных трендов смещения фенодат птиц в заповеднике за период 1990–2019 гг. выделено пять кластеров. Установленная межвидовая синхронность в варьировании фенологических событий биологически обоснована, и для расчета индекса подходят фенологические ряды III кластера, включающего наибольшее число видов (см. рис. 2). В результате мы получили 30-летний ряд значений индекса ( $In_{f\_bird}$ ), включающий информацию по следующим феноявлениям: первая встреча белой

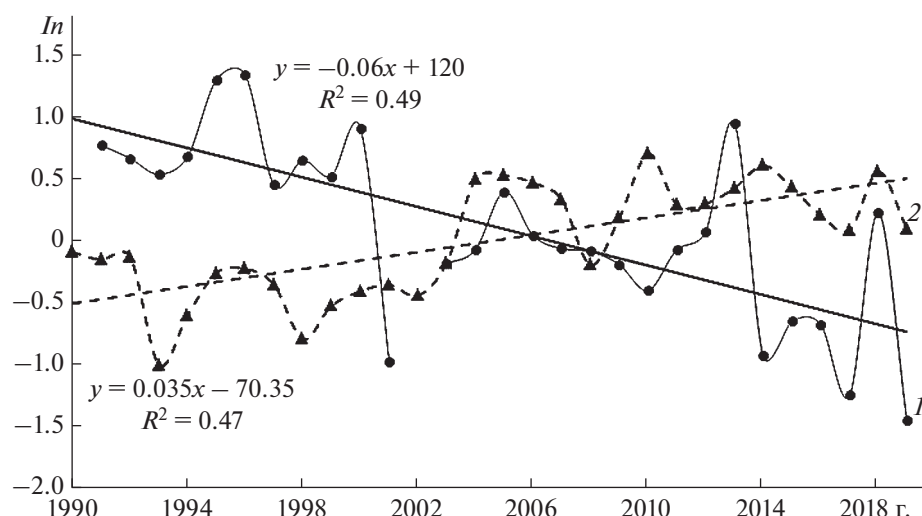


Рис. 3. Интегральные индексы фенодат перелетных птиц раннего прилета ( $1 - In_{f\_bird}$ ) и климатогенных изменений ( $2 - In_{cl}$ ) и соответствующие им тренды изменчивости в заповеднике за период 1990–2019 гг.

трясогузки и зяблика, первая стая журавлей и гусей, первая тяга вальдшнепа (рис. 3).

Достоверный отрицательный тренд смещения индекса  $t_i = In_{f\_bird}$  ( $r = -0.71$ ,  $p < 0.01$ ) за период 1990–2019 гг. характеризует изменчивость фенодат перелетных птиц раннего прилета. Для оценки его индикационной способности проведено вычисление индекса климатогенных изменений –  $In_{cl}$  ( $r = 0.69$ ,  $p < 0.01$ , см. рис. 3). Интегральный индекс  $t = In_{birds\_30}$  для феноявлений птиц заповедника за 30-летний период исследований составил 0.09, для климатогенных изменений –  $t = In_{cl\_30} = 0.01$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выделены четыре причины достоверных многолетних изменений климатических характеристик и метеоявлений на территории заповедника за период 1990–2019 гг.: смещение сроков наступления зимы, нарушение внутригодовой динамики климатических характеристик и метеоявлений, смещение сроков наступления фенологического лета и смена типа осадков при удлинении осени.

По данным ФГБУ «ИГКЭ» [23], средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории Российской Федерации в 1976–2018 гг. составила  $0.47^\circ\text{C}/10$  лет. Это сопоставимо с полученными нами данными ( $+0.35^\circ\text{C}/10$  лет) за период 1990–2019 гг. и практически совпадает со скоростью потепления Северного полушария:  $+0.34^\circ\text{C}/10$  лет с 1970-х гг. [24]. Сопоставление изменений климатических характеристик заповедника по сезонам года за период 1990–2019 гг. с

общей тенденцией на территории России в 1976–2018 гг. показало следующие сходства: 1 – слабое потепление зимой с недостоверными трендами изменчивости температуры; 2 – среднегодовые, весенние и осенние температуры растут на всей территории России [24]. Доказано повышение среднегодовых температур для заповедника; среди весенних месяцев достоверные линейные тренды изменчивости наблюдаются только для мая, среди осенних – для сентября и ноября. Однако результаты по анализу обилия осадков в заповеднике не всегда соответствуют данным Росгидромета и РАН [23, 24]. По России количество осадков увеличивается за счет весеннего сезона и зимы, тогда как их достоверное повышение на исследуемой территории наблюдается только в декабре. Летом и осенью тренд осадков в целом по России незначим, что отчасти соответствует результатам исследований – для сентября отмечено достоверное понижение суммы осадков.

Проведение многолетних научно-исследовательских работ, в том числе оценка климатических характеристик и метеоявлений, во многом зависит от локальных условий местности, методики сбора информации и человеческого фактора [8]. Значимое смещение 11 феноявлений для 9 исследованных видов птиц (52%) характеризуется высокой долей многолетней компоненты изменчивости, что обусловлено отклонениями в климатической системе заповедника, и в свою очередь вызвано изменениями климатических параметров на глобальном уровне [11]. В качестве индикаторов климатогенных изменений рекомендуется использовать следующие признаки биологических видов: первая песня большой синицы, коростеля; начало токования глухаря; первая встреча кряквы,

белой трясогузки, зяблика; первые стаи журавлей и гусей; первая тяга вальдшнепа; окончание осеннего пролета журавлей и гусей (см. табл. 2, рис. 1).

Характер сезонных миграций птиц лежит в основе их реакции на изменения в климатической системе заповедника. Для полуседлых (глухарь) и кочующих (большая синица) видов птиц, которые с осени до весны отличаются всеядностью и в наименьшей степени зависят от биотического (кормового) фактора, характерны ранневесенние явления (см. рис. 2). У перелетных птиц корреляция сезонных явлений с температурным режимом территории выражена слабо, что обусловлено влиянием вторичных агро- и гидрометеорологических условий (снеготаяние, вскрытие водоемов, оттаивание почвы и т.д.) и трофических факторов [3]. Раньше прилетают всеядные и растительноядные птицы, для которых достаточное количество корма в местах гнездования появляется сразу или вскоре после схода снежного покрова, потом — насекомоядные. Позднее всех появляются виды, питающиеся летающими насекомыми, вылет которых связан с устойчивым переходом температуры воздуха выше нижних порогов развития ( $+5^{\circ}\text{C}$  и выше) [4].

Изменения в климатической системе заповедника проявляются в стабильном увеличении температуры воздуха и нарушении типичного соотношения осадков в осенне-зимний период. Смещение сроков наступления зимы является основной причиной динамики биоты. На примере изменчивости фенодат перелетных птиц раннего прилета ( $In_{f, bird}$ ) наглядно показаны последствия климатогенных изменений ( $In_{cl}$ ) — смещение времени наступления биологических событий или более раннее возвращение перелетных птиц на места гнездования (см. рис. 3). Интегральный индекс на основе нормированного отклонения позволяет проводить биологически и статистически обоснованное объединение феноявлений видов в целях повышения чувствительности индикационных свойств биоты. Актуален анализ изменчивости интегрального индекса в пространстве (на удаленных друг от друга территориях) и во времени (за разные временные промежутки и при непрерывности мониторинга ООПТ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические факторы неоднозначно влияют на компоненты экосистем и в значительной степени определяют состояние популяций, их плотность и характер распространения видов [5, 25, 26]. Экологический мониторинг годовых циклов животных на особо охраняемых природных территориях позволяет сделать акцент на изучении влияния климатических трендов изменчивости без учета негативного воздействия антропоген-

ных условий. Анализ смещения феноявлений у биологических видов приобретает особую значимость при их использовании в качестве индикаторов климатогенных изменений локальных экосистем с последующим выявлением биоклиматических тенденций биосферного уровня [27].

На примере достоверного смещения фенодат большинство исследованных видов птиц проявили способность быстро адаптироваться к отклонениям от типичных условий обитания, что объясняется хорошей экологической пластичностью организмов (экологической валентностью) или степенью их приспособляемости [1].

Интегральный индекс на основе нормированного отклонения наряду с методами многомерной статистики позволяет проводить биологически и статистически обоснованное объединение феноявлений видов в целях повышения чувствительности индикационных свойств биоты. Выявление устойчивых тенденций в динамике флоры и фауны исследуемой территории необходимо для своевременной корректировки рационального природопользования и сохранения биоразнообразия региона [3].

Выражаем благодарность специалистам метеопоста “Лесной заповедник” за предоставленные метеорологические данные и всем сотрудникам заповедника за сбор фенологической информации.

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов. В работе с животными соблюдены применимые этические нормы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилов И.А. Экология. М.: Высшая школа, 2003. 512 с.
2. Скороходова С.Б., Щербаков А.Н. Тренды наступления фенологических событий в заповеднике «Кивач» за 1966–2005 годы // Труды государственного природного заповедника “Кивач”. Петрозаводск, 2011. Вып. 5. С. 207–221.
3. Соловьев А.Н. Биота и климат в XX столетии. М.: Пасьява, 2005. 288 с.
4. Соловьев А.Н. Вековая динамика сроков сезонных миграций птиц в средних широтах Европейского Востока // Бюл. Московского общества испытателей природы. Отдел биол. 2015. Т. 120. № 1. С. 3–17.
5. Кузнецова В.В., Минин А.А., Голубева Е.И. Фенологические явления в системе биоиндикации климатических трендов // Проблемы региональной экологии. 2014. № 5. С. 66–71.
6. Thuiller W., Lavergne S., Roquet C. et al. Consequences of climate change on the tree of life in Europe // Nature. 2011. V. 470. № 7335. P. 531–534. <https://doi.org/10.1038/nature09705>

7. Кондратьев К.Я., Демирчян К.С. Климат Земли “Протокол Киото” // Вестник РАН. 2001. Т. 71. № 11. С. 1002–1009.
8. Пузаченко Ю.Г. Вековые изменения климата в районе заповедника // Труды Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Великие Луки: ООО “Великолукская городская типография”, 2012. Вып. 6. С. 6–32.
9. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Perception of climate change // PNAS USA. 2012. V. 109. № 37. P. 2415–2423. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>
10. Ovaskainen O., Skorokhodova S., Yakovleva M. et al. Community-level phenological response to climate change // Proceedings of the National Academy of Sciences J. 2013. V. 110. № 33. P. 13434–13439.
11. Зорина А.А., Шуйская Е.А., Куракина И.В. и др. Климатические причины смещения сроков цветения растений в Центрально-Лесном заповеднике // Поволжский экологич. журн. 2020. № 1. С. 52–65. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-1-52-65>
12. Sherry R.A., Zhou X., Gu S. et al. Divergence of reproductive phenology under climate warming // Proceedings of the National Academy of Sciences J. 2007. V. 104. № 1. P. 198–202.
13. Минаева Т.Ю., Истомин А.В., Абражко В.И. и др. К изучению реакции биоты Центрально-Лесного заповедника на изменения климата // Влияние изменения климата на экосистемы. М.: Русский ун-т, 2001. С. 87–100.
14. РД52.04.614-2000: Руководящий документ. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. II. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 90 с.
15. РД 52.33.725-2010: Руководящий документ. Методические указания по составлению агрометеорологического ежегодника для земледельческой зоны Российской Федерации. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2010. 142 с.
16. Коросов А.В. Специальные методы биометрии. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 364 с.
17. Филонов К.П., Нухимовская Ю.Д. Летопись природы в заповедниках СССР: Методическое пособие. М.: Наука, 1985. 143 с.
18. Преображенский С.М., Галахов Н.Н. Фенологические наблюдения. Руководство. М.: Главное управление по заповедникам, 1948. 158 с.
19. de Jong Y., Verbeek M., Michelsen V. et al. Fauna Europaea – all European animal species on the web // Biodiversity Data J. 2014. № 2: e4034. <https://doi.org/10.3897/BDJ.2.e4034>
20. Коблик Е.А., Редькин Я.А., Архипов В.Ю. Список птиц Российской Федерации. М.: Тов-во научн. изд. КМК, 2006. 256 с.
21. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
22. Зимин В.Б., Ивантер Э.В. Птицы. Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. 288 с.
23. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019. 79 с.
24. Обзор состояния и тенденций изменения климата России: Изменение климата 2018. Год (декабрь 2017–ноябрь 2018). М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, РАН, 2019. 42 с.
25. Коломыц Э.Г. Прогноз влияния глобальных изменений климата на зональные экосистемы Волжского бассейна // Экология. 2006. № 6. С. 429–440.
26. Cahill A.E., Aiello-Lammens M.E., Caitlin F.M. et al. Causes of warm-edge range limits: systematic review, proximate factors and implications for climate change // J. Biogeography. 2014. V. 41(3). P. 429–442. <https://doi.org/10.1111/jbi.12231>
27. Phenology and climate change / Xiaoyang Zhang (ed.). Croatia, 2012. <https://doi.org/10.5772/2146>