

Фенологические тренды в природе России: насколько они следуют за изменениями климата?

А.А. Минин^{1,12)}, Ю.А. Буйволово^{1,8)}, О.Ф. Самохина¹⁾, М.Ю. Бардин¹⁾,
В.Э. Демидов²⁾, П.А. Лебедев^{3,11)}, Н.В. Поликарпова⁴⁾, И.В. Прокошева,
О.В. Рыжков⁵⁾, И.И. Сапельникова⁶⁾, Б.Н. Фомин⁷⁾, Е.А. Шуйская⁸⁾,
М.В. Яковлева⁹⁾, О.В. Янцер¹⁰⁾*

¹⁾Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾Приокско-Террасный государственный природный биосферный заповедник
им. М.А. Заблочкиного,
Россия, 142200, Московская область, г.о. Серпухов, м. Данки

³⁾Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН,
Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2, литера В

⁴⁾Государственный природный заповедник «Пасвик»,
Россия, 184404, Мурманская обл., Печенгский р-н, п. Раякоски

⁵⁾Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник
им. профессора В.В. Алехина,
Россия, 305528, Курская область, Курский район, п/о Заповедное

⁶⁾Воронежский государственный природный биосферный заповедник им. В.М. Пескова,
Россия, 394080, г. Воронеж, Госзаповедник, Центральная усадьба

⁷⁾Институт географии Российской академии наук,
Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29

⁸⁾Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник,
Россия, 172521, Тверская обл, Нелидовский г.о., пос. Заповедный

⁹⁾Государственный природный заповедник «Кивач»
Россия, 186220, Республика Карелия, Кондопожский район, пос. Кивач, ул. Заповедная, 14

¹⁰⁾Уральский государственный педагогический университет,
Россия, 620091, Екатеринбург, пр. Космонавтов, 26

¹¹⁾ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5

¹²⁾Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН,
Россия, 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 26

*Адрес для переписки: aminin1959@mail.ru

Реферат. В статье обосновывается необходимость включения фенологического раздела в ежегодный доклад Росгидромета об особенностях климата Российской Федерации и показан вариант его наполнения. Используются данные от 214 до 301 пунктов по европейской территории России, включая Уральский регион, по явлениям: начало разворачивания и полное изменение окраски листьев у березы; начало цветения черемухи обыкновенной и липы

сердцелистной; первое кукование кукушки; весенний прилет деревенской ласточки. Рассчитывались и строились картограммы средних многолетних значений за период 1971-2020 гг., коэффициентов линейных трендов за 1991-2022 гг., отклонений от средних многолетних значений за 2022 г. По некоторым пунктам и явлениям приводятся графики рядов с продолжительными наблюдениями. Для березы рассчитывалась продолжительность вегетационного периода как разность дат полного изменения окраски листьев и дат начала их появления. Смещение сроков появления листьев у березы в сторону весны активно проявляется в Ленинградской, Псковской, Курской областях (коэффициент тренда до -2.0...-2.5 дней/10 лет). На остальной территории ± 0.5 дней/10 лет. Полное пожелтение практически везде, кроме Московского региона и Урала, смещается на более поздние сроки. Продолжительность вегетационного периода у березы на всей территории увеличивается с темпом до 3-4 дней/10 лет. Начало цветения черемухи и липы также преимущественно смещается на более ранние сроки. Первое кукование и прилет ласточек происходят в более поздние сроки (до 1.5-2.0 дней/10 лет) в зоне от Московского региона до Воронежа, в Свердловской и Челябинской областях, на других территориях – на более ранние. Таким образом, в целом биота реагирует соответственно на потепление климата. Однако на фенологическую динамику влияют особенности местности (геоморфологические, почвенные, гидрологические и др. факторы), а также эволюционно обусловленная популяционная структура на территориях с разной историей развития. Отклонения в 2022 г. в целом свидетельствуют о соответствующих реакциях растений и птиц на холодную весну 2022 г.

Ключевые слова. Фенологические явления, гомеостаз, фенологическая пластичность, локальные адаптации.

Phenological trends in Russian nature: how much do they follow climate changes?

A.A. Minin^{1,12)}, Yu.A. Buyvolov^{1),8)}, O.F. Samokhina¹⁾, M.Yu. Bardin¹⁾,
V.E. Demidov²⁾, P.A. Lebedev^{3),11)}, N.V. Polikarpova⁴⁾, I.V. Prokosheva,
O.V. Ryzhkov⁵⁾, I.I. Sapelnikova⁶⁾, B.N. Fomin⁷⁾, E.A. Shuiskaya⁸⁾,
M.V. Yakovleva⁹⁾, O.V. Yanzer¹⁰⁾*

¹⁾Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology,
20B Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾Prioksko-Terresnyi Biosphere Reserve,
Danky, g.o. Serpuhov, 142200, Moscow region, Russian Federation

³⁾V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences,
litera V, 2 Professora Popova str., 197022, St. Petersburg, Russian Federation

⁴⁾Pasvik State Nature Reserve,
Rayakoski village, Pechengsky district, 184404, Murmansk region, Russian Federation

⁵⁾Central Chernozem State Natural Biosphere Reserve named after professor V.V. Alyokhin, Zapovednoye settlement, Kursky district, 305528, Kursk region, Russian Federation

⁶⁾Voronezh State Natural Biosphere Reserve named after V.M. Peskov, Central estate, Goszapovednik, 394080, Voronezh, Russian Federation

⁷⁾Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetnyy line, 109017, Moscow, Russian Federation

⁸⁾Central Forest State Natural Biosphere Reserve, Village Reserved, Nelidovsky G.O., 172521, Tver region, Russian Federation

⁹⁾Kivach State Nature Reserve, 14 Zapovednaya str., village Kivach, Kondopozhsky district, 186220, Republic of Karelia, Russian Federation

¹⁰⁾Ural State Pedagogical University, 26 Kosmonavtov Ave., 620091, Yekaterinburg, Russian Federation

¹¹⁾S.M. Kirov St. Petersburg State Forestry Engineering University, 5 Institutsky lane, 194021, Saint Petersburg, Russian Federation

¹²⁾Koltzov Institute of Developmental Biology of Russian Academy of Sciences, 26 Vavilov Street, 119334, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: aminin1959@mail.ru

Abstract. The article substantiates the need to include a phenological section in the annual report of Roshydromet on the peculiarities of the climate of the Russian Federation and shows a variant of its filling. Data from 214 to 301 points on the European territory of Russia, including the Ural region, were used for the following phenomena: the beginning of deployment and complete yellowing of the leaves of *Betula pendula* and *B. pubescens*; the beginning of flowering of *Prunus padus* and *Tilia cordata*; the first cuckooing of *Cuculus canorus*; the spring arrival of *Hirundo rustica*. Cartograms of long-term average values for the period 1971-2020, linear trend coefficients for 1991-2022, deviations from long-term average values for 2022 were calculated and constructed. Graphs of series with long-term observations are given for some points and phenomena. For *Betula*, the duration of the growing season was calculated as the difference between the dates of complete yellowing of the leaves and the dates of the beginning of their appearance. The shift in the timing of the appearance of birch leaves towards spring is actively manifested in the Leningrad, Pskov, Kursk regions (trend coefficient up to -2.0...-2.5 days/10 years). In the rest of the territory ± 0.5 days/10 years. The complete yellowing of *Betula* leaves almost everywhere, except in the Moscow region and the Urals, is shifted to a later date. The duration of the growing season for birch trees throughout the territory increases at a rate of up to 3-4 days/10 years. The first cuckooing and arrival of *Hirundo rustica* are shifted to a later date (up to 1.5-2.0 days/10 years) in the zone from the Moscow region to Voronezh and in the Sverdlovsk and Chelyabinsk regions, in other territories – to earlier ones. Thus, in general, biota reacts accordingly to climate warming. However, the phenological dynamics is influenced by the features of the terrain (geomorphological, soil, hydrological, etc. factors), as well as the evolutionarily determined population structure in territories with different development histories. Deviations in 2022 generally indicate the corresponding reactions of plants and birds to the cold spring of 2022.

Keywords. Phenological phenomena, homeostasis, phenological plasticity, local adaptations.

Введение

Проблема современных изменений климата достаточно давно и широко обсуждается в научных кругах. В последние годы большое внимание уделяется изучению фенологических изменений в природе, как вероятным индикаторам реакций биоты на динамику климата. В Оценочных докладах об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации (например, Оценочный..., 2008) достаточно полно представлен фенологический раздел, приводятся картосхемы трендов дат начала некоторых явлений за последние десятилетия. Однако в ежегодных докладах Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации фенологический раздел отсутствует (Доклад..., 2023). Представляется целесообразным заполнить этот пробел в целях более глубокого понимания происходящих в природе России комплексных изменений, оценки реакции как естественной биоты, так и сообществ, созданных человеком или находящихся под его влиянием, на изменения климата. Цель данной статьи – обосновать важность мониторинга фенологических трендов биоты в условиях изменений климата и разработать согласованный с методологией подготовки ежегодных докладов об особенностях климата вариант фенологического раздела доклада. В задачи входит обоснование и отбор фенологических явлений, статистический анализ данных, построение картограмм и обсуждение результатов.

Материал и методы

Систематические фенологические наблюдения в России ведутся более 150 лет под эгидой Русского географического общества (РГО) на сети добровольных наблюдателей, на особо охраняемых природных территориях в рамках программы Летописи природы, в ботанических садах, на агро- и метеостанциях, в лесничествах и т.д. Накоплен значительный объем информации, которая частично оцифрована и представлена в базе данных «Временные ряды фенологических данных Северной Евразии» <http://fenolog.igce.ru/> (Минин и др., 2023). Всего в базе собраны данные наблюдений в 579 географических пунктах в границах бывшего СССР. Её поддержка осуществляется Институтом глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля.

Методика ведения фенологических наблюдений постоянно совершенствовалась, но всегда была направлена на унификацию явлений и признаков их определения, сохранение преемственности методических подходов и обеспечение тем самым сопоставимости и достоверности первичных данных (Минин и др., 2020; Владимиров и др., 2023).

В статье рассматривается европейская часть территории России (ЕЧР), включая Уральский регион, где находится достаточно много пунктов наблюдений. За Уралом наблюдательная сеть значительно реже, поэтому строить картограммы на эти территории пока представляется нецелесообразным.

В настоящей работе представлены данные по следующим фенологическим событиям (названия приведены по: Минин и др., 2020): начало разворачивания листьев (первые листья) и полное изменение окраски листьев (полное пожелтение) у березы повислой (*Betula pendula* Roth), также использованы данные по берёзе пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.); начало цветения черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L.) и липы сердцелистной (*Tilia cordata* Mill.); весенний прилет, первая песня (кукование) кукушки (*Cuculus canorus* L.); весенний прилет, первая встреча деревенской ласточки (*Hirundo rustica* L.). Выбор этих явлений обусловлен следующими обстоятельствами. Представленные виды имеют сравнительно широкие ареалы и поэтому явления охватывают максимально большие территории. Два вида березы не все наблюдатели уверенно различают, поэтому использовано для объекта общее родовое название, объединяющее оба широко распространенных вида – береза. Кроме того, исследования показали, что у разных видов березы фенофазы начинаются при одинаковых экологических условиях, которые, таким образом, являются общими для рода *Betula* (Елагин, 1976). Указанные явления хорошо проявляются в природе, поэтому фиксируются максимально надежно даже не специалистами. По этим явлениям накоплен большой массив данных за длительный период (по некоторым пунктам более 100 лет). Таким образом, представлены данные по наступлению событий у растений и животных, что позволяет рассматривать реакции видов из разных таксонов на изменения климата; явления представляют разные сезоны года (весна, лето, осень). По березе представлены два события, что позволяет анализировать пространственно-временные изменения ее вегетационного периода. Также использовались данные по температуре воздуха за весну, лето, осень, зиму, год.

Рассчитывались и строились картограммы коэффициентов линейных трендов за период 1991-2022 гг., (1991 – начальный год базового климатического 30-летнего периода), где также отмечались отклонения от средних многолетних значений за 2022 г. В связи с недостатком фенологических данных за последние 30 лет, мы расширили период вычисления средних многолетних значений до 1971-2020 гг. Рисунки построены с помощью программы Golden_SURFER (13.0.383), куда встроен алгоритм кригинговой интерполяции. По некоторым пунктам и явлениям (черемуха и кукушка) с продолжительными наблюдениями приводятся графики рядов за весь период наблюдений с расчетом линейного тренда за этот период и последние годы. Для березы рассчитывалась продолжительность вегетационного периода как разность дат полного пожелтения и дат начала разворачивания листьев.

Продолжительность наблюдений в пунктах разная, так как объединены данные разных сетей и наблюдателей. Средние за 50 лет считались, если в этот период было не менее 5 лет наблюдений. Период расчета трендов не менее 27 лет (допускалось не более 5 пропусков наблюдений, из них не более трех пропусков в начале и в конце периода оценки тренда). Для расчета средних многолетних из общей базы в выборке использованы данные: первые листья у березы – 267 пунктов, полное пожелтение березы – 271, продолжительность вегетационного периода березы – 214, начало цветения черемухи – 301, липы – 231, пер-

вое кукование кукушки – 301, прилет деревенской ласточки – 275. При расчете трендов использовались данные меньшего количества пунктов.

Область изолиний средних многолетних значений фенологических явлений ограничена ареалами видов и доступными данными. Заливка трендов ограничивается распределением пунктов, по которым проводились расчеты.

Результаты

Рассматриваемые явления происходят в разные фенологические (естественные) сезоны и подсезоны, которые не всегда совпадают с климатическими сезонами (часто фенологические рубежи отстают от климатических). Индикатором наступления подсезона разгар весны (зеленая весна) в средней полосе является начало разворачивания листьев у березы, которое происходит при устойчивом переходе средней суточной температуры воздуха через 8°C (Минин, 1995; Минин и др., 2016). Характерными признаками этого периода также выступают цветение черемухи, кукование кукушки и прилет деревенской ласточки. Начало цветения липы сердцелистной является индикатором наступления подсезона полное лето (краснолетье) (Минин и др., 2018). Характерным признаком наступления подсезона золотая осень выступает полное пожелтение листьев у березы.

Температура атмосферного воздуха (рис. 1)

Тренд на потепление отмечается во все сезоны и на всей территории (рис. 1) (Доклад..., 2023). Наиболее активно годовая температура повышается на севере и юге территории; зимняя – на крайнем северо-востоке и юге (на юго-востоке темпы минимальные); весенняя – на северо-востоке (в центральных районах в 2 и более раз медленнее); летняя, как и зимняя, – на севере и юге; осенняя – на большей части территории за исключением юго-востока.

Береза (рис. 2 а,б,в; 3 а,б,в)

Изофены средних многолетних значений дат начала разворачивания листьев имеют широтное расположение, только в южной полосе изолинии идут с северо-запада на юго-восток.

Скорость продвижения «зеленой волны» снижается от 1 дня и менее на 1 градус широты на юге до 2-3 дней на 1 градус в северо-восточных районах ЕЧР. Области разных значений сменяются с запада на восток: в западном секторе преобладают смещения на более ранние сроки (до -2.0...-2.5 дней/10 лет), в центральном и восточном секторах незначительные смещения на более поздние. Но фактически тренды слабые. Также следует учитывать, что пунктов наблюдений в восточном секторе сравнительно немного. Полная осенняя окраска листьев березы практически везде стала наступать позже. Поле изолиний средних многолетних значений отличается от картины с первыми листьями: в целом также прослеживается направление север – юг, но изолинии носят более ломаный характер. Вегетационный период имеет тенденцию к удлинению практически на всей территории ЕЧР со скоростью до 3-4 дней/10 лет.

Отклонения дат начала появления листьев в 2022 г. на значительной части территории составляют до ± 2 дня, на западе региона и на Урале – в сторону осени, лишь в Воронежской области в сторону весны (до -5 дней). Отклонения дат полного пожелтения в основном в сторону осени, на более ранние сроки в Московском регионе и на востоке территории (Урал). Отклонения значений продолжительности периода вегетации у березы в 2022 г. практически дублируют картину с трендами: на Урале, в Московском регионе и на северо-западе отклонения в сторону сокращения, на юге и в центральной части территории – в сторону увеличения.

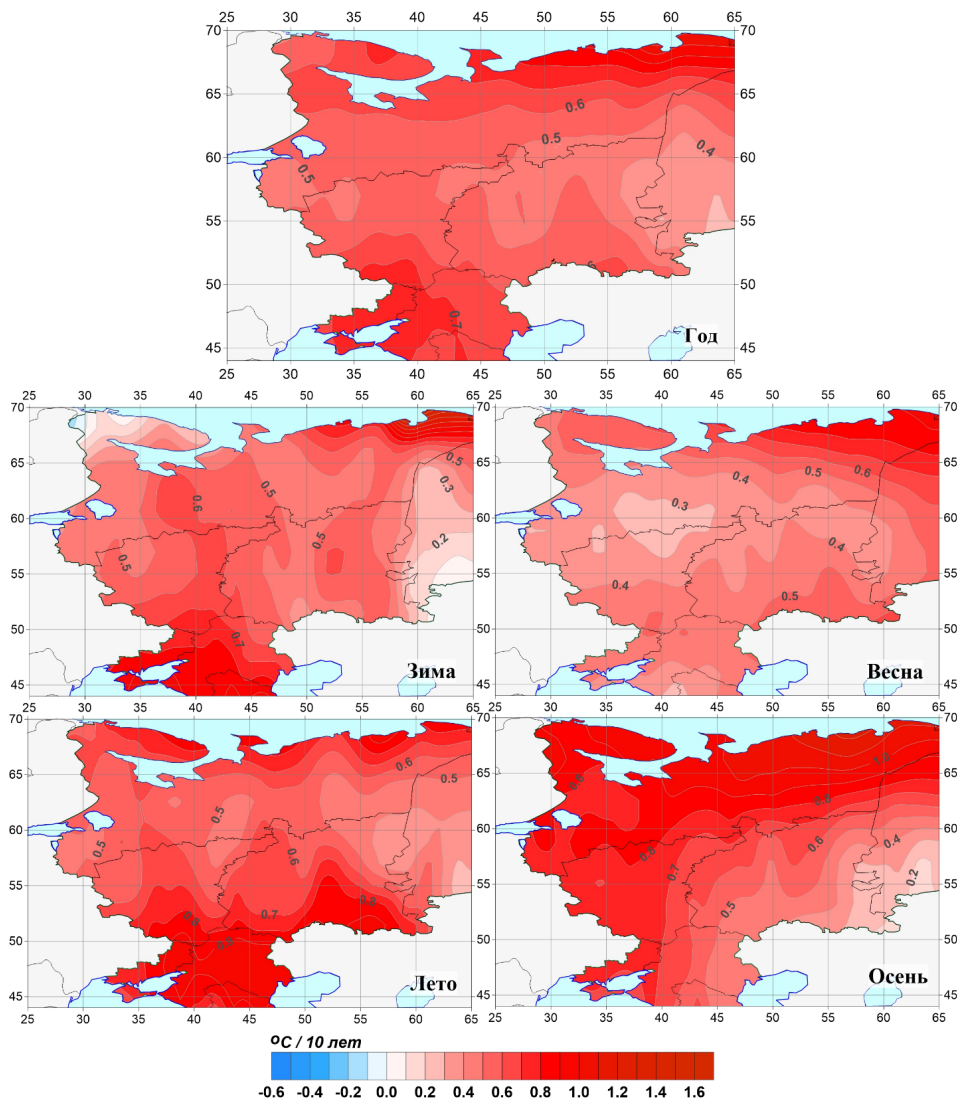


Рисунок 1. Коэффициент линейного тренда среднегодовой и средних сезонных значений температуры приземного воздуха на европейской территории России за период 1991-2022 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет)

Figure 1. Coefficient of linear trend of average annual and average seasonal values of surface air temperature in the European territory of Russia for the period 1991-2022 ($^{\circ}\text{C}/10$ years)

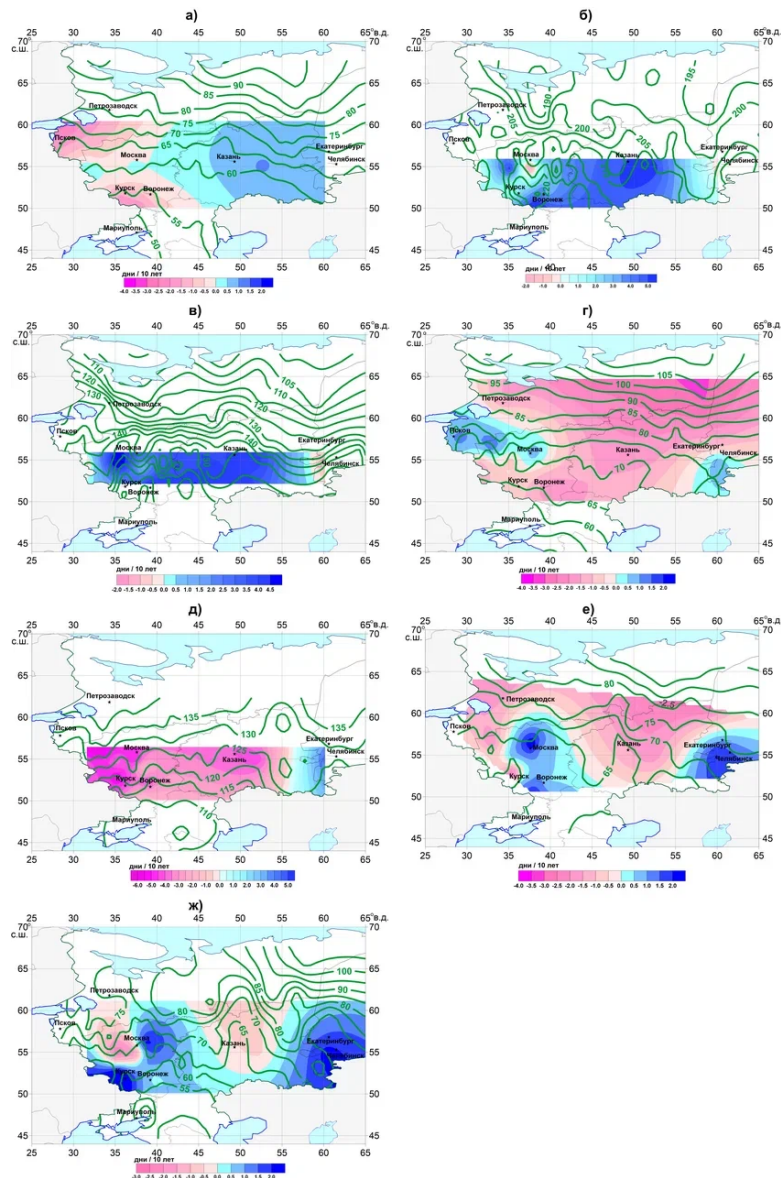


Рисунок 2. Средние многолетние значения сроков наступления феноявлений за период 1971-2020 гг. (изофены, дни, отсчет от 1 марта); коэффициенты линейного тренда за период 1991-2022 гг. (цветная заливка, дни/10 лет)

Береза: а) начало разворачивания листьев; б) полное пожелтение листьев;
 в) продолжительность вегетационного периода (дни); г) начало цветения черемухи обыкновенной; д) начало цветения липы сердцелистной; е) первое кукование кукушки;
 ж) весенний прилет деревенской ласточки

Figure 2. Average long-term values of the occurrence dates of phenological phenomena for the period 1971-2020. (isophenes, days, counting from March 1); linear trend coefficients for the period 1991-2022 (color fill, days/10 years)

Betula: а) the beginning of leaf deployment; б) a complete yellowing in leaf;
 в) the duration of the growing season (days); г) the beginning of flowering of *Prunus padus* L.;
 д) the beginning of flowering of *Tilia cordata* Mill.; е) the first cuckooing of *Cuculus canorus* L.;
 ж) the spring arrival of *Hirundo rustica* L.

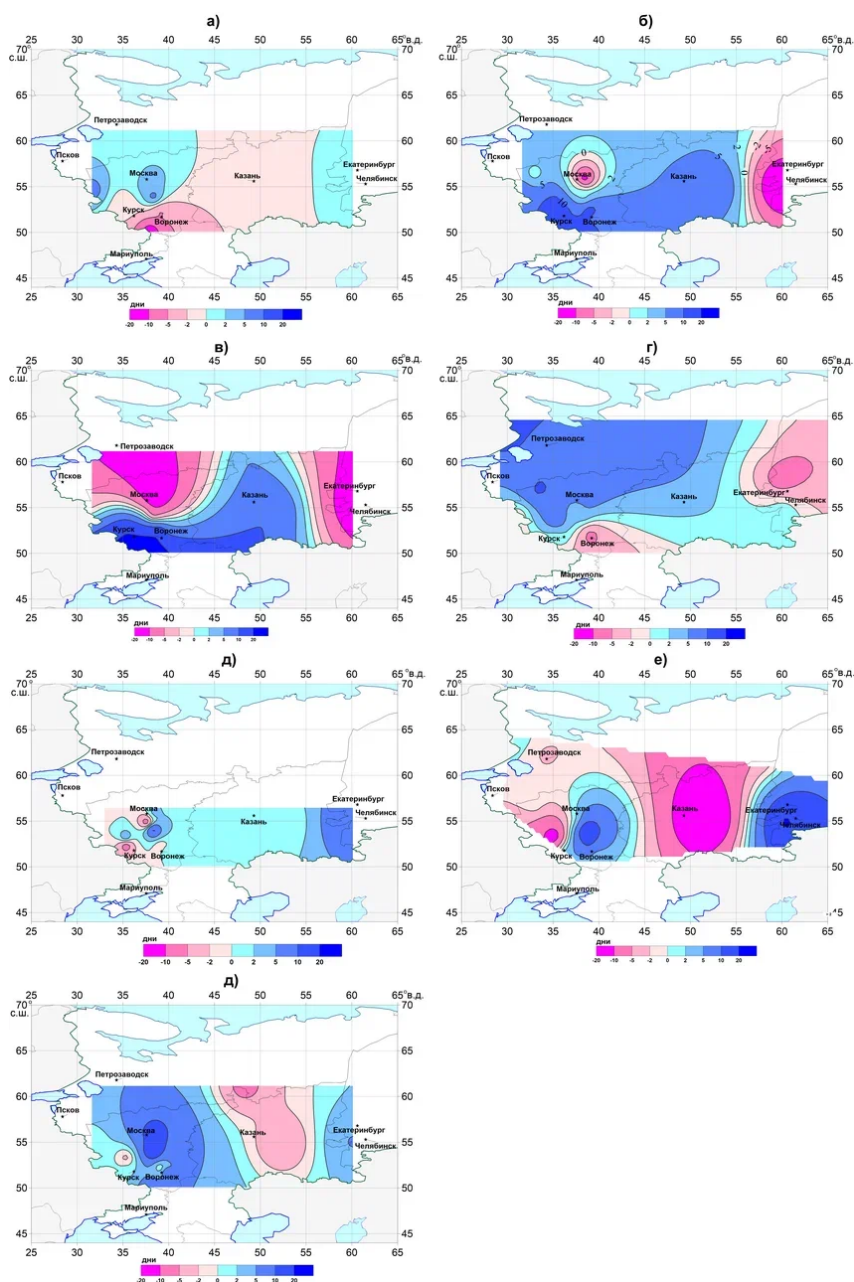


Рисунок 3. Отклонения (дни) сроков наступления событий в 2022 г. от средних многолетних значений (1971-2020 гг.)

Береза: а) начало разворачивания листьев; б) полное пожелтение листьев; в) продолжительность вегетационного периода; г) начало цветения *черемухи обыкновенной*; д) начало цветения *липы сердцелистной*; е) первое кукование кукушки; ж) весенний прилет *деревенской ласточки*

Figure 3. Deviations (days) of the timing of events in 2022 from long-term averages (1971-2020)
Betula: а) the beginning of the unfolding of the leaves; б) a complete yellowing of the leaves; в) the duration of the growing season; г) the beginning of flowering of *Prunus padus* L.; д) the beginning of flowering of *Tilia cordata* Mill.; е) the first cuckooing of *Cuculus canorus* L.; ж) the spring arrival of *Hirundo rustica* L.

Черемуха обыкновенная (рис. 2г, 3г, 4)

Черемуха начинает цвести через 10-12 дней после разворачивания первых листьев у березы. Поля изолиний средних многолетних значений имеют сходную с березой конфигурацию и скорости продвижения. Но поля коэффициентов трендов различаются. У черемухи преобладают смещения на более ранние сроки на большей территории, причем скорость возрастает в северном направлении. Выделяются области с положительными тенденциями на западе и юго-востоке региона. На графиках многолетней динамики (рис. 4) по всем пунктам смещения на более ранние сроки. Отклонения в 2022 г. локально на юге и востоке отрицательные, на остальной территории – положительные.

Липа сердцелистная (рис. 2д, 3д)

Изолинии средних значений дат начала цветения имеют преимущественно широтное расположение, волна цветения идет с юга. Скорость продвижения в западной и центральной части составляет около 3 дней на градус, на востоке, в Предуралье – менее 1 дня. Смещение сроков в сторону весны усиливается от восточной области к северу и к западу, где коэффициент достигает -4...-5 дней/10 лет. Отклонения в 2022 г. на подавляющей площади территории в сторону осени, лишь на крайнем западе есть территории с отрицательными отклонениями.

Кукушка (рис. 2е, 3е, 5)

Изолинии дат первого кукования отражают общий характер продвижения кукушки с юго-запада на северо-восток и север со скоростью от 1 и менее дней на градус широты на юге до 3 и более дней на градус на северо-востоке, как у березы и черемухи. Как в случае с черемухой, коэффициенты трендов на более раннее кукование повышаются с юга на северо-восток и северо-запад (до -2.0...-2.5 дней/10 лет). А в центре и на юго-востоке сформировались области с противоположными знаками. На графиках рис. 5 фиксируется разнонаправленные слабовыраженные смещения первой песни кукушки, пространственно соответствующие рис. 2е.

Картина отклонений в 2022 г. подобна ситуации с трендами: в обширной области от Воронежа на север и на Урале отклонения на более поздние сроки (до 10 дней), между этими зонами области с отрицательными отклонениями. Хорошо проявляется долина Волги с отклонениями на ранние сроки до -10 дней.

Деревенская ласточка (рис. 2ж, 3ж)

Скорость продвижения ласточки замедляется от одного дня на юге до 3-5 дней на градус широты на северо-востоке. Хорошо проявляются бассейн Волги, по которому ласточки, очевидно, продвигаются раньше, чем на прилегающих территориях, и Урал, где, напротив, они появляются с опозданием. С запада на восток чередуются области с отрицательными и положительными небольшими по абсолютной величине значениями коэффициентов трендов

(± 1.5 дней/10 лет). Отклонения в 2022 г., как и в случае с кукушкой, повторяют в целом картину трендов, но преобладают синие цвета, что свидетельствует о более позднем появлении ласточек в этом году. Лишь в бассейне Волги отмечается зона с красным цветом.

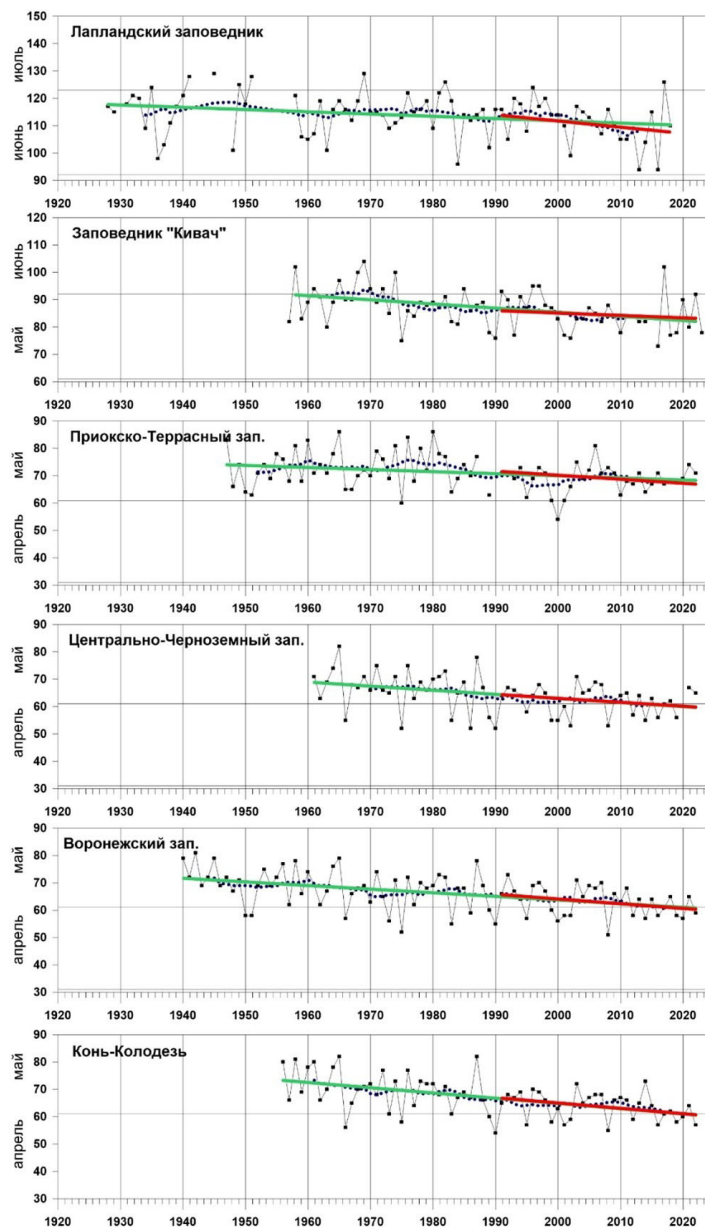


Рисунок 4. Динамика дат начала цветения черемухи с линиями трендов за весь период наблюдений (зеленая линия) и за 1991-2022 гг. (красная линия). Пунктирной линией показано 11-летнее скользящее среднее. Заповедники: Лапландский, Кивач, Приокско-Террасный, Центрально-Черноземный, Воронежский; пос. Конь-Колодезь (Липецкая обл.)

Figure 4. Dynamics of the dates of the beginning of *Prunus padus* L. with trend lines for the entire observation period (green line) and for 1991-2022 (red line). The dotted line shows the 11-year moving average. Nature Reserves: Lapland, Kivach, Prioksko-Terrasny, Central Chernozem, Voronezh; village Kon'-Kolodez' (Lipetsk region)

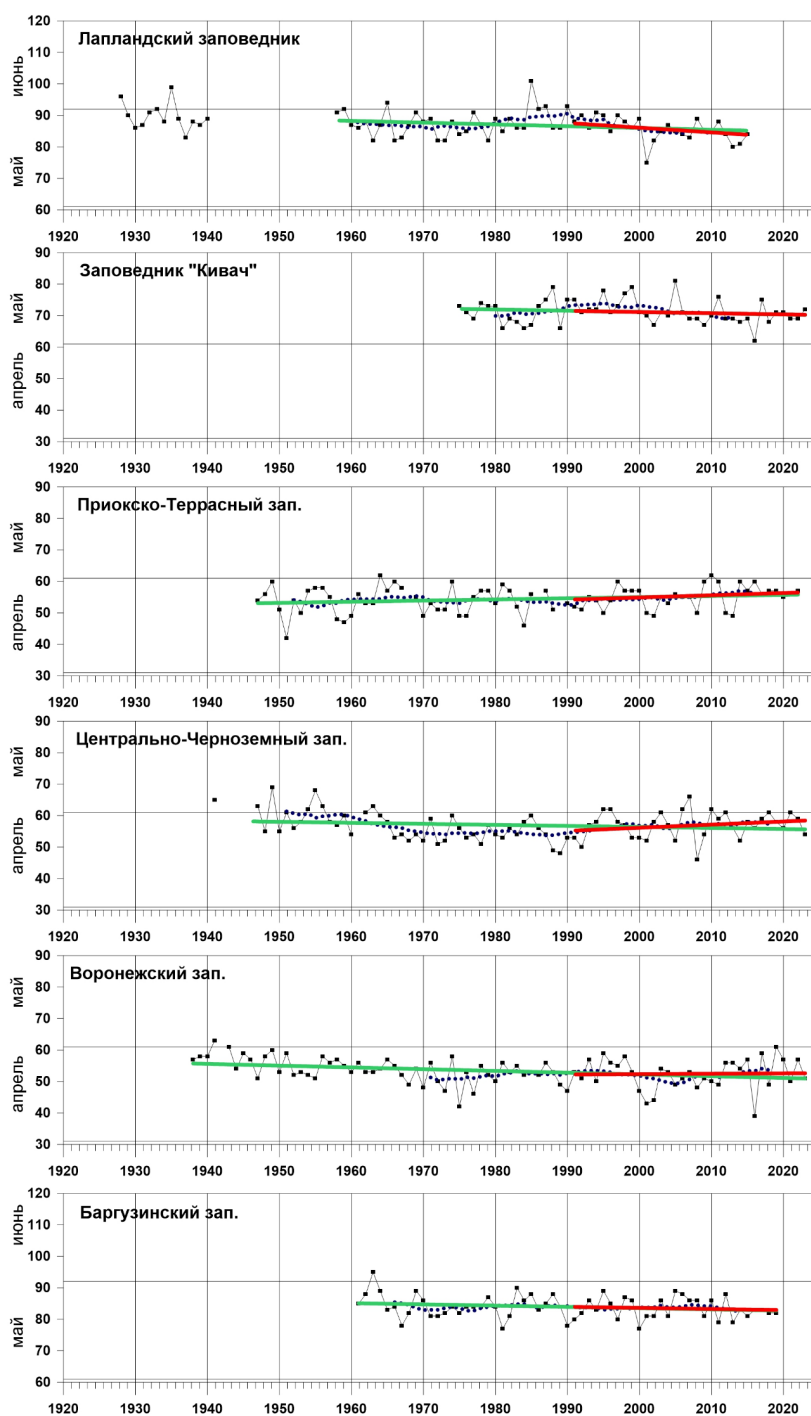


Рисунок 5. Первое кукование кукушки. Заповедники: Лапландский, Кивач, Приокско-Тerrasный, Центрально-Черноземный, Воронежский, Баргузинский
Условные обозначения см. на рис. 4

Figure 5. The first cuckooing of the *Cuculus canorus* L. Nature Reserves (up-to-down): Lapland, Kivach, Prioksko-Terrasnyi, Central Chernozem, Voronezh, Barguzinsk
See the legend in Fig. 4

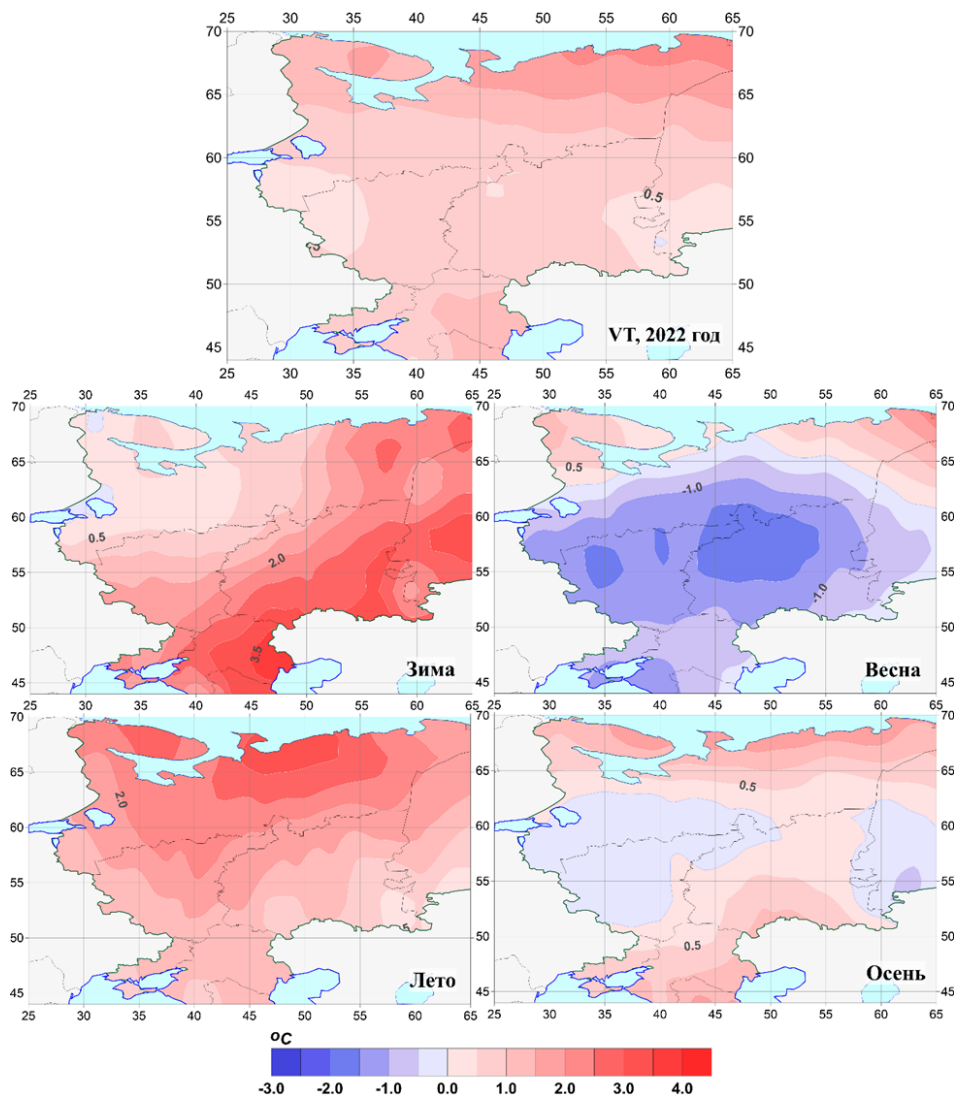


Рисунок 6. Аномалии средней годовой и средних сезонных значений температур приземного воздуха на европейской территории России в 2022 г. (отклонения от средних за 1991-2020 гг.) (Доклад..., 2023)

Figure 6. Anomalies of the average annual and average seasonal surface air temperatures in the European territory of Russia in 2022 (deviations from the average for 1991-2020) (Report..., 2023)

Обсуждение

Общая закономерность для всех рассматриваемых явлений – смещение средних многолетних значений дат наступления весенних и летних явлений с юга на север на более поздние сроки, аналогично сокращение продолжительности вегетационного периода, и обратное направление для осенних явлений, что свидетельствует о едином климатическом факторе, обуславливающим

данную закономерность. Это, в первую очередь, характер распределения поступающей от Солнца энергии по широтам и по времени года, который определяет и сходный режим функционирования живой природы.

Выявленная общая тенденция активного потепления всех сезонов и года в целом (до $0.8-1.0^{\circ}\text{C}/10$ лет) предопределяет, казалось бы, соответствующие изменения в динамике живой природы. Однако полного соответствия нет (рис. 1, 2). Начало разворачивания листьев у березы за период 1971-2020 гг. стало наступать на 5-10 дней раньше, чем за период 1962-1966 гг. (Сезонная жизнь..., 1970). Более того, тренд на более ранние сроки, например, в парке Лесотехнической академии Санкт-Петербурга прослеживается с середины 1860-х годов до 1970 г. (Сезонная жизнь..., 1979). Хотя, возможно, это обусловлено влиянием развивающегося «острова тепла» над крупным городом. Смена областей разных трендов с запада на восток за период 1991-2022 гг. видимо, в большей степени обусловлена внутривнутрипопуляционными процессами, чем климатом. Ранее были описаны особенности гомеостатических механизмов противостояния биоты направленным внешним воздействиям (Минин и др., 2018). Этими же механизмами, очевидно, обусловлены и относительно небольшие по абсолютным значениям коэффициенты линейных трендов (рис. 2а). Полное пожелтение листьев практически повсеместно стало наступать позже, причем абсолютные значения коэффициентов существенно выше, чем у весеннего явления – до 4-5 дней/10 лет (рис. 2б).

Вариабельность средних значений может быть обусловлена большим участием в осенних фенособытиях геоморфологических, гидрологических, погодных факторов, чем это происходит весной, когда преобладает влияние термического фактора.

Соответственно, продолжительность вегетационного периода практически повсеместно увеличилась, в основном за счет осеннего явления (рис. 2в). Аналогичная тенденция отмечена на территории Китая (Ge et al., 2014). Ученными США было показано, что у лиственных пород бореальной зоны современное потепление несколько замедляет старение листьев и удлиняет вегетационный период, в том числе у родственной нашим березам *Betula papyrifera* Marshall до 14 дней (Montgomery et al., 2020). Аналогичные результаты получены в работе (Воскова и др., 2007), где увеличение продолжительности вегетационного периода у березы в северных районах ЕЧР за 1970-2000 гг. тоже достигало двух недель. Можно предположить, что и в нашем случае это стало как проявлением пластичной реакции вида на улучшение условий вегетации (потепление, увеличение количества осадков), так и эволюционно сформированной адаптацией видов к условиям смены периодов оледенения и межледниковья. Климатические изменения плейстоцена в умеренных широтах допускали изменение (в ту или другую сторону) продолжительности вегетационного периода при сохранении минимально необходимой длительности периода полного покоя. Его продолжительность составляет в умеренных широтах 2-3 месяца; с середины зимы, когда обычны низкие температуры, наступает период вынужденного покоя (Горышина, 1979). Однако также очевидно, что есть пределы увеличения продолжительности жизнедеятельности

листьев и, следовательно, вегетационного периода. При активном потеплении метаболизм листьев неизбежно ускоряется и их жизненные ресурсы расходуются быстрее. Потепление может в какой-то степени сглаживать фактор продолжительности светового дня, который посылает сигналы к осенним изменениям в состоянии листвы листопадных деревьев. Но, очевидно, не следует ожидать бесконечного возрастания продолжительности вегетации в результате потепления. Поэтому важно наблюдать за сезонными изменениями у берез, чтобы отследить момент торможения роста продолжительности вегетационного периода.

Интересно, что поля трендов дат начала цветения черемухи и первых листьев у березы различаются, хотя они происходят в одном подсезоне. Скорость смещения дат начала цветения черемухи возрастает в направлении северо-востока, что соответствует пространственным особенностям потепления весны (рис. 1, 2г). Однако сформировались две области противоположных тенденций: от Москвы до Санкт-Петербурга и в Челябинской области, которые в целом соответствуют областям пониженных скоростей изменений весенней температуры (рис. 1). Можно предположить, что одна (или несколько) популяций демонстрируют большую пластичность по отношению к климатическим изменениям, а другие локально адаптированные популяции черемухи (в Московском регионе, Челябинской области) демонстрируют устойчивость по отношению к температурным трендам. Если представить биологические виды как совокупность локально адаптированных популяций, то климатические изменения запускают процесс микроэволюции или приводят к исчезновению отдельных адаптаций (Phillimore et al., 2010; Tansey, 2017; Delgado et al., 2020). Таким образом, возможно, на примере черемухи мы сталкиваемся с разными популяционными стратегиями одного вида в разных регионах. С другой стороны, возможен вариант влияния пространственной неравномерности климатических изменений.

Графики многолетней динамики дат начала цветения черемухи (рис. 4) показывают преобладающую тенденцию на их смещение в сторону весны. Причем проявляется она заметно с середины 1970-х годов, которые приняты и за начало современного потепления в России. Однако по Санкт-Петербургу, как и в случае с березой, тенденция на установление более ранних сроков зацветания черемухи прослеживается с середины 1860-х годов (Сезонная жизнь..., 1979). Характер изменений коэффициентов трендов дат начала цветения липы в целом соответствует картине изменений летней температуры (рис. 1) и полям значений коэффициентов у березы (начало разворачивания листьев) и черемухи (начало цветения) в полосе 50-56° с.ш.

Таким образом, можно полагать, тенденции изменений сроков наступления сезонных явлений у рассмотренных видов деревьев отражают общую реакцию на потепление. Пространственная неоднородность фенологических реакций на изменения климата может объясняться наличием локальных адаптаций в популяционной структуре видов, а также физико-географическими особенностями территорий.

Следует отметить практическое совпадение полей коэффициентов трендов для первого кукования кукушки и прилета деревенской ласточки (рис. 2). Характерны области отрицательных значений на юго-западе и юго-востоке территории. Важно учитывать: оба вида насекомоядных появляются в местах гнездования, когда там сформировались условия, благоприятные для обитания и размножения. Задержка прилетов у обоих видов свидетельствует о том, что на зимовках, при перелетах возникают определенные обстоятельства (погодные, кормовые), которые пока трудно объяснить. Но более ранние прилеты определяются готовностью кормовой базы экосистем к приёму мигрантов. В северных широтах благоприятные условия для них стали наступать раньше, что и определило сдвиг дат прилета, особенно у кукушки, на -2.5 дня/10 лет. Здесь очевидное следование климатическим изменениям.

Анализ отклонений дат начала явлений в 2022 г. от средних многолетних показывает, что этот год не был сильно аномальным. Однако впервые за несколько лет на большей части ЕЧР весной были зафиксированы отклонения температуры воздуха до -0.84°C (рис. 6), что отразилось на фенологии как растений, так и птиц. У деревьев преобладают по площади положительные значения в пределах 10 дней. То есть явления наступали с некоторым запозданием относительно многолетних средних. Отклонения у птиц, особенно у деревенской ласточки, также были в основном в сторону более поздних сроков. Характерно, что региональные особенности трендов у птиц практически дублируются на схемах отклонений в 2022 г. Очевидно, что многолетние закономерности прилетов птиц проявились и в 2022 г.

Заключение

Анализ многолетних рядов фенологических данных показал, что в целом живая природа реагирует на современное потепление. Наступают раньше весенние события, осенние – позже, на значительной площади возрастает продолжительность вегетационного периода. Однако однозначного следования фенологических показателей за климатическими везде и всегда не выявлено. Очевидно, есть территориальные особенности проявления реакций, обусловленные как спецификой ландшафтов (предгорья, горы, склоны разной экспозиции, речные долины, характер почвогрунтов, гидрологический режим), так и эволюционно сформированной популяционной структурой видов в тех или иных ландшафтах с разной историей развития. Отклонения сроков наступления явлений в 2022 г. на более поздние сроки стали реакцией на холодную весну. Таким образом, фенологические материалы дополняют климатические данные, позволяют оценивать реакцию биоты как на долговременные изменения климата, так и на его проявления в конкретном году. Можно сделать вывод, что фенологический раздел в ежегодный доклад Росгидромета об особенностях проявления климата на территории Российской Федерации может играть важную роль в более глубоком и комплексном понимании происходящих в природе изменений.

Благодарности

Авторы выражают признательность всем многочисленным наблюдателям за сезонными изменениями в природе на сети РГО и заповедников, много лет собирающих и предоставляющих в общероссийскую базу данные, благодаря которым формируется народная Летопись природы России.

Список литературы

Владимиров, Д.Р., Гладилин, А.А., Гнеденко, А.Е., Глухов, А.И., Грудинская, В.А., Здравчев, Н.С., Лебедев, П.А., Минин, А.А., Мироненко, И.В., Сенатор, С.А., Симакова, К.А., Тихомирова, А.В., Шайкина, М.Н., Шипилина, Л.Ю., Ширяев, А.Г., Юрманов, А.А., Янцер, О.В. (2023) *Методика ведения фенологических наблюдений. Памяти основоположника русской фенологии Дмитрия Никифоровича Кайгородова (1846-1924)*, СПб., Русское географическое общество, 208 с.

Воскова, А.В., Гордеева, З.И., Минин, А.А. (2007) Изменение продолжительности вегетации у березы бородавчатой на Восточно-Европейской равнине за последние десятилетия, *Известия РАН, сер. Географическая*, № 3, с. 59-61.

Горышина, Т.К. (1979) *Экология растений*. Учеб. Пособие, М., Высшая школа, 368 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год (2023) М., Росгидромет, 104 с.

Елагин, И.Н. (1976) *Сезонное развитие сосновых лесов*, Новосибирск, Наука, 230 с

Минин, А.А. (1995) Опыт относительного составления календаря природы Русской равнины, *Лесоведение*, № 1, с. 92-94.

Минин, А.А., Ананин, А.А., Буйолов, Ю.А., Ларин, Е.Г., Лебедев, П.А., Поликарпова, Н.В., Прокошева, И.В., Руденко, М.И., Сапельникова, И.И., Федотова, В.Г., Шуйская, Е.А., Яковлева, М.В., Янцер, О.В. (2020) Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России. *Nature Conservation Research, Заповедная наука*, т. 5(4), с. 89-110, doi: 10.24189/nrc.2020.060.

Минин, А.А., Буйолов, Ю.А., Фомин, Б.Н., Лебедев, П.А. (2023) Временные ряды фенологических данных северной Евразии. *Свидетельство о регистрации базы данных 2023620776*, 03.03.2023, Заявка № 2023620358 от 14.02.2023.

Минин, А.А., Ранькова, Э.Я., Рыбина, Е.Г., Буйолов, Ю.А., Сапельникова, И.И., Филатова, Т.Д. (2016) Феноиндикация изменений климата за период 1976-2015 гг. в центральной части европейской территории России: береза бородавчатая (повислая) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.)),

Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXVII, № 2, с. 17-28.

Минин, А.А., Ранькова, Ф.Я., Буйволов, Ю.А., Сапельникова, И.И., Филатов, Т.Д. (2018) Фенологические тренды в природе центральной части Русской равнины в условиях современного потепления, *Жизнь Земли*, т. 40, № 2, с. 162-174.

Сезонная жизнь природы Русской равнины. Дневники природы за 1962-1966 гг. (1970) Л., Наука, 316 с.

Сезонная жизнь природы Русской равнины. Календари природы Нечерноземной зоны России за 1960-1972 гг. (1979) Л., Наука, 163 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008) М., Росгидромет, 291 с.

Delgado, M., Roslin, T., Tikhonov, G. et al. (2020) Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 49, pp. 31249-31258, doi: 10.1073/PNAS.2002713117.

Ge, Q., Wang, H., Rutishauser, T., Dai, J. (2014) Phenological response to climate change in China: A meta-analysis, *Global Change Biology*, no. 21, pp. 265-274, doi: 10.1111/gcb.12648.

Montgomery, R.A., Rice, K.E., Stefanski, A., Rich, R.L., Reich, P.B. (2020) Phenological responses of temperate and boreal trees to warming depend on ambient spring temperatures, leaf habit, and geographic range, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 19, pp. 10397-10405, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1917508117>.

Phillimore, A.B., Hadfield, J.D. Jones, O.R, Smithers, R.J. (2010) Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 18, pp. 8292-8297, doi: 10.1073/pnas.0913792107.

Tansey, C.J., Hadfield, J.D., Phillimore, A.B. (2017) Estimating the ability of plants to plastically track temperature-mediated shifts in the spring phenological optimum, *Glob Chang Biol*, vol. 23, no. 8, pp. 3321-3334, doi: 10.1111/gcb.13624.

References

Vladimirov, D.R., Gladilin, A.A., Gnedenko, A.E., Gluhov, A.I., Grudinskaya, V.A., Zdravchev, N.S., Lebedev, P.A., Minin, A.A., Mironenko, I.V., Senator, S.A., Simakova, K.A., Tihomirova, A.V., Shajkina, M.N., Shipilina, L.Yu., Shiryaev, A.G., Yurmanov, A.A., Yancer O.V. (2023) *Metodika vedeniya fenologicheskikh nablyudenij* [Methodology for conducting phenological observations]. *Pamyati osnovopolozhnika russkoj fenologii Dmitriya Nikiforovicha Kajgorodova (1846-1924)*, St. Petersburg, Russia, 208 p.

Voskova, A.V., Gordeeva, Z.I., Minin, A.A. (2007) *Izmenenie prodolzhitel'nosti vegetacii u berezy borodavchatoy na Vostochno-Evropejskoj ravnine za poslednie desyatiletija* [Changes in the growing season of the warty birch in the Eastern European plain over the past decades], *Izvestia of the Russian Academy of Sciences, Geographical series*, no. 3, pp. 59-61.

Goryshina, T.K. (1979) *Ekologiya rastenij* [Plant ecology], Moscow, Russia, 368 p.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2022 god [Report on climate features in the Russian Federation for 2022] (2023) Moscow, Russia, 104 p.

Elagin, I.N. (1976) *Sezonnoe razvitie sosnovyh lesov* [Seasonal development of pine forests], Novosibirsk, Russia, 230 p.

Minin, A.A. (1995) *Opyt otnositel'nogo sostavleniya kalendarya prirody Russkoj ravniny* [The experience of relative compilation of the calendar of the nature of the Russian plain], *Lesovedenie*, no. 1, pp. 92-94.

Minin, A.A., Ananin, A.A., Bujvolov, Yu.A., Larin, E.G., Lebedev, P.A., Polikarpova, N.V., Prokosheva, I.V., Rudenko, M.I., Sapel'nikova, I.I., Fedotova, V.G., Shujskaya, E.A., Yakovleva, M.V., Yancer, O.V. (2020) *Rekomendacii po unifikacii fenologicheskikh nablyudenij v Rossii* [Recommendations for the unification of phenological observations in Russia], *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, vol. 5(4), pp. 89-110, doi:10.24189/ncr.2020.060.

Minin, A.A., Bujvolov, Yu.A., Fomin, B.N., Lebedev, P.A. (2023) *Vremennye ryady fenologicheskikh dannyh severnoj Evrazii* [Time series of phenological data from northern Eurasia], *Svidetel'stvo o registracii bazy dannyh 2023620776, 03.03.2023, Zayavka № 2023620358 ot 14.02.2023*.

Minin, A.A., Ran'kova, E.Ya., Rybina, E.G., Bujvolov, Yu. A., Sapel'nikova, I. I., Filatova, T.D. (2016) *Fenoindikaciya izmenenij klimata za period 1976-2015 gg. v central'noj chasti evropejskoj territorii Rossii: bereza borodavchataya (povislaya) (betula verrucosa ehrh. (b. pendula roth.))* [Phenoindication of climate change for the period 1976-2015. in the central part of European Russia: silver birch (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.))], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. XXVII, no. 2, pp. 17-28.

Minin, A.A., Ran'kova, F.Ya., Bujvolov, Yu.A., Sapel'nikova, I.I., Filatova, T.D. (2018) *Fenologicheskie trendy v prirode central'noj chasti Russkoj ravniny v usloviyah sovremennogo potepleniya* [Phenological trends in the nature of the central part of the Russian Plain under conditions of modern warming], *Life of the Earth*, vol. 40, no. 2, pp. 162-174.

Sezonnaya zhizn' prirody Russkoj ravniny. Dnevniki prirody za 1962-1966 gg [Seasonal life of nature on the Russian Plain. Nature Diaries for 1962-1966] (1970) Leningrad, Russia, 316 p.

Sezonnaya zhizn' prirody Russkoj ravniny. Kalendari prirody Nechernozemnoj zony Rossii za 1960-1972 gg [Seasonal life of nature on the Russian Plain. Nature calendars of the Non-Black Earth zone of Russia for 1960-1972] (1979) Leningrad, Russia, 163 p.

Ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2008) Moscow, Russia, 291 p.

Delgado, M., Roslin, T., Tikhonov, G. et al. (2020) Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 49, pp. 31249-31258, doi: 10.1073/PNAS.2002713117.

Ge, Q., Wang, H., Rutishauser, T., Dai, J. (2014) Phenological response to climate change in China: A meta-analysis, *Global Change Biology*, no. 21, pp. 265-274, doi: 10.1111/gcb.12648.

Montgomery, R.A., Rice, K.E., Stefanski, A., Rich, R.L., Reich, P.B. (2020) Phenological responses of temperate and boreal trees to warming depend on ambient spring temperatures, leaf habit, and geographic range, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 19, pp. 10397-10405, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1917508117>.

Phillimore, A.B., Hadfield, J.D., Jones, O.R., Smithers, R.J. (2010) Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 18, pp. 8292-8297, doi: 10.1073/pnas.0913792107.

Tansey, C.J., Hadfield, J.D., Phillimore, A.B. (2017) Estimating the ability of plants to plastically track temperature-mediated shifts in the spring phenological optimum, *Glob Chang Biol.*, vol. 23, no. 8, pp. 3321-3334, doi: 10.1111/gcb.13624.

Статья поступила в редакцию (Received): 28.03.2024;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 17.06.2024;

Принята к публикации (Accepted): 08.08.2024.

Для цитирования / For citation:

Минин, А.А., Буйволов, Ю.А., Самохина, О.Ф., Бардин, М.Ю., Демидов, В.Э., Лебедев, П.А., Поликарпова, Н.В., Прокошева, И.В., Рыжков, О.В., Сапельникова, И.И., Фомин, Б.Н., Шуйская, Е.А., Яковлева, М.В., Янцер, О.В. (2024) Фенологические тренды в природе России: насколько они следуют за изменениями климата? *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 3, с. 378-398, doi:10.21513/2410-8758-2024-3-378-398.

Minin, A.A., Buyvolov, Yu.A., Samokhina, O.F., Bardin, M.Yu., Demidov, V.E., Lebedev, P.A., Polikarpova, N.V., Prokosheva, I.V., Ryzhkov, O.V.,

Sapelnikova, I.I. , Fomin, B.N., Shuiskaya, E.A., Yakovleva, M.V., Yanzer, O.V.
(2024) Phenological trends in Russian nature: how much do they follow climate changes? *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 3, pp. 378-398, doi:10.21513/2410-8758-2024-3-378-398.