

УДК 502

## ГОМЕОСТАТИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ НА СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРОСТРАНСТВЕННО-ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

© 2014 г. А. А. Минин, А. В. Воскова

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН  
Научно-исследовательский и проектный институт генерального плана г. Москвы  
125047, Москва, ул. 2-я Брестская, д. 2/14  
E-mail: aminin@pochta.ru

Поступила в редакцию 11.12.13 г.  
Окончательный вариант получен 14.01.14 г.

Проанализированы ряды дат разворачивания первых листьев и продолжительности периода вегетации у березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth. (*B. verrucosa* Ehrh.)), а также зацветания черемухи обыкновенной (*Padus avium*), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) за период 1970–2010 годы в центральной части Европейской территории России на предмет оценки трендов. Выявлен эффект различия фенологических реакций на однородные изменения климата у деревьев одного вида из северной и южной частей ареалов. Если в северной части весенние события стали наступать на 3–7 дней раньше, то в южной такой эффект не наблюдается. Этот факт может интерпретироваться как проявление разных механизмов гомеостаза у деревьев в разных (северной и южной) частях ареала, обусловленных их биологическими особенностями (в частности, необходимостью успешного прохождения периодов органического покоя и вегетации).

*Ключевые слова:* гомеостаз, изменения климата, фенологические реакции.

DOI: 10.7868/S0475145014030021

### ВВЕДЕНИЕ

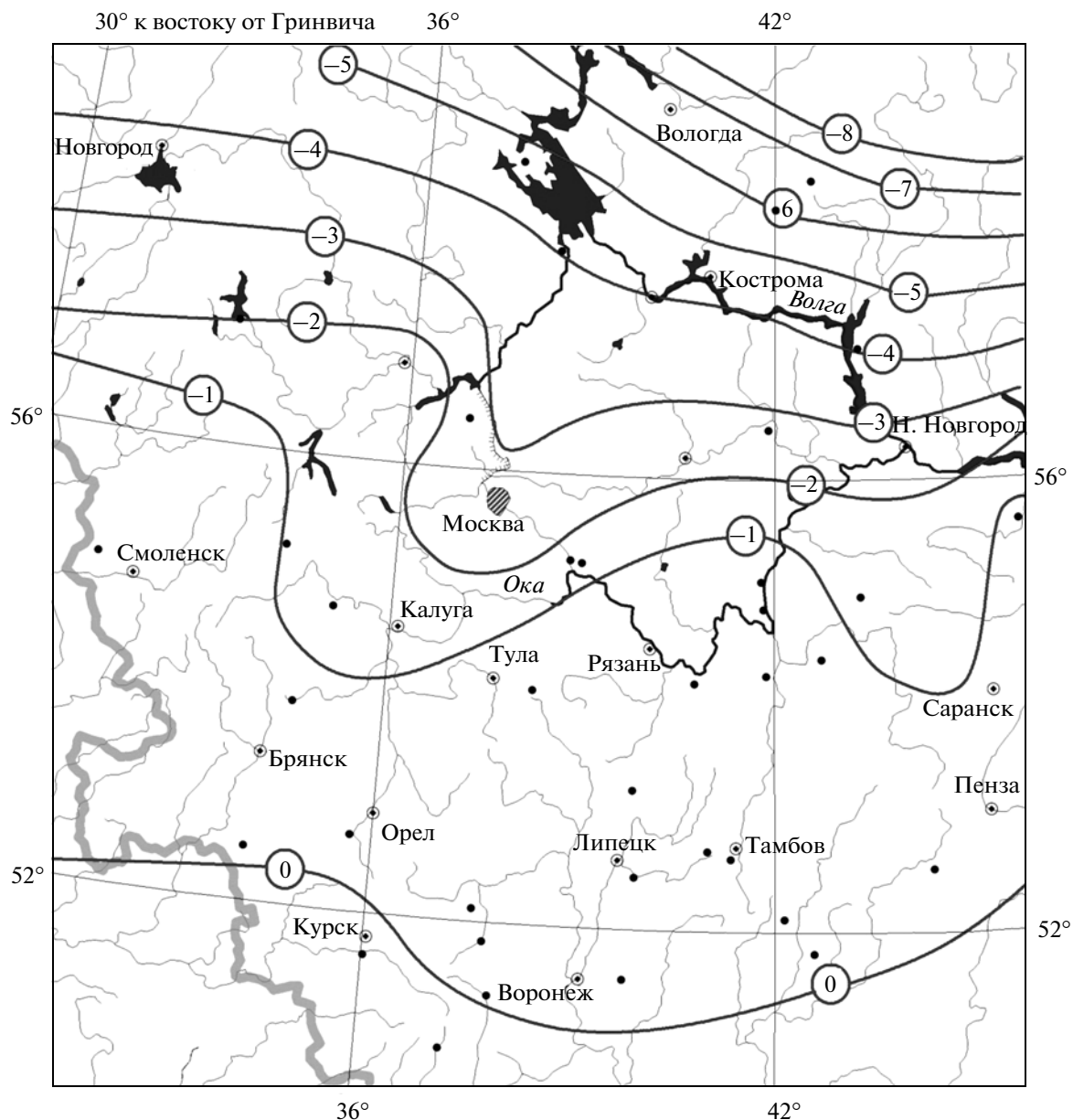
Современным глобальным изменениям климата посвящена масса исследований и публикаций, результаты которые в основном обобщены в широко известных докладах ИРСС (Межправительственной рабочей группы по изменениям климата). Речь в основном идет о потеплении и сопровождающих его процессах.

Данные о смещении сроков наступления фенологических фаз у растений продолжают оставаться одним из основных видов информации о реакции биоты на изменения климата. В последние годы появились обобщающие статьи, анализирующие фенологические изменения на региональном и глобальном уровнях (Brown et al., 2012; Jeong et al., 2011; Kim et al., 2010; Minin, 2012; Pau et al., 2011; и др.).

Так, по результатам спутниковых наблюдений за 1982–2008 гг. в северном полушарии отмечается смещение на более ранние сроки начала вегетационного сезона и на более поздние – окончания (и в целом, соответственно, увеличение его продолжительности). Однако скорость изменений за периоды 1982–1999 и 2000–2008 гг. существенно различается. Если за ранний период смещение сроков начала составило 5.2 дня, то за поздний – 0.2 дня. Соответственно, окончание сезона вегетации за ранний период сместилось на

4.3 дня, за поздний – на 2.3 (Jeong et al., 2011). Отмечаются и существенные региональные различия в активности наблюдаемых изменений в пределах полушария.

В работе (Brown et al., 2012) отмечается для 27% зернопроизводящих регионов мира существенное изменение продолжительности вегетационного сезона основных зерновых культур за 26 лет, начиная с 1981 года, причем для большинства из них – увеличение продолжительности в среднем на 2.3 дня. Отмечено влияние изменений температуры и влажности воздуха на урожаи. С целью адаптации зернового хозяйства к изменениям климата предлагается направить меры на совершенствование инфраструктуры, включая развитие ирригации и повышение гибкости производства, страхование и поддержку государством в случае угроз для зернового производства и т.д. Даются прогнозы по реакции видов из разных природных зон на изменения климата. Так, отмечается, что виды, распространенные в высоких широтах, а также параметры вегетационного периода, будут наиболее чувствительными к изменениям климата. Виды умеренных широт будут реагировать на климатические воздействия изменениями в сроках начала событий вегетационно-



**Рис. 1.** Смещение дат разворачивания первых листьев у березы бородавчатой за период 1970–2010 гг., в сутках (точками здесь и на следующих схемах показаны пункты наблюдений).

го цикла, тогда как виды из низких широт — смещениями в пространстве (Pau et al., 2011).

В то же время для биологических систем разных уровней присущи гомеостатические механизмы приспособлений к внешним воздействиям (Waddington, 1957; Захаров, 1987; Зотин, 1988). Возникает вопрос о характере этих реакций при разной (или одинаковой) силе воздействий меняющегося климата у растений одного вида из разных частей ареала.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В качестве исходных послужили материалы фенологических наблюдений на сети Русского геогра-

фического общества (РГО) из архивов и календарей природы, а за последние годы из сети фенологических наблюдений Московского центра РГО.

В развитие материалов первого оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях для России (Оценочный доклад..., 2008; Методы оценки..., 2012) нами были систематизированы, в дополнение к рассматривавшемуся ранее периоду 1970–2000 гг., данные по датам наступления некоторых фенологических явлений в центральной части Европейской территории России за последнее десятилетие (2001–2010 гг.). Таким образом, за период 1970–2010 гг. анализировались ряды дат разворачивания первых листьев и

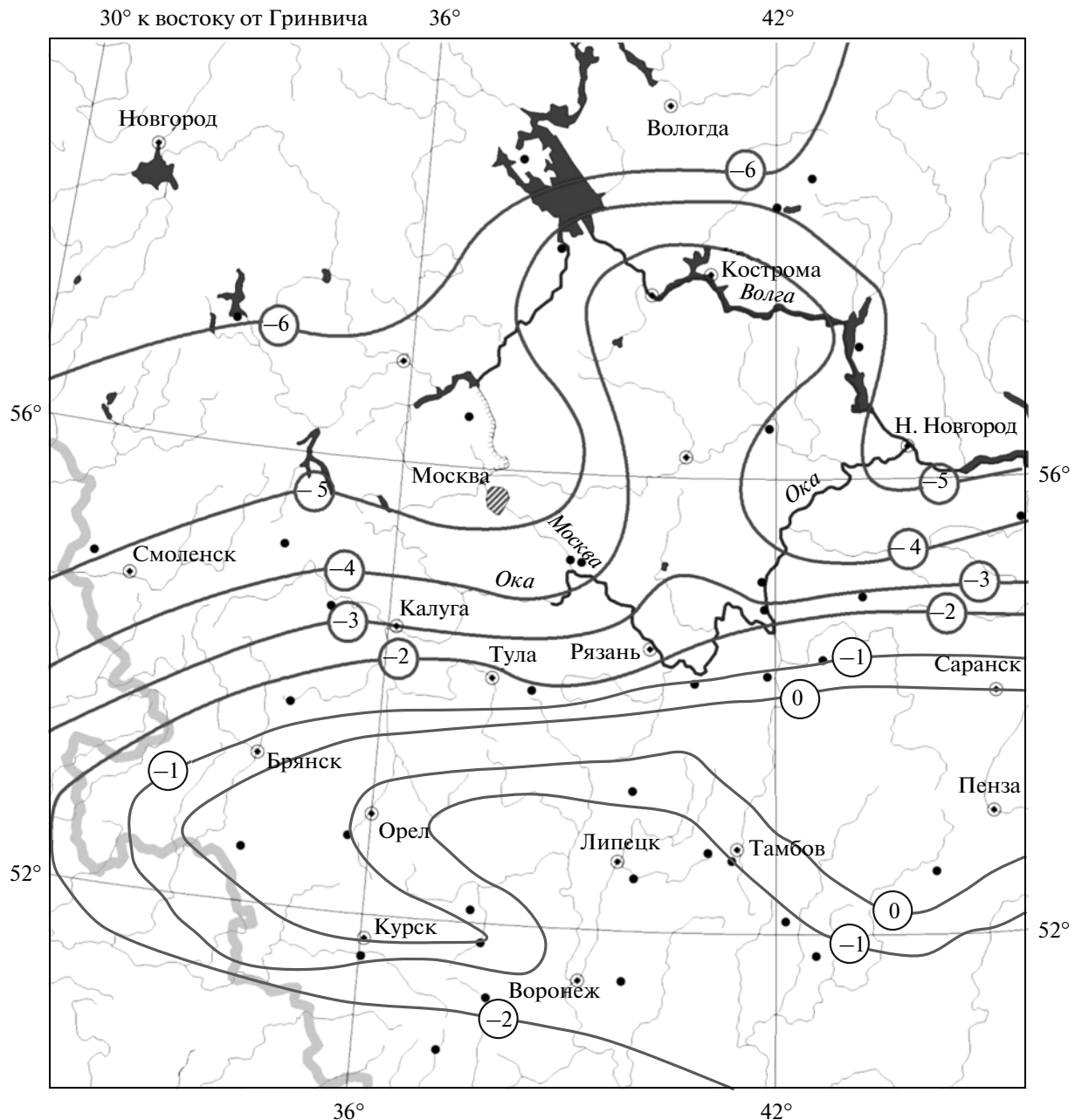


Рис. 2. Смещение дат зацветания черемухи обыкновенной за период 1970–2010 гг., в сутках.

продолжительности периода вегетации у березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth. (*B. verrucosa* Ehrh.)), а также зацветания черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*) липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.). Это традиционные и наиболее удобные для наблюдений сезонные события, поскольку они хорошо проявляются в природе, достаточно надежно фиксируются.

Оценка тренда проводилась методом линейной регрессии, т. е. находилась линейная функция времени:

$$d^*(t) = At + B,$$

которая наилучшим образом аппроксимирует временной ряд  $\{d(t)\}$ . Здесь  $d(t)$  – дата (сутки в календарном году) сезонного явления в  $t$ -й год ( $t = 1$  в первый год наблюдений). Коэффициенты  $A$  и  $B$  находятся методом наименьших квадратов.

Значения разности ( $d^*(t) - d^*(1)$ ) (с соответствующим знаком) между расчетными сроками в последний ( $t$ -й) и первый годы наблюдений принимались за оценку изменения (т.е. смещения

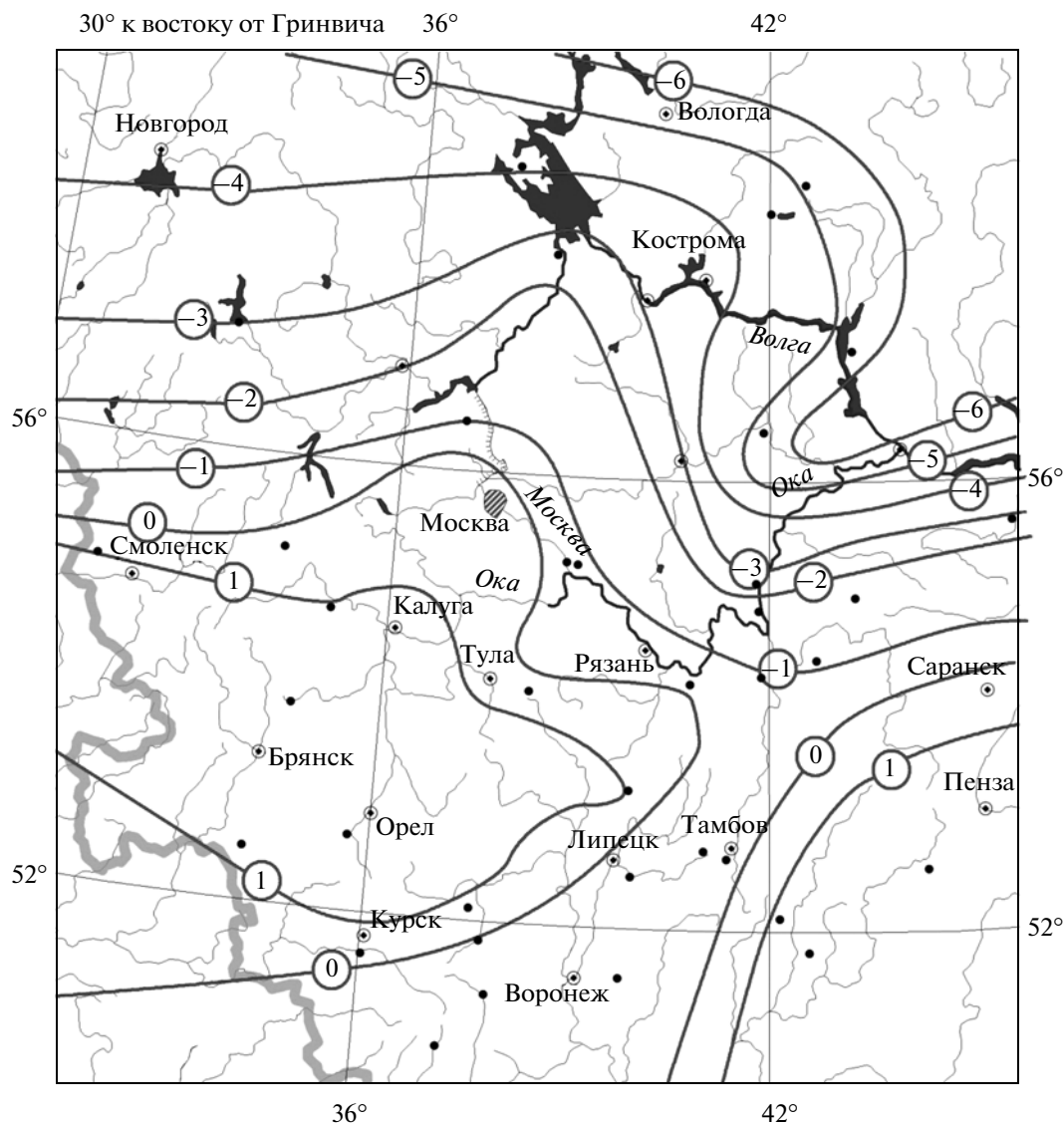


Рис. 3. Смещение дат зацветания рябины обыкновенной за период 1970–2010 гг., в сутках.

срока) за период времени от 1-го года до  $t$ -го и наносились на картосхемы по отдельным пунктам.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Следует отметить, что увеличение продолжительности рядов за счет вклада последнего десятилетия отразилось на схемах трендов и в целом подтверждает результаты, полученные в работе (Jeong et al., 2011), фиксирующие существенное изменение направленности и интенсивности тенденций в фенологических реакциях растительности за первую декаду XXI столетия по сравнению с предшествующими десятилетиями.

Для дат разворачивания первых листьев березы имеет место отрицательный тренд в северной таежной части территории (до 6–8 дней за последние 41 год). Однако, в южном и юго-западном

секторе имеют место значительные по площади территории с отсутствием трендов (рис. 1). Граница между зонами с разнонаправленными тенденциями проходит по условной линии Смоленск–Калуга–Рязань–Саранск.

Аналогичная картина в целом наблюдается и с другими фенологическими событиями, рассматриваемыми в данной статье. Зацветание черемухи является признаком разгара весны, часто ее цветение сопровождается последними заморозками в воздухе и приходом тепла (Минин, 1995). Поле значений трендов напоминает картину с разворачиванием первых листьев у березы (рис. 2). Также в северной половине хорошо выражен градиент к северу с усилением отрицательных значений, в южной – отсутствие трендов и малоградиентное поле. Характерно и то же самое примерно распо-

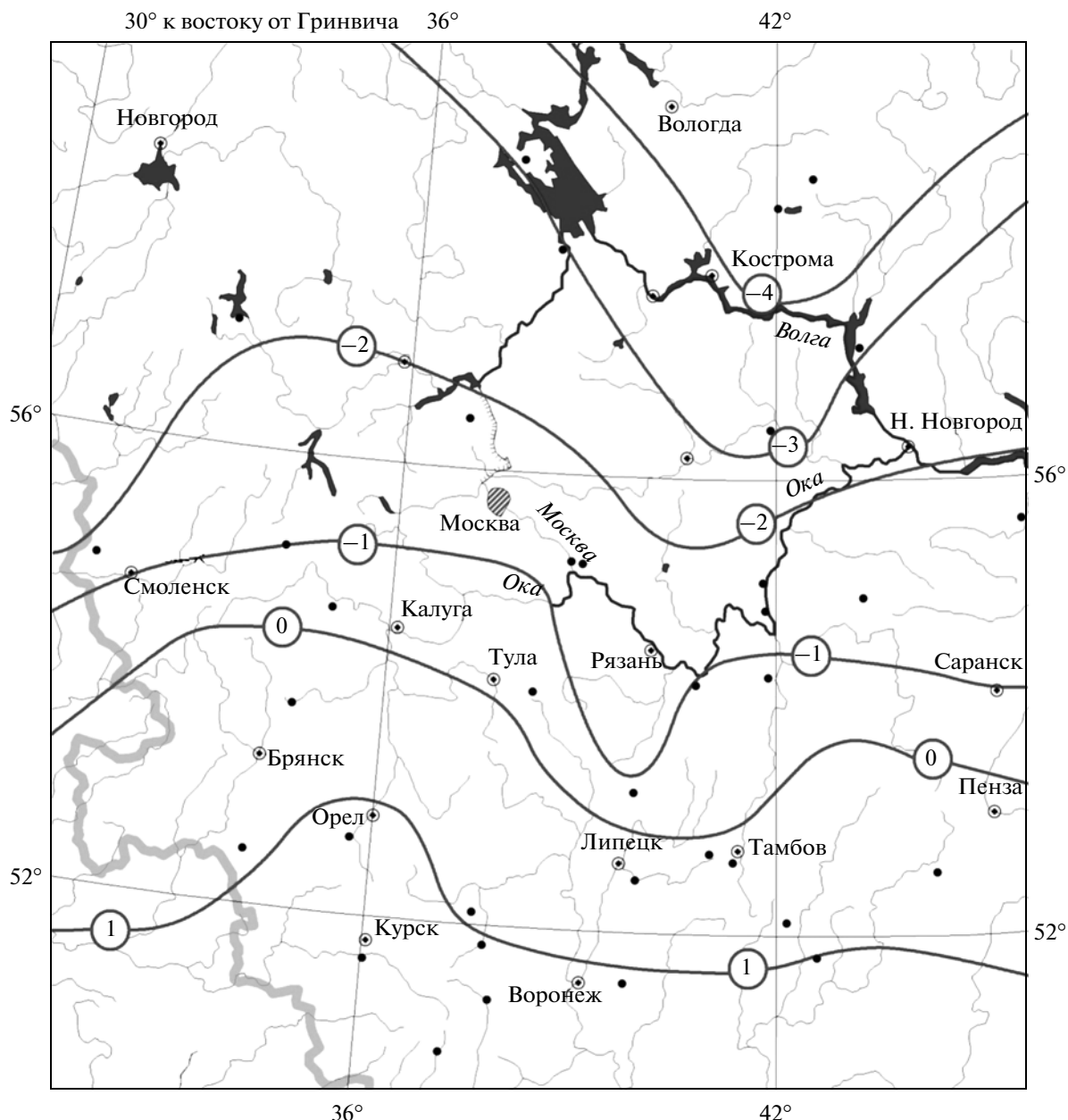


Рис. 4. Смещение дат зацветания липы мелколистной за период 1970–2010 гг., в сутках.

ложение границы между северной и южной областями с разными тенденциями.

Зацветание рябины символизирует начало лета. Здесь также прослеживается разделение региона на северную и южную части с разными многолетними тенденциями проявления данной фенологической фазы (рис. 3).

Зацветание липы символизирует наступление середины фенологического лета. Как и в случае с разворачиванием первых листьев березы, по характеру смещений дат начала этого явления за последние 41 год на схеме довольно четко выделяются северная и южная половины (рис. 4). Для

северной характеры небольшие отрицательные тренды (на 1–4 дня зацветание липы стало происходить раньше), для южной – отсутствие трендов и даже слабо положительные тенденции. Граница между зонами с разнонаправленными смещениями дат проходит, как и в случае с березой, примерно по условной линии Смоленск–Калуга–Рязань и далее идет севернее Саранска.

Важной характеристикой реакции биоты на изменения климата является продолжительность периода вегетации. Нами она рассчитывалась по разнице в сроках между фенофазами окончания листопада и разворачивания первых листьев у бе-

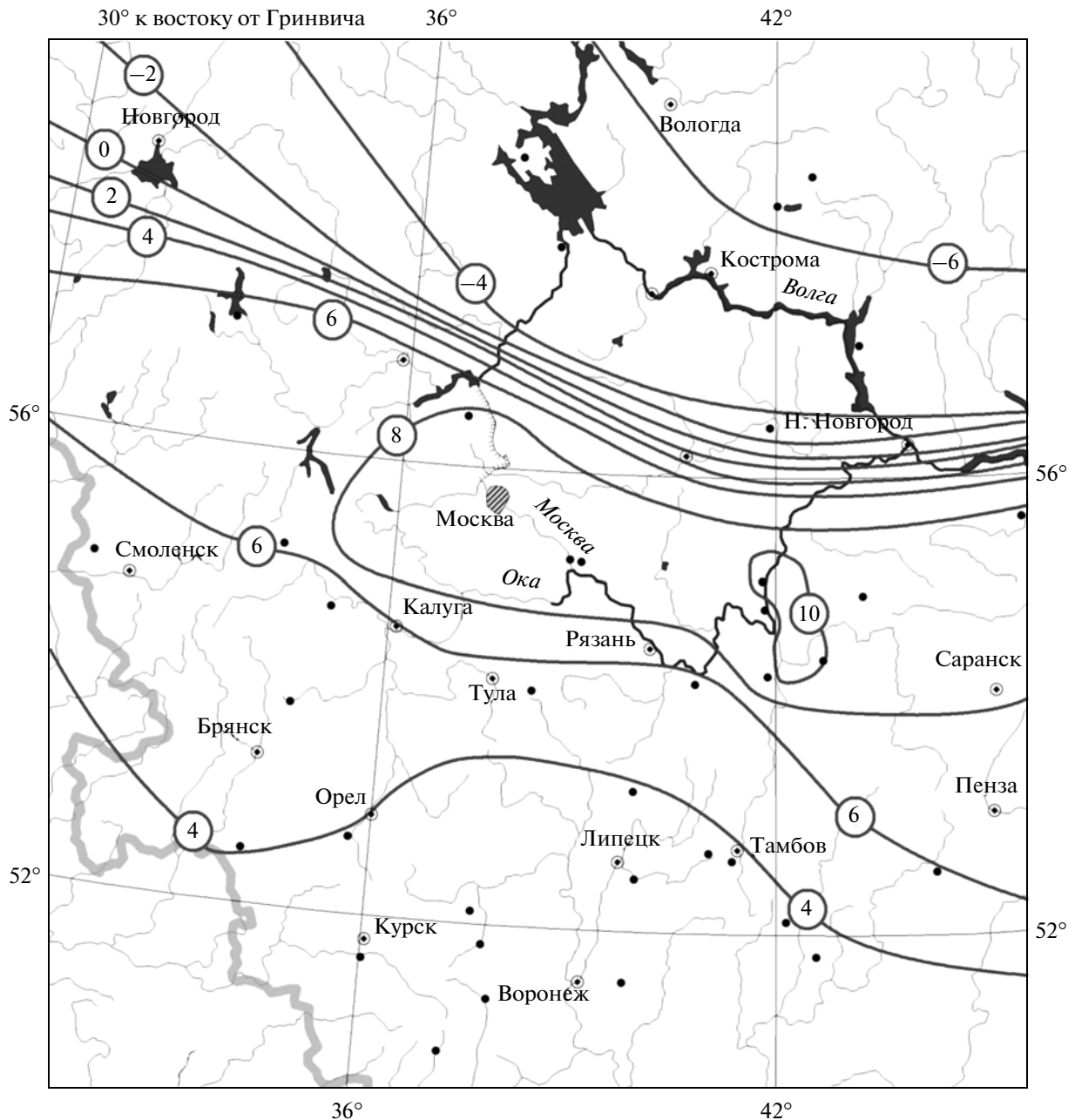


Рис. 5. Изменение продолжительности периода вегетации березы бородавчатой за период 1970–2010 гг., в сутках.

резы бородавчатой, которые в целом могут рассматриваться как индикаторы начала и окончания периода вегетации в природе умеренных широт (Минин, 1995). Картина изменений продолжительности периода вегетации у березы представлена на рис. 5. На картосхеме четко выразились пространственные особенности поля значений. На общем фоне возрастания продолжительности выделяется широтная зона с максимальными значениями увеличения на 6–10 дней, и резкий градиент в направлении северо-востока, где период вегетации сокращается на 4–6 дней. Зона максимальных градиентов протягивается от Новгорода до Ниж-

него Новгорода, фактически по правобережной части долины Волги.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ фенологических данных за период 1970–2010 гг. позволяет сделать некоторые выводы. За период наблюдений, 41 год, в северной части региона (подзона южной тайги и в меньшей степени подтаежных лесов) достаточно хорошо проявлялась тенденция установления более ранних сроков наступления весенних и летних фенологических событий у деревьев. При

этом в южной половине (широколиственные леса, лесостепь) такие тренды не просматриваются. При этом, как отмечают некоторые авторы, тенденция на потепление в целом на всей Европейской территории РФ в последние десятилетия сохранилась (Крышнякова, Малинин, 2008).

Важным представляется выявленный своеобразный водораздел между зонами с различными направлениями многолетней динамики как продолжительности периода вегетации, так и сроков начала и окончания отдельных фенофаз по условной линии Смоленск—Калуга—Рязань—Саранск (граница между подзонами южной тайги и широколиственных лесов). По сути популяции одних и тех же видов, испытывающие влияние однородных климатических воздействий, реагируют на них принципиально разным образом. Этот факт может рассматриваться как проявление разных адаптационных (гомеостатических) стратегий вида для популяций из разных ландшафтно-природных зон. Можно предположить, что в случае “северного” варианта фенологические реакции растений относительно легко (пока) следуют за изменениями климатических условий, поскольку зимний период органического покоя у растений достаточно продолжительный и есть возможность для некоторого его сокращения и увеличения, соответственно, продолжительности периода вегетации. Возможно, в “южном” варианте лимит сокращения периода органического покоя у растений этого же вида исчерпан (в это время в растениях проходит определенный комплекс биохимических процессов и сокращение продолжительности периода органического покоя менее оптимальной может быть губительно для растений), зимние оттепели и раннее весеннее тепло, характерные для современного потепления климата, не могут вывести из него растения (что может служить и защитной реакцией на возврат холодов), чем и обусловлена “вялая” реакция растений на потепление климата.

Выявленные особенности фенологических реакций растений в разных ландшафтно-природных зонах на изменения климата дают основания для прогнозных оценок их поведения при дальнейшем потеплении климата. Возможно, в условиях умеренных широт сформировались определенные соотношения величин продолжительности периодов органического покоя и вегетации для растений. Причем для рассматриваемых видов они могут сейчас быть близки к оптимальным в условиях подзон широколиственных лесов и лесостепи и выдерживаются растениями даже в условиях потепления. Поэтому если потепление будет продолжаться (но не станет критическим) можно ожидать сохранения существующего положения (защитная гомеостатическая реакция) и отсутствия сдвигов сроков начала фенофаз. На севере (подтаежные леса, тайга) при дальнейшем сохранении тенденции на потепление, на фоне уже

произошедших смещений сроков наступления фенофаз, можно, на наш взгляд, также ожидать достижения оптимальных соотношений величин продолжительности периода органического покоя и вегетационного периода и, соответственно, ослабления соответствующих фенологических реакций у растений на потепление. Определенным подтверждением высказанного предположения может стать выявленная тенденция сокращения периода вегетации березы бородавчатой на северо-востоке региона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Захаров В.М.* Асимметрия животных: популяционно-феногенетический подход. М.: Наука, 1987. 216 с.
- Зотин А.И.* // Термодинамическая основа реакций организмов на внешние и внутренние факторы. М.: Наука, 1988. 272 с.
- Крышнякова О.С., Малинин В.Н.* Особенности потепления климата Европейской территории России в современных условиях // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2008. № 2. С. 116–124. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-potepleniya-klimata-evropeyskoy-territorii-rossii-v-sovremennyh-usloviyah>
- Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических объектов (колл. монография). М.: Росгидромет, 2012. 504 с.
- Минин А.А.* Опыт относительного составления календаря природы Русской равнины // Лесоведение. 1995. № 1. С. 92–94.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008.
- 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 of Environment. 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 Biology. 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 of Environment. 2012. V. 121. P. 472–487.
- Minin, A.A.* Some Aspects of Interrelations between Terrestrial Ecosystems and the Changing Climate // Biology Bulletin Reviews. 2012. V. 2. № 2. P. 176–182.
- Pau S., Wolkovich Elizabeth M., Cook Benjamin I., Davies T. Jonathan, Kraft Nathan J.B., Bolmgren Kjell, Betancourt Julio L. and Cleland Elsa E.,* Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science // Global Change Biology. 2011. V. 17(12). P. 3633–3643.
- Waddington C.H.* The Strategy of the Genes. L.: George Allen & Unwin, 1957. 262 p.

## Homeostatic Responses of Plants to Modern Climate Change: Spatial and Phenological Aspects

A. A. Minin and A. V. Voskova

*Institute of Global Climate and Ecology, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia  
(Roshydromet), Russian Academy of Sciences and Hydromet*

*Research and Design Institute of the General Plan of Moscow, ul. 2-ya Brestskaya 2/14, Moscow, 125047 Russia  
e-mail: aminin@pochta.ru*

Received December 11, 2013; in final form, January 14, 2014

**Abstract**—A series of dates of unfolding of the first leaves and duration of the season of vegetation in the silver birch (*Betula pendula* Roth. (*B. verrucosa* Ehrh.)), as well as the duration of flowering of the bird cherry (*Padus avium*), mountain ash (*Sorbus aucuparia*), and small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) for the period 1970–2010 in the central part of European Russia were studied in order to assess the trends. Differences in phenological responses to homogeneous climate changes in the trees of the same species from the northern and southern parts of the range were revealed. If spring events occur 3–7 days earlier in the northern part, no such effect is observed in the south. This fact can be interpreted as a manifestation of the different mechanisms of homeostasis in different populations determined by their biological characteristics (in particular, by the need to pass successfully the periods of organic rest and vegetation).

**Keywords:** homeostasis, climate change, phenological responses