

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.*)

A.A. Минин¹⁾, Э.Я. Ранькова³⁾, Е.Г. Рыбина²⁾, Ю.А. Буйволов³⁾,
И.И. Сапельникова⁴⁾, Т.Д. Филатова⁵⁾

¹⁾ ГУП «НИ и ПИ Генплана Москвы»,
Россия, 125047, Москва, 2-я Брестская ул., 2/14; *aminin1959@mail.ru*

²⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20; *ribina_evgenia@mail.ru*

³⁾ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 109017, Москва, ул. Глебовская, 20Б; *firankova@gmail.com*; *combyuyvolov@gmail.com*

⁴⁾ Воронежский государственный природный биосферный заповедник имени В.М. Пескова
Россия, 394080, г. Воронеж, Госзаповедник, Центральная усадьба; *is@reserve.vrn.ru*

⁵⁾ Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник имени
проф. В.В. Алексина,
Россия, 305528, Курская область, Курский район, п/о Заповедное;
filatova@zapoved-kursk.ru

Реферат. В статье анализируются тенденции изменений фенологических характеристик бересклета бородавчатого, черемухи обыкновенной, рябины обыкновенной и липы мелколистной в центральной части европейской территории России (ЕТР). Оценки получены на базе данных многолетних наблюдений за наступлением фаз развертывания первых листьев у бересклета и зацветания (начала цветения) черемухи, рябины и липы за 1976 - 2015 годы (период наиболее интенсивного современного потепления климата в России). В целом, современное потепление климата оказывает определенное влияние на фенологию всех этих видов, однако проявляются пространственные и календарные различия в их фенологических реакциях. Для черемухи и рябины характерно отсутствие существенных трендов дат зацветания (или слабоположительные значения коэффициента линейного тренда) в полосе между 52° и 54°с.ш. К северу и югу от нее значения коэффициента отрицательные: до -1.5 дней/10 лет для черемухи, и до -1.0 дней/10 лет для рябины. Однако для липы зона положительных значений расширяется к северу до 56°с.ш. Различия в величинах коэффициентов трендов фенофаз и дат устойчивых переходов температуры воздуха через близкие к фенофазам пороговые значения составляют от 2 - 10 раз в случае с бересклетом, черемухой, рябиной и до 8 - 25 раз у липы. Ана-

логичная картина наблюдается в трендах фенологических показателей и сумм активных температур. Это свидетельствует о реализации у растений гомеостатических механизмов адаптации к изменениям климата.

Ключевые слова. Изменения климата, фенология березы, рябины, черемухи, липы, скорость фенологического тренда, устойчивый переход температуры воздуха через пороговые значения, сумма активных температур.

**PHENINDIONE OF CLIMATE CHANGE FOR THE PERIOD
1976 - 2015 IN THE CENTRAL PART OF EUROPEAN RUSSIA:
COMMON BIRCH (*SILVER BIRCH*) (*BETULA VERRUCOSA EHHRH.*
(*B. PENDULA ROTH.*)), BIRD CHERRY (*PADUS AVIUM MILL.*),
MOUNTAIN ASH (ROWAN) (*SORBUS AUCUPARIA L.*),
SMALL-LEAVES LIME (LINDEN) (*TLILA CORDATA MILL.*)**

*A.A. Minin¹⁾, E. Ya. Rankova³⁾, E.G. Rybina²⁾, Yu.A. Buyvolov³⁾,
I.I. Sapel'nikova⁴⁾, T.D. Filatova⁵⁾*

¹⁾ Research and Project Institute of General Planning for the city of Moscow,
2/14, 2-ya Brestskaya ul., 125047, Moscow, Russia; *aminin1959@mail.ru*

²⁾ National Research University, High School of Economics,
20, Myasnitskaya str., 101000, Moscow, Russia; *ribina_evgenia@mail.ru*

³⁾ Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia; *firankova@gmail.com; ybuyvolov@gmail.com*

⁴⁾ Voronezh state natural biosphere reserve named after V.M. Peskov,
Centralnaja usadba, Gos zapovednik, Voronezh, 394080, Russia; *is@reserve.vrn.ru*

⁵⁾ Central-Chernozem state natural reserve named after prof. V.V. Alekhin,
p/o Zapovednoe, Kurskiy district, Kursk region, 305528, Russia; *filatova@zapoved-kursk.ru*

Abstract. The study addresses changes in the phenological characteristics of birch, bird cherry, rowan, and linden in the central part of European Russia (ER) on the basis of multiyear observations of the first leaves unfolding phase for birches and the beginning of flowering phase for bird cherry, mountain ash, and linden in the period since 1976 and until 2015 (the period of most intense modern warming in Russia). Overall, the current climate change affects the phenology of all these species; however, various species demonstrate spatial and calendar differences in their phenological reactions. Bird cherry and rowan do not demonstrate significant trends in their flowering dates (or weak positive values of the linear trend coefficient) in territories located between 52° and 54° N. To the north and south of that area, the value of the coefficient is negative: up to -1.5 days/10 years for bird cherry, and up to and -1.0 days/10 years for rowan. However, for linden, the area of positive values extends northwards to 56° N. The differences in the trends coefficients of phenological stages and trends coefficients of dates of the stable transition of the air temperature across threshold values close to the phenological stages are 2 - 10 for birch, bird cherry and rowan and up to 8 - 25 times for linden. A similar correlation has been observed between the phenological trends and sums of

active temperatures. This demonstrates the work of adaptation homeostatic mechanisms in the plants in response to the climate change.

Keywords. Climate change, phenology of birch, bird cherry, mountain ash (rowan), linden, pace of phenological trend, stable transition of the temperature across threshold values, sum of active temperatures.

Введение

Разворачивание первых листьев у березы бородавчатой (повислой), зацветание черемухи обыкновенной, рябины обыкновенной и липы мелколистной относятся к наиболее распространенным и надежно определяемым фитофенологическим явлениям в природе средней полосы России. Они представляют соответственно фенологические субсезоны «разгар весны», «предлетье» и «полное лето». Таким образом, эти фитофенологические события особенностями проявления в конкретном году интегрально характеризуют гидрометеорологические условия весны и первой половины лета этого года. Многолетняя динамика сроков наступления данных фенофаз дает возможность оценить, в первую очередь, тенденции изменения термических условий весны.

Целью данной работы является анализ трендов дат разворачивания первых листьев у березы бородавчатой, зацветания черемухи, рябины и липы за период 1976 - 2015 гг. (период современного глобального потепления) в центральной части европейской территории России (ЕТР) в сопоставлении с характером многолетних изменений средней суточной температуры воздуха и сумм активных температур за этот же период.

Материал и методика

По аналогии с оценкой трендов сезонной температуры по средней скорости ее многолетних изменений (Доклад..., 2016), для фенологических характеристик, дат устойчивых переходов средней суточной температуры воздуха через пороговые значения и сумм активных температур за периоды от даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха весной через 5°C до даты наступления рассматриваемых фенофаз, также рассчитывались коэффициенты линейных трендов по многолетним рядам наблюдений (и также за 1976 - 2015 гг.). Методика расчетов и подготовки рядов фенологических данных подробно описана нами ранее (Минин и др., 2016). В статье рассматривается территория между 51 и 59 град. с.ш. и 31 и 46 град. в.д.

Календарные даты заменены порядковым номером дня в году относительно 1 марта. Например, 31 марта – 31, 1 апреля – 32 и т.д. В этих величинах построены картосхемы средних многолетних значений.

Источником фенологических данных послужили материалы наблюдений за разворачиванием первых листьев у березы бородавчатой (*Betula verrucosa Ehrh.* (*B. Pendula Roth.*)), началом цветения черемухи обыкновенной (*Padus avium Mill.*), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia L.*) и липы мелколистной (*Tilia cordata Mill.*) в заповедниках и на добровольной фенологической

сети Русского географического общества (РГО), а также материалы календарей природы (Сезонная жизнь..., 1979, 1980). В работе использованы данные из 43 пунктов.

За начало фазы принималась дата, когда она наблюдалась у 10% (или у 2 -3 экземпляров) особей одного вида в группе. Если наблюдения ведутся за одним экземпляром, начало фазы отмечалось, когда зацветет до 10% цветков кроны.

В качестве климатических показателей в статье рассматриваются:

- средняя температура весеннего сезона;
- дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха весной через 5°C (начало вегетационного периода);
- даты устойчивого перехода средней суточной температуры через пороговые значения, близкие к наступлению рассматриваемых фенофаз, а именно: 10°C – развертывание первых листьев у бересклета, 12°C – зацветание черемухи, 14°C – рябины, 17°C – липы;
- суммы активных температур (превышений над уровнем 5°C) за периоды от начала вегетационного периода до даты наступления фенофазы.

Датой устойчивого перехода через пороговое значение (T_0) считается первый день (после 1 марта), начиная с которого в течение не менее 5 дней подряд сумма накопленных положительных отклонений среднесуточной температуры выше суммы отрицательных. Или: T_0 – первый день, начиная с которого накопленная сумма градусо-дней остается положительной в течение не менее 5 дней подряд. В расчетах использованы данные наблюдений 30 метеостанций, ближайших к пунктам фенологических наблюдений (иногда одна станция была ближайшей сразу к двум и даже трем пунктам наблюдений).

Статистический анализ перечисленных фенологических и климатических переменных выполнен по данным за период 1976 - 2015 гг. Результаты анализа представлены ниже в виде пространственных распределений (полей) средних многолетних значений и оценок линейного тренда всех переменных, а также коэффициентов корреляции между датами фенофаз и соответствующими климатическими параметрами.

Результаты

За начало периода современного потепления в настоящей работе, следуя сложившейся практике, принят 1976 год – см., например, Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2013), Оценочные доклады Росгидромета (Второй оценочный..., 2014), ежегодные Доклады о состоянии климата на территории РФ (Доклад..., 2016), статьи (Груза и др., 2016).

Даты начала вегетационного периода. Устойчивый переход температуры воздуха весной через 5°C происходит от 9 апреля на юге до 21 апреля на севере рассматриваемой территории. Скорость перемещения «волны» перехода с юга на север неравномерна и составляет от 1.5 дней на 1 градус широты в срединной части до 3 - 4 дней на юге и севере, расположение изоли-

ний в основном широтное (рис. 1 а). Прослеживается хорошо выраженная тенденция к более раннему наступлению, особенно в западной половине (коэффициенты трендов до -2.5 дней/10 лет), т.е. за 40 лет смещение здесь достигло 10 дней. В восточной половине значения коэффициента составляют -1.0 ... -1.5 дней/10 лет и менее (рис. 1 б).

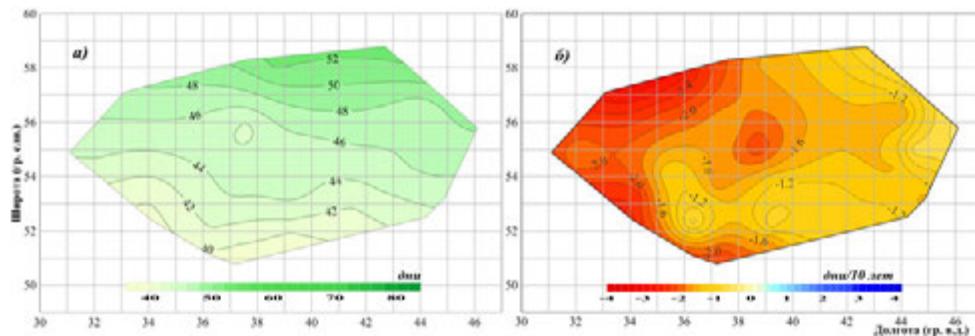


Рисунок 1. Даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха весной через 5°C
а) многолетние средние за период 1976-2015 гг.,
б) коэффициенты линейного тренда за период 1976-2015 гг. (дни/10 лет)

Береза бородавчатая. Разворачивание первых листьев наступает в сроки от 23 апреля на юге до 3 мая на севере. Структура изофен (рис. 2 а) имеет четко выраженный широтный характер с лагом от 3 - 4 дней на 1 градус широты в центральной части до 1 - 2 дней на севере и юге. Напротив, "волна" перехода температуры воздуха через 10°C при продвижении к северу замедляется: от 1.5 - 2 в южной и срединной частях до 4 дней на градус широты в северной (рис. 2 в). Поле изолиний средних сумм активных температур не имеет выраженной зональности (рис. 2 д). Наиболее высокие значения коэффициента тренда дат развертывания первых листьев (более -0.8/10 лет) приурочены к северной и центральной частям территории (рис. 2 б), тогда как коэффициент тренда переходов температуры через 10°C (рис. 2 г) – к западной (как и в случае с переходом через 5°C), где достигает -3.2 дней/10 лет, а в восточной близок к нулю. Коэффициенты трендов дат переходов через 10°C и развертывания первых листьев в восточной части примерно одинаковы, а в западной – выше в 2 - 4 раза (рис. 2 б, г). Характерно, что интенсивность изменения сумм активных температур также выше в западном секторе; в восточном секторе есть территории с нулевыми коэффициентами (рис. 2 е).

Таким образом, для березы максимальная интенсивность «фенологических» трендов, в целом, существенно ниже температурных. Есть некоторое соответствие в конфигурации пространственного распределения аномальных зон для коэффициентов линейного тренда сумм активных температур и сроков начала облиствения, которые помогают понять отклик объекта на особенности термического режима перед вегетацией. Там, где в последние годы раньше стал начинаться процесс облиствения, он происходит при меньшей сумме активных температур (аномальная зона в северо-восточном секторе,

рис. 2 е). Так бывает при стремительном приходе тепла после начала вегетации. Напротив, в аномальной зоне на юге участка (рис. 2 б) в отличие от соседних регионов, показано, что в этом месте для начала процесса необходима более высокая сумма активных температур. Получается, что переход сроков начала вегетации происходит раньше, а к моменту начала фазы должна накопиться большая сумма активных температур. Так бывает при пониженном температурном фоне после начала вегетации.

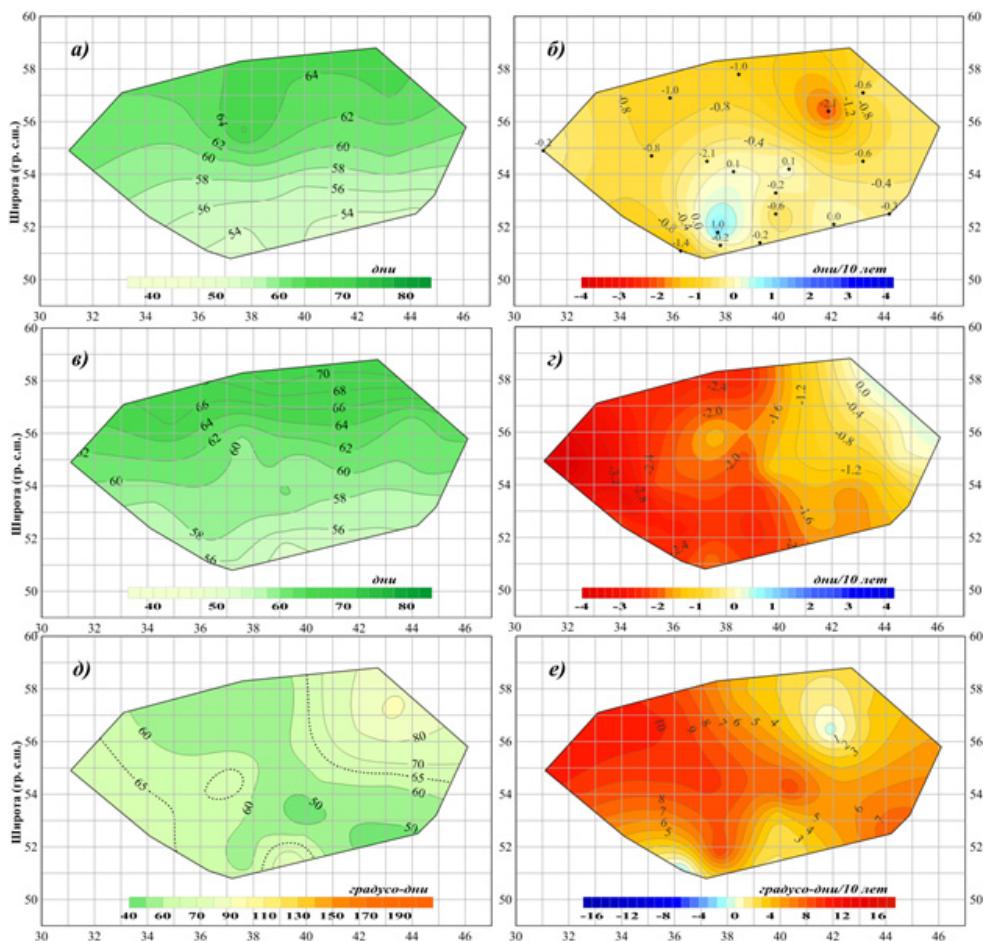


Рисунок 2. Многолетние средние (слева) и коэффициенты линейного тренда (справа) для фенологии бересклета бородавчатой
дата развертывания первых листьев (а, б), дата устойчивого перехода температуры через 10°C (в, г),
сумма активных температур (от начала вегетации до даты развертывания первых листьев)

Связь между межгодичными колебаниями фенологических (дата развертывания первых листьев) и климатических параметров для бересклета иллюстрируется коэффициентами корреляции на рис. 3. Самые высокие корреляции (-0.5 ... -0.7) получены для средней температуры весеннего сезона и переходов температуры через 5°C , самые низкие – для суммы активных температур (от 0.1 до -0.2). Корреляция с датами перехода через 10°C составила -0.3 ... -0.5.

Несмотря на то, что между датой зеленения березы и суммой активных температур нет достоверной корреляции, совпадение аномальных зон (рис. 2 б и 2 е) предполагает наличие некоторых факторов, связывающих эти явления.

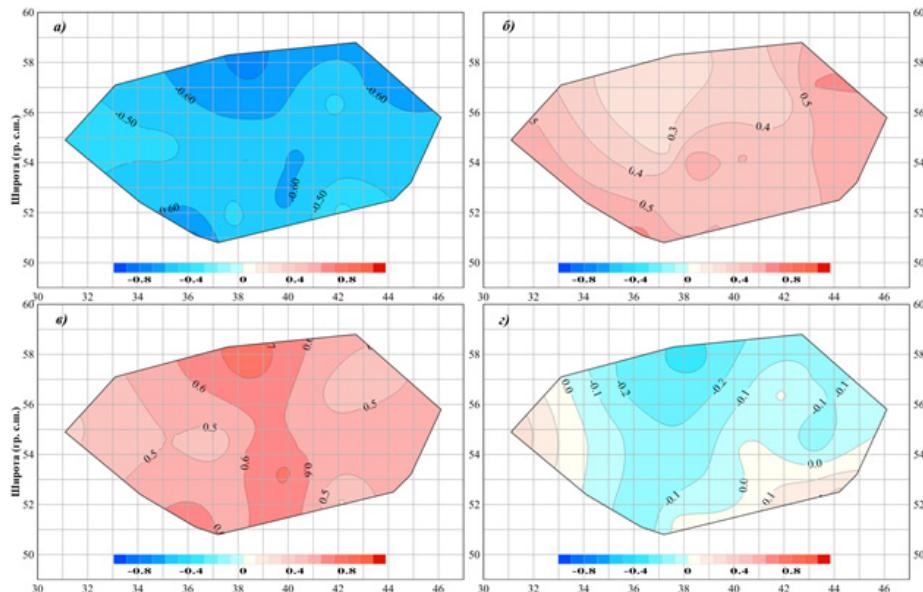


Рисунок 3. Коэффициенты корреляции между датами развертывания первых листьев у березы бородавчатой и климатическими показателями

- а) средняя температура весеннего сезона; б) дата устойчивого перехода температуры через 10°C ; в) дата начала вегетационного периода; г) сумма активных температур (от начала вегетации до даты развертывания листьев).

Черемуха обыкновенная. Фаза цветения черемухи – индикатор субсезона «разгара весны». Наступает в сроки от 1 - 3 мая на юге региона до 14 - 15 мая на севере, спустя примерно 10 дней после развертывания первых листьев у березы и совпадает со сроками устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 12°C (рис. 4 а, в).

Расположение изофен широтное с лагом примерно от 1 дня на градус широты в южной части до 2 - 3 дней в срединной и северной (рис. 4 а). Продвижение «волны» перехода температуры через 12°C , как и в случае с переходом через 10°C , характеризуется ускоренным прохождением в срединной части (до 1 дня на градус широты) и замедленным в северной (до 2 - 3 дней на градус) (рис. 4 в). Поле средних многолетних сумм температур не имеет четкой зональности (рис. 4 д).

В поле коэффициентов линейного тренда черемухи выделяется полоса пониженных значений между 52 и 54° с.ш., к северу и к югу от которой значения коэффициента (по модулю) повышаются до $-1 \dots -1.5$ за 10 лет, т.е. фаза стала наступать за последние 40 лет примерно на неделю раньше (рис. 4 б). Как и в случае с березой, коэффициенты трендов близких по срокам к зацветанию черемухи дат переходов температуры (через 12°C) в 2 - 4 раз выше (рис. 4 б, г). Поля изолиний коэффициентов трендов фенологических и климатических характеристик существенно различаются.

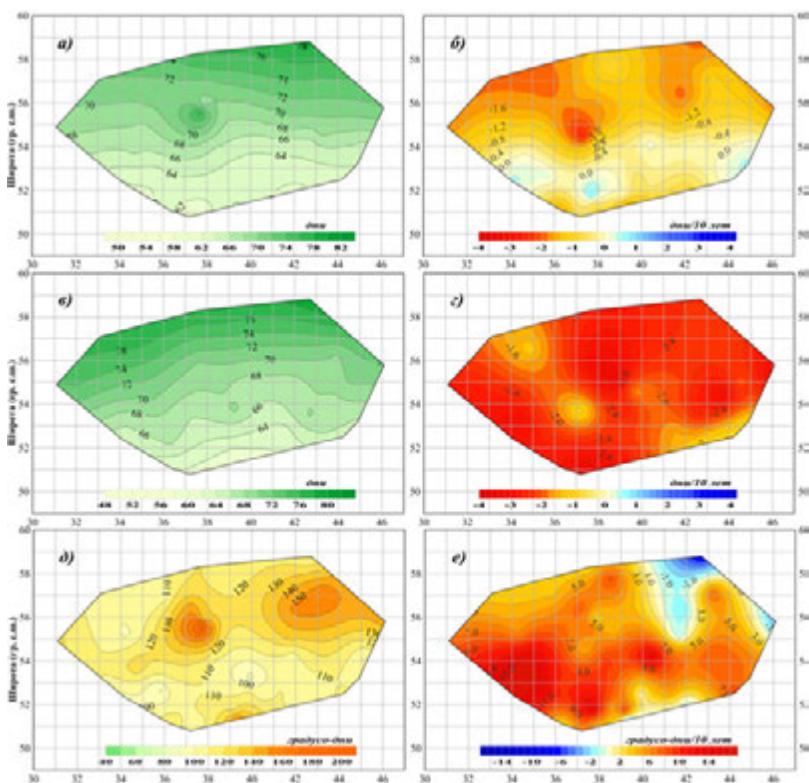


Рисунок 4. Многолетние средние (слева) и коэффициенты линейного тренда (справа) фенологических характеристик черемухи обыкновенной дата зацветания (а, б); дата устойчивого перехода температуры воздуха через 12°C (в, г); сумма активных температур за период от начала вегетации до даты зацветания (д, е)

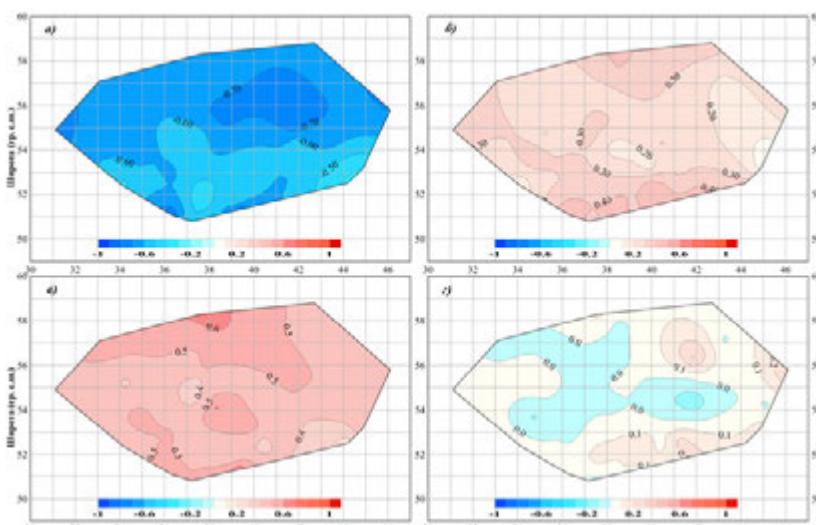


Рисунок 5. Коэффициенты корреляции между датами зацветания черемухи обыкновенной и климатическими показателями

- а) средняя температура весеннего сезона; б) дата устойчивого перехода температуры через 12°C .
- в) дата начала вегетационного периода; г) сумма активных температур (от начала вегетации до даты зацветания черемухи)

Следует отметить, что коэффициенты трендов сумм активных температур имеют повышенные значения именно в южной части региона (рис. 4 е).

Самые высокие значения коэффициента корреляции (рис. 5), как и для берес, наблюдаются со средней весенней температурой (от -0.5 до -0.7), а самые низкие – с суммами активных температур (около 0); между ними – корреляция с переходами температуры через 5°C (0.4 - 0.6) и через 12°C (0.2 - 0.4).

Рябина обыкновенная. Зацветание рябины символизирует переход от субсезона «разгара весны» к «предлетью». Наступает спустя около 10 дней после зацветания черемухи, в сроки от 11 - 12 мая на юге до 25 - 26 мая на севере региона. Расположение изофен широтное с шагом от 1 дня на 1 градус широты на юге до 3 - 4 дней на градус широты на севере (рис. 6 а). Изолинии средних многолетних дат переходов температуры через 14°C ориентированы с запад-юго-запада на восток-северо-восток с лагом от 2 - 3 дней на юге до 4 дней на градус широты на севере (рис. 6 в).

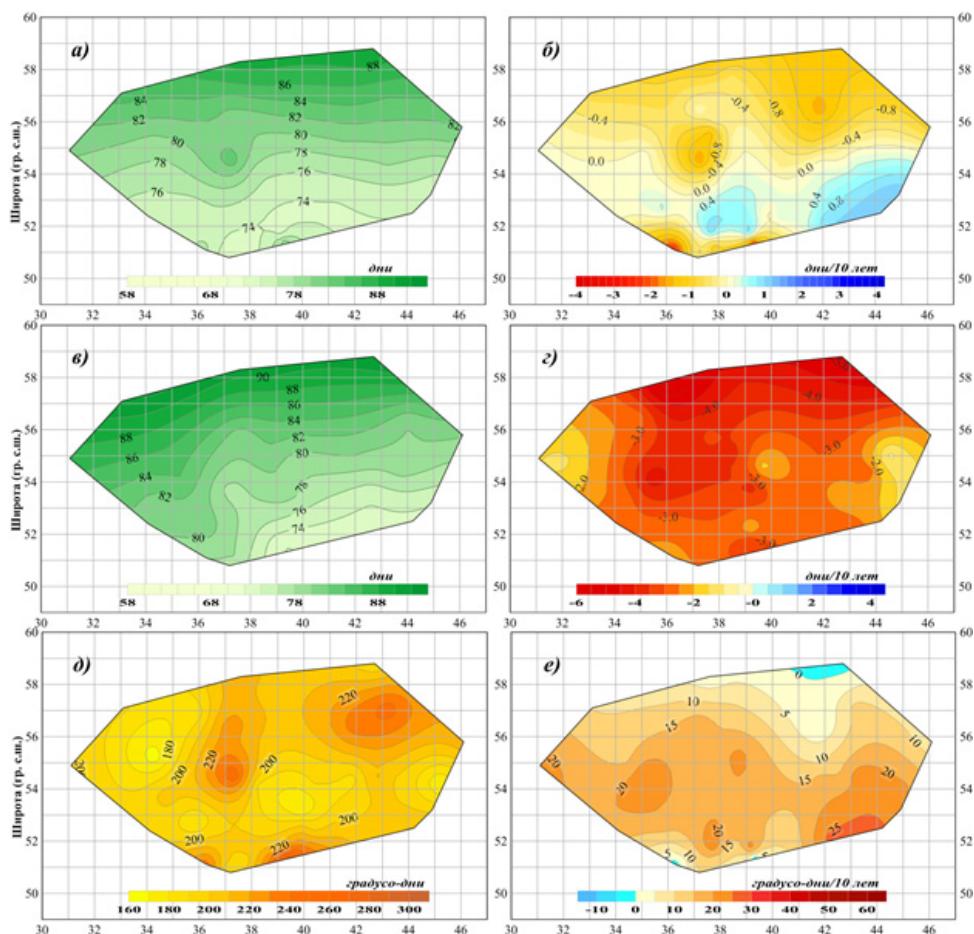


Рисунок 6. Многолетние средние (а, в, д) и коэффициенты линейного тренда (б, г, е) фенологических характеристик рябины обыкновенной

дата зацветания (а, б); дата устойчивого перехода температуры воздуха через 14°C (в, г); сумма активных температур за период от начала вегетационного периода до даты зацветания рябины (д, е)

Характерной особенностью многолетних изменений дат зацветания рябины, как и в случае с черемухой, является зона пониженных значений коэффициентов линейного тренда (положительных и отрицательных) в полосе между 52 и 54° с.ш. (рис. 6б). Причем на востоке этой зоны очаг с положительными коэффициентами (т.е. событие стало наступать позже) опускается южнее 52° с.ш. Севернее и южнее зоны также наблюдается некоторое (более слабое, чем в случае с черемухой) повышение интенсивности нисходящих трендов (до -1,0 дня за 10 лет).

Переход температуры через 14°C более активно смещается на ранние сроки в северной части (до -4.5 дней/10 лет) (рис. 6г). Разница в значениях коэффициентов линейных трендов дат зацветания рябины и переходов температуры через 14°C достигает 5 - 10 раз, т.е. потепление этого периода весны развивается значительно более активно, чем происходят изменения в фенологии рябины (в отмеченной выше зоне тенденции вообще противоположны). Как и в случае с черемухой, наиболее высокие значения коэффициентов трендов сумм активных температур приурочены к южной части, а максимальные скорости повышения сумм температур отмечаются именно в зоне между 52 и 54 градусами с.ш., где изменений в сроках зацветания рябины практически нет (рис. 6е).

Наиболее тесная связь сроков зацветания рябины (рис.7) отмечена со средними весенними температурами (-0.3 ... -0.7), с датами переходов температуры через 14°C (0.2 - 0.5) и через 5°C (0.2 - 0.4). Как и в предыдущих случаях, корреляция с суммами активных температур весьма слабая, лишь в южной части достигает 0.3 - 0.4.

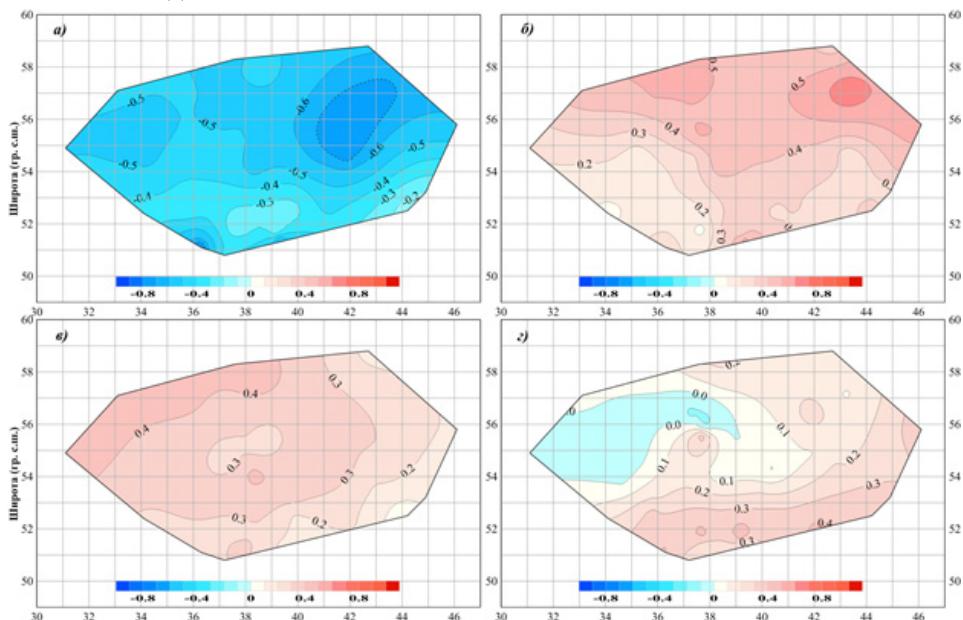


Рисунок 7. Коэффициенты корреляции между датой зацветания рябины обыкновенной и климатическими показателями

- а) средняя температура весеннего сезона; б) дата устойчивого перехода температуры через 14°C;
- в) дата начала вегетационного периода; г) сумма активных температур (от начала вегетации до даты зацветания рябины)

Липа мелколистная. Цветение липы мелколистной – характерный аспект субсезона «полное лето». Наступает в сроки от 23 июня на юге рассматриваемой территории до 3 июля на севере. «Волна» цветения продвигается с шагом 1.5 - 2.5 дня на 1 градус широты (рис. 8 а). Изолинии переходов температуры через 17°C ориентированы с юго-запада на северо-восток. Скорость продвижения температурной «волны» от 1.5 - 2 дней на градус широты на юго-востоке до 4 - 5 дней на северо-западе (рис. 8 в). В поле сумм активных температур вновь зональность отсутствует (рис. 8 д).

В поле значений коэффициентов линейного тренда дат зацветания липы зона положительных значений существенно расширилась (по сравнению с черемухой и рябиной), отрицательные значения присутствуют на севере и локально на юге территории. Перепад значений коэффициента от -0.8 до +0.4 дня за 10 лет (рис. 8 б).

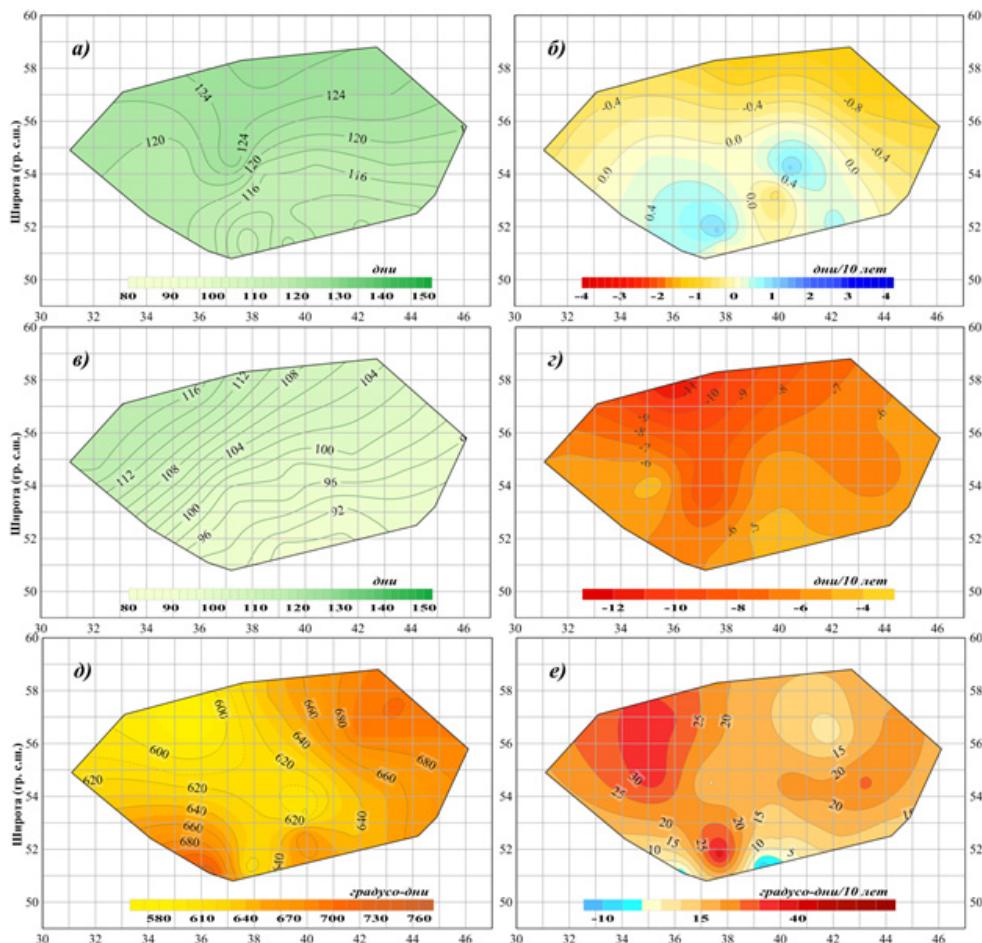


Рисунок 8. Многолетние средние (слева) и коэффициенты линейного тренда (справа) фенологических характеристик липы мелколистной
дата зацветания (а, б); дата устойчивого перехода температуры через 17°C (в, г); сумма активных температур за период от начала вегетации до даты зацветания липы (д, е).

Коэффициенты линейного тренда дат переходов температуры через 17°C везде отрицательные с максимумами на севере (до -9 ... -11), в южной половине – до -5 ... -6 дней/10 лет (рис. 8 г). Разница в коэффициентах линейных трендов дат зацветания и переходов температуры через 17°C достигает 8 - 25 раз, т.е. скорости потепления периода цветения липы значительно превышают аналогичный показатель по срокам зацветания липы (рис. 8 б, г), и это различие существенно выше аналогичных показателей у бересклета, черемухи и рябины. При этом потепление наблюдается на всей территории с максимальными скоростями на севере. Суммы температур также демонстрируют практически повсеместную тенденцию к некоторому повышению за рассматриваемый период без четко выраженных территориальных особенностей (рис. 8 е).

В случае с липой, в отличие от других рассматриваемых видов, наиболее тесная корреляционная связь дат зацветания (рис. 9) отмечается с датами устойчивых переходов температуры через близкое по срокам пороговое значение 17°C (0.4 - 0.6); несколько слабее корреляция со средней весенней температурой (-0.3 ... -0.5), а также с переходами через 5°C и суммами активных температур (0.0 - ±0.5).

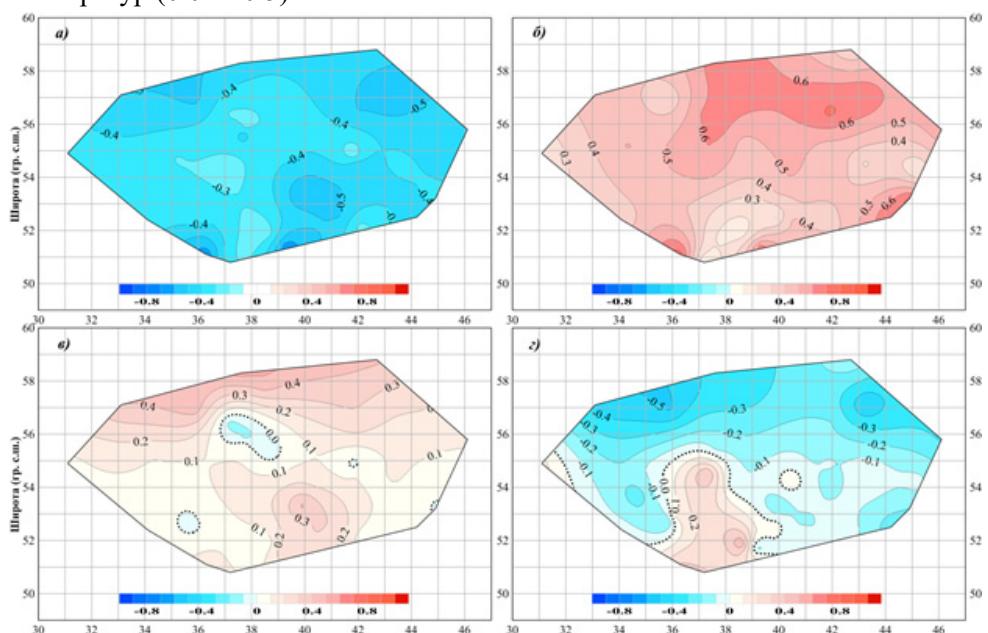


Рисунок 9. Коэффициенты корреляции между датой зацветания липы мелколистной и климатическими показателями

- а) средняя температура весеннего сезона; б) дата устойчивого перехода температуры через 17°C ,
- в) дата начала вегетационного периода; г) сумма активных температур (от начала вегетации до даты зацветания)

Обсуждение

Выделяется общая закономерность – замедление фенологических и температурных «волн» при их продвижении с юга на север (кроме начала вегетационного периода – устойчивого перехода температуры через 5°C , для которого

характерно замедление при продвижении из срединной части и к северу, и к югу). Однако если для полей изофен это замедление выражено слабо (от 1 дня на градус широты на юге до 4 дней на севере), то для переходов через пороговые значения температуры замедление существенно (до 10 и более дней на градус широты на севере для перехода температуры через 17°C).

Расположение изолиний также сходное (широтное). Это свидетельствует об однородности факторов, обуславливающих проявление температурных и фенологических событий на всей территории.

В целом фенологические тенденции у деревьев в рассматриваемом регионе соответствуют изменениям температурного режима. Наступление фенологических фаз смещается на более ранние сроки. Коэффициенты корреляции всех рассматриваемых фенологических явлений со средней весенней температурой имеют отрицательный знак и положительный знак с датами устойчивых переходов температуры воздуха через 5°C и близкие к срокам фенофаз пороговые значения. С суммами активных температур связь не столь однозначна. Возможные следующие пояснения.

Сумма активных температур считается от дня начала вегетации до наступления феноявления. Процессы происходят в апреле-мае, когда уже любой поток тепла выше многолетних значений заметно ускоряет ростовые процессы и влияет на сроки сезонного развития. Этот лаг в прохладные затяжные весны увеличивается, хотя сумма активных температур может быть в такие годы гораздо меньше. При быстрой волне тепла лаг укорачивается, и сумма активных температур может быть больше по абсолютному значению, несмотря на то, что сроки наступления фенофазы регистрируются раньше. Для одних и тех же видов, произрастающих в разных широтах, каждый день добавляет к росту радиационного баланса, но в более северных регионах нарастание тепла, не учитываемого суммой активных температур, может проходить быстрее при одинаковых среднесуточных температурах за счёт более интенсивного увеличения светового дня. Так, со дня весеннего равноденствия ко дню летнего солнцестояния продолжительность дня на севере ЕТР увеличивается на 2 часа по сравнению с южными регионами. Поэтому для рябины и липы за счет большей продолжительности светового дня сумма активных температур на севере и юге может быть одинаковой в математическом выражении, или же на севере даже меньше, так как учитываются градусо-дни, а не градусо-часы.

Наиболее активны фенологические реакции севернее 54 град. с.ш. в зонах южной тайги и подтаежных лесов (Растительность..., 1980). Однако южнее, в зонах широколиственных лесов и луговых степей тренды дат практически отсутствуют, а в случае с липой появляются и положительные значения коэффициента.

Положительные коэффициенты у линейного тренда для липы мелколистной могут появляться в связи с региональными особенностями температурного режима в конце мая и июне. Тогда даже если начало облиствения проходило в нормальные сроки, фаза зацветания будет запаздывать. В пользу этого предположения мы находим совпадение двух зон (рис. 8 б, рис. 8 е) с

положительными коэффициентами линейных трендов для липы с зонами высоких коэффициентов для линейных трендов сумм активных температур (южная и юго-восточная части ЕТР). Невысокие значения среднемноголетних сумм активных температур (рис. 8 д) при значимом положительном коэффициенте линейного тренда (рис. 8 е) свидетельствуют о том, что за последние годы происходило увеличение лага между началом вегетации и началом фазы, что возможно, скорее всего, при пониженном температурном фоне (погода в июне), который не учитывается выбранными температурными критериями.

Интересно возникновение широтной зоны пониженных значений коэффициентов линейного тренда у черемухи, рябины (52 - 54 град. с.ш.) и липы (52 - 56 град. с.ш.), что находится в противоречии с климатическими тенденциями, которые рассматривались в данной статье.

Скорости многолетних изменений (коэффициенты линейных трендов) фитофенологических явлений и дат устойчивых переходов температуры через пороговые значения существенно различаются, и это различие возрастает в ходе периода вегетации: 2 - 4 раза для березы и черемухи, 5 - 10 раз для рябины и 8 - 25 раз для липы. Возрастание расхождений скоростей может быть обусловлено необходимостью прохождения растениями последовательных фаз вегетационного развития с определенными периодами времени на каждую из них. Из этого следует, что фенологические изменения у растений не прямо следуют за изменением температурных показателей, реализуя гомеостатические механизмы противодействия внешним воздействиям, которые имеют, кроме прочего, пространственную специфику (зона медленных изменений между 52 и 54 град. с.ш.). Данные особенности подтверждают полученные нами ранее результаты аналогичного анализа за период 1970-2010 гг. (Минин, Воскова, 2014).

Корреляционные связи развертывания первых листьев у березы, зацветания черемухи и рябины, как следует из приведенных оценок, наиболее тесные со средней весенней температурой (до -0.7). Также высокие значения коэффициента у березы, рябины и особенно липы с близкими по срокам переходами температуры через пороговые значения 10, 14 и 17°C соответственно (0.4 - 0.6). С датами устойчивых переходов температуры воздуха через 5°C тесная связь у березы и черемухи (0.3 - 0.5). Существенно ниже связь фенологических показателей с суммами активных температур (+0.2 ... -0.2). Следует отметить, что коэффициент корреляции развертывания первых листьев у березы со средней зимней температурой составляет -0.4 ... -0.5, а зацветания черемухи уже -0.1 ... -0.2. Зацветание липы лучше (относительно других рассматриваемых фенологических явлений) коррелирует с переходами температуры через пороговое значение 17°C (0.3 - 0.6) и с суммами активных температур (особенно в северной части региона – до -0.3 ... -0.5).

В средних широтах глубокий зимний покой у древесно-кустарниковых растений заканчивается к концу января, а то и раньше. Так как продолжительность действия холода должна быть не менее 2-3 месяцев, а температура не выше 3-5°C (Горыштина, 1979), резерв гомеостатических механизмов приспособления древесно-кустарниковых видов к внешним воздействиям далеко не исчерпан.

Кроме этого, в зимнем покое видов можно выделить еще один момент. С осени у некоторых растений, в том числе древесно-кустарниковых видов умеренных широт, вырабатывается через «закаливание» способность переносить образование льда в тканях – «льдоустойчивость» (Лархер, 1978). Эта способность сохраняется всю зиму при низких температурах и отсутствии продолжительных оттепелей с высокими температурами, т.е. пока растения находятся в состоянии покоя. Как только начинаются активные ростовые процессы, растения теряют это свойство.

Отсюда для некоторых видов рассматриваемого района ЕТР лимитом начала активных физиологических процессов будет изменение сроков наступления устойчивого весеннего тепла на более ранние, индикаторами которого являются даты переходов температуры воздуха через пороговые значения. Возможно, что на севере ЕТР граница между зимним и весенним сезоном на рассматриваемом промежутке времени более стабильна, чем в южных районах.

В то же время следует учитывать пространственные различия в потребности растений в продолжительности периодов зимнего покоя и вегетации. Можно предположить, что у растений из северных широт есть более широкие резервы для сокращения периода полного зимнего покоя в «пользу» вегетационного по сравнению с растениями из южных широт. И эти различия отражаются в скоростях фенологических изменений. Возможно, именно этими обстоятельствами объясняется возникновение зоны слабых фенологических изменений южнее 54 - 56 градусов северной широты.

Скорее всего, возможности у растений одного вида из разных широт идентичны в смысле наличия обязательной холодной фазы в годовом круге развития для поддержания гомеостаза. Но «обратимое» свойство «льдоустойчивости» более стабильно именно в северных широтах, так как там более стабильный температурный режим зимой. И именно за счет более продолжительного холодного периода северные растения продолжают оставаться в состоянии «вынужденного покоя» до наступления благоприятного температурного режима.

Т.е. для того, чтобы пошли серьезные нарушения гомеостатических механизмов зимнего покоя у растений, в природе должны проявиться и стать стабильными гораздо более сильные климатические изменения. Отсюда приведенные ниже доводы о важности роли светового дня на сокращение зимнего покоя могут оказаться не очень существенными, так как ограничивающим фактором является в первую очередь температура. Если февраль и март по какой-то причине будут очень холодными без продолжительных оттепелей, и будет поддерживаться действием низких температур вынужденный покой, увеличение светового дня не сможет повлиять на выход растений из этой стадии, так как ещё действует защитное свойство «льдоустойчивости». Поэтому, скорее всего, не происходит во время нахождения растения в состоянии «льдоустойчивости» и важных биохимических процессов, направленных на подготовку к вегетации. Всё это запустится позже и будет протекать тем быстрее, чем быстрее и стабильнее пойдет волна тепла.

Таким образом, рассматриваемые фенологические фазы в сезонном развитии деревьев могут быть использованы в качестве индикаторов современных

изменений климата весны (в виде дат устойчивых переходов температуры воздуха через пороговые значения и средней температуры весеннего сезона). Суммы активных температур слабо связаны с весенними фенофазами, но, очевидно, в наступлении летних явлений их роль более значима.

Следует отметить, что происходящие климатические изменения пока не оказывают критического влияния на сезонное развитие некоторых лесообразующих пород Русской равнины. Полученные на «фенологической основе» результаты дополняют выводы о неоднозначности связи динамики растительности и климата, сделанные нами ранее при изучении характера пространственной связи показателей продуктивности растительного покрова и испаряемости (Минин, 1991, 2000; Ведюшкин и др., 1995; Минин, Гутников, 2000; Minin, 2012). В результате реализации гомеостатических механизмов рассматриваемые виды деревьев демонстрируют весьма замедленную и неоднозначную в пространстве реакцию на современное потепление климата. Очевидно, что такая инерционность обеспечивает выживание видов при относительно быстрых, но не критичных изменениях климата. Можно предположить, что и в целом биота (на разных уровнях организации) подобным образом переживает динамичные изменения условий внешней среды.

Список литературы

Ведюшкин М.А., Колосов П.А., Минин А.А., Хлебопрос Р.Г. 1995. Мультистабильность на границах растительных зон. – Сибирский экологический журнал, т. 2, № 3, с. 253-262.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. – М., Росгидромет, 1008 с.

Горышшина Т.К. 1979. Экология растений. Учеб. пособие. – М., Высш. школа, 368 с.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. 2016. Климатические особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2015 г. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 104-136.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. 2016. – М., 67 с. (www.igce.ru)

Лархер В. 1978. Экология растений. – М., Мир, 384 с.

Минин А.А. 1991. Климат и экосистемы сушки: взаимосвязи и пространственно-временная изменчивость состояний. – Итоги науки и техники. Сер. метеорол. и климатол., М., ВИНИТИ, т. 19, 172 с.

Минин А.А. 2000. Фенологические особенности состояния экосистем Русской равнины за последние десятилетия. – Изв. РАН. Серия Географическая, № 3. с. 75-80.

Минин А.А., Воскова А.В. 2014. Гомеостатические реакции деревьев на современные изменения климата: пространственно-фенологические аспекты. – Онтогенез, т. 45, № 3, с. 162-169.

Минин А.А., Гутников В.А. 2000. Феноиндикация современных вариаций климата в европейской части России на примере некоторых лесообразователей и птиц. – Лесоведение, № 2, с. 68-74.

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.

Растительность европейской части СССР. 1980. – Л., Наука, 429 с.

Сезонная жизнь природы Русской равнины. Календари природы. 1979, 1980. – Л., Наука. Ленинградское отделение.

Minin A.A. 2012. Some Aspects of Interrelations between Terrestrial Ecosystems and the Changing Climate. – Biology Bulletin Reviews, vol. 2, No. 2, pp. 176-182.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p

References

Vediushkin M.A., Kolosov P.A., Minin A.A., Khlebopros R.G. 1995. Mul'tistabil'nost' na granitsakh rastitel'nykh zon [The multistability on the borders of the vegetation zones]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal – Siberian ecological journal*, vol. 2, no. 3, pp. 253-262.

Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniiakh klimata I ikh posledstviakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. 2014. [The second assessment report of Roshydromet on climate change and their effects on the territory of the Russian Federation]. Moscow, Roshydromet Publ., 1008 p.

Goryshina T.K. 1979. *Ekologiarastenii. Ucheb. posobie* [Plant ecology: Proc. allowance]. Moscow, 368 p.

Gruza G.V., Ran'kova E.Ia., Rocheva E.V., Samokhina O.F. 2016. Klimaticheskie osobennosti temperaturenogo rezhima u poverkhnosti Zemnogo shara v 2015 g [Climatic features of temperature regime at the surface of the globe in 2015]. *Fundamental'naya I prikladnaya klimatologiya – Basic and applied climatology*, no. 1, pp. 104-136.

Doklad ob osobennostiakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2015 god. 2016 [A report on the peculiarities of climate on the territory of the Russian Federation in 2015]. Moscow, 67 p. (www.igce.ru)

Larkher V. 1978. *Ekologiiia rastenii* [Plant ecology]. Moscow, The world, 384 p.

Minin A.A. 1991. Klimat I ekosistemy sushi: vzaimosviazi I prostranstvenno-vremennaia izmenchivost' sostoianii [Climate and ecosystems: linkages and spatial-temporal variability of States]. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. meteorol. i*

klimatol. – The results of science and technology. Ser. meteorol. and climatol., Moscow, vol. 19, 172 p.

Minin A.A. 2000. Fenologicheskie osobennosti sostoianiia ekosistem Russkoi ravniny za poslednie desiatiletiiia [Phenological characteristics of ecosystems of the Russian plain during the last decades]. *Izv. RAN. Seriya Geograficheskaya*. – *Izv. Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, no. 3, pp. 75-80.

Minin A.A., Voskova A.V. 2014. Gomeostaticeskie reaktsii derev'ev na sovremennoye izmeneniiia klimata: prostranstvenno-fenologicheskie aspeky [The homeostatic reactions of trees to modern climate change: spatial phenological aspects]. *Ontogeny – Ontogenез*, vol. 45, no. 3, pp. 162-169.

Minin A.A., Gutnikov V.A. 2000. Fenoindikatsiia sovremennoykh variatsii klimata v evropeiskoi chasti Rossii na primere nekotorykh lesobrazovatelei I ptits [Phenindione modern variations of climate in the European part of Russia on the example of some of lesobrazovaniya and birds]. *Lesovedenie – Silviculture*, no. 2, pp. 68-74.

Minin A. A., Ran'kova E.Ia., Rybina E.G., Buivolov Iu.A., Sapel'nikova I.I., Filatova T.D. 2016. Fenoindikatsiia izmenenii klimata za period 1976-2015 gg. v tsentral'noi chasti evropeiskoi territorii Rossii: berezha borodavchataia (povislaia) (*Betula verrucosa* Ehrh. (B. pendula Roth.)) [Phenindione of climate change for the period 1976-2015. in the Central part of European Russia: birch (silver birch) (*Betula verrucosa* Ehrh. (B. pendula Roth.)). *Problemy ekologicheskogo monitoringu I modelirovaniia ekosistem – Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling*. vol. XXVII, no. 2, pp. 17-28.

Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR [Vegetation of European part of the USSR]. 1980. Leningrad, Science, 429 p.

Sezonnaia zhizn' prirody Russkoi ravniny. Kalendar prirody [The seasonal nature of the Russian plain. Calendars nature]. 1979, 1980. Leningrad Science.

Minin A.A. 2012. Some Aspects of Interrelations between Terrestrial Ecosystems and the Changing Climate. – Biology Bulletin Reviews, vol. 2, No. 2, pp. 176-182.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p

Статья поступила в редакцию: 22.03.2017

После переработки: 17.04.2017