

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 581.1;551.583

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ *Betula pendula* В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

© 2020 г. А. А. Минин*, И. Е. Трофимов*[@], В. М. Захаров*

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

[@]E-mail: trofimov@ecopolicy.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 25.10.2019 г.

Принята к публикации 25.10.2019 г.

Проведена оценка основных фенологических дат, включая разворачивание первых листьев, массовое пожелтение листвы и продолжительность периода вегетации, у березы повислой *Betula pendula* в 2005–2018 гг. в центральной части Европейской России для выявления возможных временных фенологических трендов в связи с глобальным изменением климата. Получены свидетельства наличия отрицательного тренда по времени разворачивания первых листьев и положительного тренда для пожелтения листьев. Отмечено, что выявленная картина фенологических изменений, характеризующая более раннее начало и более позднее окончание периода вегетации, соответствует известному тренду повышения температуры, а отсутствие ярко выраженного тренда в ряде популяций на севере и в центре рассматриваемой территории скорее свидетельствует не столько об увеличении, сколько о смещении периода вегетации на более ранние сроки. Обнаружено, что это может быть следствием необходимости поддержания определенной оптимальной продолжительности периода вегетации и его соотношения с продолжительностью периода покоя в изменившихся климатических условиях. Установлено, что отсутствие реакции или слабая реакция организма на определенное воздействие может быть результатом гомеостатических механизмов при их разной выраженности в центре и на экологической периферии ареала.

DOI: 10.31857/S0002332920020046

На фоне пристального внимания к климатической проблеме определение последствий глобального изменения климата для биоты представляет значительный теоретический и практический интерес. Среди приоритетных направлений таких исследований — оценка фенологических изменений у растений как одного из наиболее ярких проявлений таких последствий. При анализе многолетних трендов на фоне вполне ожидаемых в связи с потеплением климата изменений сроков начала и конца периода вегетации был отмечен ряд особенностей (Минин, 2000; Минин, Гутников, 2000; Jeong *et al.*, 2011; Pau *et al.*, 2011; Brown *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012; Minin, 2012). Среди них — замедленное по сравнению с темпами изменения температуры изменение сроков наступления определенных фаз жизни растений, особенно после 2000 г. (Jeong *et al.*, 2011; Минин и др., 2017). В то же время при характеристике последствий фенологических изменений на уровне сообщества отмечалась опережающая по сравнению с темпами изменения глобальной температуры реакция весенних фенологических проявлений у растений (Ovaskainen *et al.*, 2013). Отмечалась также

географическая изменчивость в реакции растений на климатические изменения (Минин, Воскова, 2014). В частности, более слабая фенологическая реакция растений в южных популяциях на климатические изменения, связанные с повышением глобальной температуры, интерпретировалась как проявление гомеостатических механизмов обеспечения успешного прохождения периодов органического покоя и вегетации.

Все это определяет актуальность проведения более детального анализа возможных изменений сроков наступления основных фенологических явлений в условиях изменения климата на современном этапе для модельного вида на определенной территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были использованы данные фенологических наблюдений сети в центральной части Европейской России с 2005 г. Оценка проводилась в отношении березы повислой *Betula pendula* по датам разворачивания первых листьев, массового пожелтения листвы, окончания листопада и продолжительности периода вегетации в 2005–2018 гг. Вы-

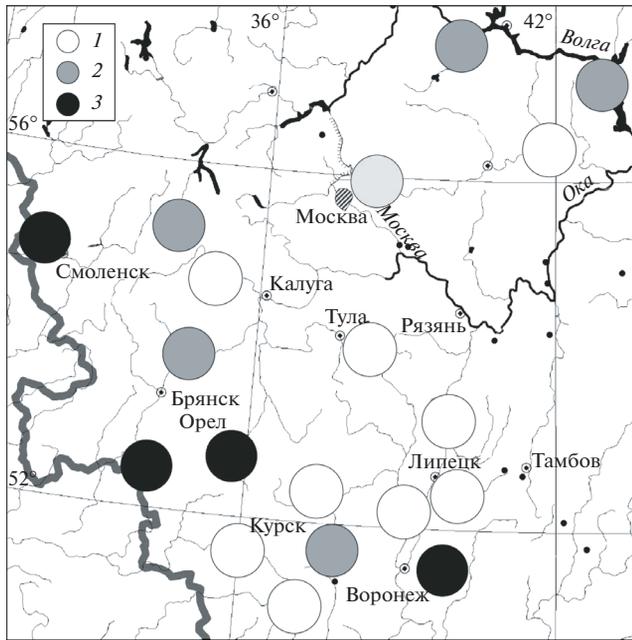


Рис. 1. Смещение даты разворачивания первых листьев у березы повислой *Betula pendula* в 2005–2018 гг., в днях. 1 – +2...–2; 2 – –3...–6; 3 – более –6. Точки – пункты наблюдений; для рис. 1–4.

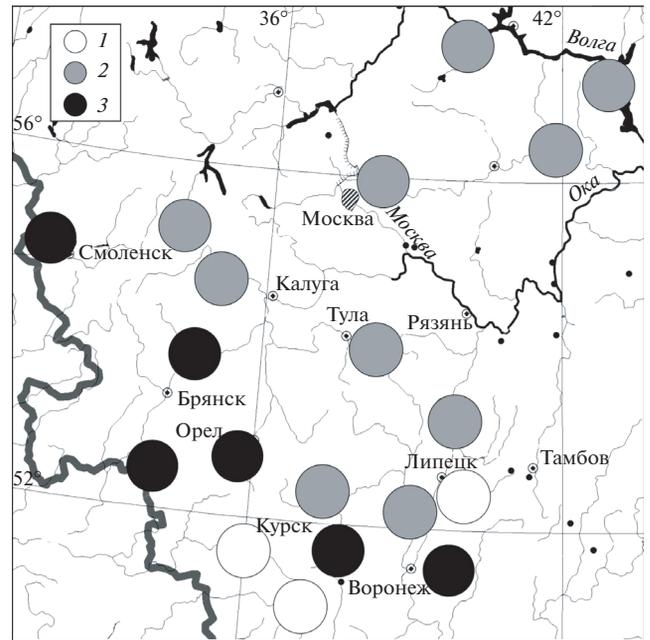


Рис. 2. Смещение даты разворачивания первых листьев у березы повислой *Betula pendula* в 2005–2018 гг., в днях (при исключении аномальных данных 2008 г.). 1 – 0...–2; 2 – –3...–6; 3 – более –6.

бренные параметры находятся среди наиболее обычных и в то же время показательных и надежно фиксируемых в системе фенологических наблюдений. В качестве дополнительных показателей были использованы также даты начала сокодвижения, начала цветения и начала пожелтения листьев.

Оценка тренда проводилась путем определения линейной регрессии. Значение разности между расчетными сроками наступления определенной фенологической фазы (на основании выявленной линии регрессии) в первый и последний годы наблюдений было использовано в качестве показателя произошедших изменений за исследуемый период.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для срока разворачивания первых листьев отрицательный тренд наблюдается на севере (до 5 дней) и на юге (до 11 дней) рассматриваемой территории, при большей выраженности изменений – в западной и юго-западной части. На значительной части в центре рассматриваемой территории явный тренд не наблюдается или очень слабо выражен (рис. 1).

Анализ дат наступления этой фазы показал, что для всех точек наблюдения, за исключением северных точек рассматриваемой территории, резко выделяется минимальные значения в 2008 г. Анализ изменчивости сроков разворачивания пер-

вых листьев в течение более длительного периода, начиная с 1970 г., там, где это было возможно (Минин, Воскова, 2014), показал, что в 2008 г. отмечается наименьшее значение показателя за весь данный период наблюдений. Это позволяет охарактеризовать наблюдаемое отклонение в датах в качестве аномалии и исключить его при оценке многолетнего тренда изменений. При исключении этого года наблюдений из анализа в отношении всех исследуемых точек (за исключением северных точек, где этот год резко не выделяется среди других лет наблюдений) картина существенно меняется. Отрицательный тренд теперь наблюдается во всех точках наблюдения (он появляется там, где его раньше не было, и становится более ярко выраженным в тех точках, для которых он уже был отмечен раньше, до исключения аномальной даты 2008 г.) (рис. 2).

При анализе времени массового пожелтения листьев, на фоне значительно выраженного положительного тренда (10–20 дней) в разных частях исследуемой территории, его отсутствие и даже отрицательные значения отмечаются на севере (до –4 дней) и в центральной части (до –2 дней) (рис. 3).

По времени окончания листопада положительный тренд (до 14 дней) наблюдается в большинстве точек наблюдения по всей территории, в отдельных случаях отрицательного тренда (до –10 дней) или его отсутствия в разных местах.

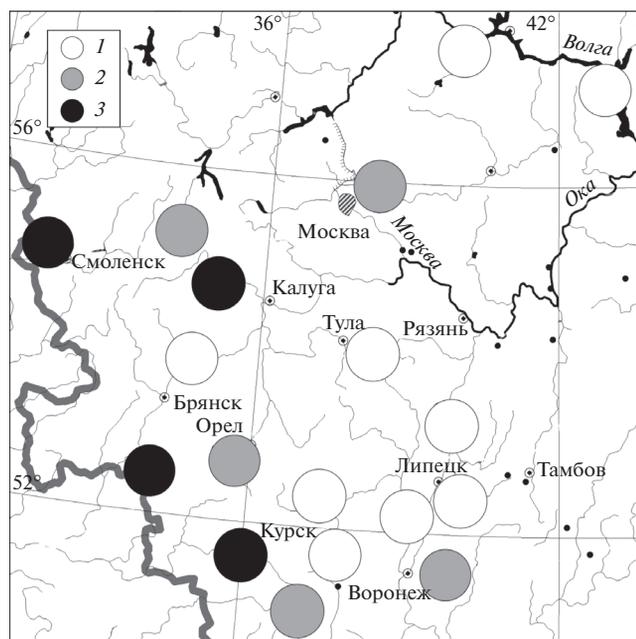


Рис. 3. Смещение даты пожелтения листьев у березы повислой *Betula pendula* в 2005–2018 гг., в днях. 1 – 0–4; 2 – 5–9; 3 – >9.

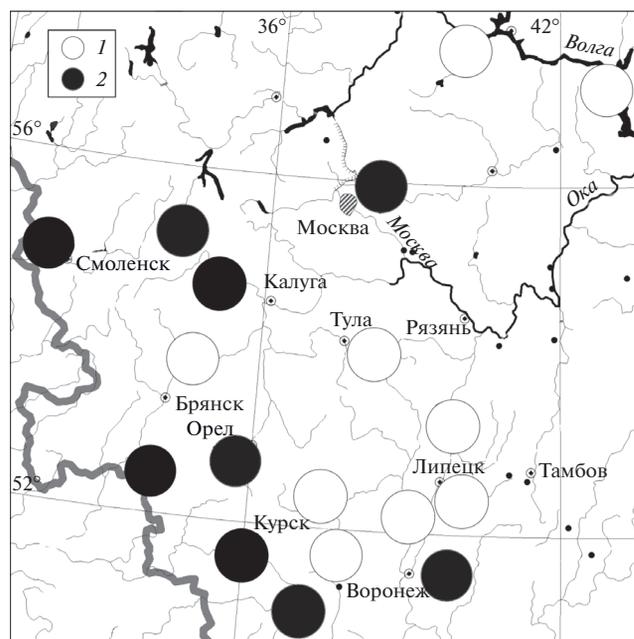


Рис. 4. Изменение продолжительности периода вегетации (как разницы между датами фенофаз пожелтения листьев и развертывания первых листьев) у березы повислой *Betula pendula* в 2005–2018 гг., в днях. 1 – 0–5; 2 – >8.

Продолжительность периода вегетации, которая рассчитывалась как временной интервал между датой развертывания первых листьев и датой массового пожелтения листьев, возрастает практически повсеместно, представляя существенный сдвиг во времени в целом ряде точек (от 10 до 30 дней), при минимальных значениях тренда на севере и в центре исследуемой территории (от 0 до 5 дней). В общих чертах картина различий в выраженности данного фенологического тренда между точками наблюдений на рассматриваемой территории сходна с полученной для даты пожелтения листьев (рис. 4).

Три дополнительные фенологические даты, включая начало сокодвижения, начало цветения, и начало пожелтения листьев, на рассматриваемой территории изменяются мозаично.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов фенологических наблюдений за модельным видом на исследуемой территории свидетельствует о наличии отрицательного тренда времени распускания первых листьев и положительного тренда для пожелтения листьев и листопада. Выявленная картина фенологических изменений, характеризующая более раннее начало и более позднее окончание периода вегетации, вполне соответствует известному тренду повышения температуры.

Более детальный анализ полученных данных позволяет выявить ряд особенностей в выражен-

ности этих трендов в период наблюдений на исследуемой территории. Прежде всего это практически повсеместно отмеченное аномально раннее время распускания листьев в 2008 г. (за исключением северной части территории). Такое явление, отмеченное для большинства точек наблюдения, представляет самостоятельный интерес в смысле его причинной обусловленности и возможных биологических последствий для популяций изучаемого вида и в более широком плане, на уровне сообщества, поскольку эта фенологическая дата обычно рассматривается в качестве реперной для характеристики периода начала весны для исследуемого сообщества. Это аномальное значение представляет значительный интерес и в методическом плане для характеристики выявляемых временных трендов по исследуемому параметру. Наличие таких резко отклоняющихся значений принципиально для характеристики тренда, а особенно актуально при работе с относительно непродолжительным периодом наблюдений. Единичное резко отклоняющееся значение показателя в начале или в конце исследуемого временного ряда может приводить к существенно различным выводам о наличии, выраженности и даже направленности тренда в изменении значений рассматриваемого показателя на анализируемом временном интервале. Применительно к настоящему исследованию исключение аномально низкого значения показателя

в 2008 г. (что представляется вполне оправданным, поскольку является единичным резко уклоняющимся значением, и не может быть использовано при выявлении общего направления в изменении показателя), которое находится в начале исследуемого временного ряда, приводит к однонаправленно большей выраженности тренда к смещению даты появления листьев на более ранние сроки для всех точек наблюдения.

Тренд к более раннему началу периода вегетации наблюдается на всей территории при некоторой тенденции к его большей выраженности в западной и юго-западной части. Это может быть, как следствием некоторых географических особенностей в изменении климата, так и свидетельством в пользу предположения о завершении ранее отмечавшегося периода некоторого торможения в реакции растений на происходящие изменения климата (явление гистерезиса) в южных популяциях по сравнению с более северными вследствие гомеостатических механизмов обеспечения оптимального соотношения периода вегетации и периода покоя (Минин, Воскова, 2014).

Обе даты, характеризующие завершение периода вегетации (время пожелтения листьев и листопада), свидетельствуют о наличии общего тренда к смещению на более поздние сроки. Сравнение их между собой показывает, что картина изменения срока листопада более мозаичная, положительные и отрицательные значения встречаются в соседних точках. Возможная причина этого — зависимость опадения листьев от резких изменений погоды. Вследствие этого для расчета периода вегетации более предпочтительным, видимо, можно считать время пожелтения листьев. Отметим отсутствие тренда или даже некоторые свидетельства отрицательного тренда в ряде популяций на севере и в центре рассматриваемой территории. При рассмотрении возможных гомеостатических механизмов это явление может свидетельствовать не столько об увеличении, сколько о смещении периода вегетации на более ранние сроки. Это может быть следствием необходимости поддержания определенной оптимальной продолжительности периода вегетации и его соотношения с продолжительностью периода покоя в изменившихся климатических условиях. Отсутствие реакции или слабая реакция организма на определенное воздействие может быть обусловлено гомеостатическими механизмами при их разной выраженности в центре и на периферии ареала. Перспективная задача дальнейших исследований — разносторонняя оценка состояния популяций растений в условиях изменения климата как на фоне явных фенологических изменений, так и при их отсутствии.

В целом проведенное исследование на относительно небольшом временном интервале за последние годы позволило выявить определенные

особенности по сравнению с ранее выполненным анализом (Минин, Воскова, 2014) в масштабе значительных временных интервалов и свидетельствует о целесообразности проведения таких исследований на разных временных интервалах как на уровне сообщества, так и на уровне определенных модельных видов.

Авторы выражают искреннюю признательность членам Наблюдательной фенологической сети, любезно предоставившим материалы для выполнения данной работы: Р.Г. Амировой, В.Г. Боднарюк, А.И. Горячеву, Н.Д. Захаренковой, Н.Н. Киселевой, Н.В. Кожохину, С.Г. Лихобабенко, В.А. Макеенкову, Т.Д. Медведевой, О.П. Мироновой, А.И. Ползиковой, Н.И. Ролдугиной, Е.Г. Романову, И.И. Сапельниковой, Н.Н. Сауниной, В.Н. Седневу, В.М. Соколовой, Н.С. Теленковой, Н.Н. Цыганковой, С.В. Чуйковой, Л.А. Шаменковой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Минин А.А. Фенологические особенности состояния экосистем Русской равнины за последние десятилетия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 3. С. 75–80.
- Минин А.А., Воскова А.В. Гомеостатические реакции деревьев на современные изменения климата: пространственно-фенологические аспекты // Онтогенез. 2014. Т. 45. № 3. С. 162–169.
- Минин А.А., Гутников В.А. Феноиндикация современных вариаций климата в европейской части России на примере некоторых лесообразователей и птиц // Лесоведение. 2000. № 2. С. 68–74.
- Минин А.А., Ранькова Э.Я., Рыбина Е.Г., Буйолов 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 экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28. № 1. С. 73–90.
- Brown M.E., de Beurs K.M., Marshall M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years // Remote Sensing Envir. 2012. V. 126. P. 174–183.
- Jeong Su-Jong, Chang-Hoi Ho, Hyeon-Ju Gim, Brown M.E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008 // Global Change Biol. 2011. V. 17(7). P. 2385–2399.
- Kim Y., Kimball J.S., Zhang K., McDonald K.C. Satellite detection of increasing Northern Hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: Implications for regional

- vegetation growth // Remote Sensing Envir. 2012. V. 121. P. 472–487.
- Minin A.A. Some aspects of interrelations between terrestrial ecosystems and the changing climate // Biol. Bull. Rev. 2012. V. 2. № 2. P. 176–182.
- Ovaskainen O., Skorokhodova S., Yakovleva M., Sukhov A., Kutenkov A., Kutenkova N., Shcherbakov A., Meyke E., Delgado M. del Mar. Community-level phenological response to climate change // Proc. Nat. Acad. Sci. 2013. V. 110. № 33. P. 13434–13439
- Pau S., Wolkovich E.M., Cook B.I., Davies T.J., Kraft N.J.B., Bolmgren K., Betancourt J.L., Cleland E.E. Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science // Global Change Biol. 2011. V. 17(12). P. 3633–3643.

Assessment of Stability of the Phenological Indices of Silver Birch *Betula pendula* Under Climate Change

A. A. Minin¹, I. E. Trofimov^{1, #}, and V. M. Zakharov¹

¹Koltzov Institute of Developmental Biology Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 26, Moscow, 119334 Russia

[#]e-mail: trofimov@ecopolicy.ru

The main phenological dates, including the unfolding of the first leaves, mass yellowing of the leaves and the duration of the vegetation period, were evaluated for silver birch *Betula pendula* in the period 2005–2018 in the central part of the European territory of Russia to identify possible phenological trends due to global climate change. Evidence has been obtained of a negative trend in the time of the unfolding of the first leaves and a positive trend for yellowing of the leaves. The revealed pattern of phenological changes characterizing the earlier beginning and the later end of the vegetation season corresponds to the well-known trend of temperature increase. At the same time, the absence of a pronounced trend in a number of populations in the north and in the center of the territory under consideration rather indicates not so much an increase as a shift in the vegetation period to earlier dates. This may be due to the need to maintain a certain optimal duration of the growing season and its relationship with the length of the organic rest period in changing climatic conditions. The absence of a reaction or a weak reaction of an organism to a specific impact may be the result of homeostatic mechanisms, with their possibly different manifestation in the center and at the periphery of the range.