

4. Зиничев В.В., Зотин А.И. Зависимость суммарного потребления кислорода на разных стадиях развития тихоокеанской кеты // Онтогенез. 1988. Т. 19, № 2. С. 217–220.
5. Зотин А.И., Зотина Р.С. Феноменологическая теория роста, развития и старения организма. М.: Наука, 1993. 364 с.
6. Зотин А.И., Озернюк Н.Д. Влияние температуры на дыхание и уровень АТФ в период дробления яиц выюна // ДАН СССР. 1966. Т. 171, № 4. С. 1002–1004.

REFERENCES

1. Alekseeva T.A., Ozernyuk N.D. Energy exchange and temperature optimum of development of the loach. *Obshchaya biologiya [General biology]*. 48 (4), 525–531 (1987) (in Russian).
2. Astaurov B.L. (Ed.). *Objects of developmental biology*. 580 p. (Moscow: Nauka, 1975) (in Russian).
3. Zakharov V.M., Chubinishvili A.T., Dmitriyev S.G., Baranov A.S., Borisov V.I., Valetskiy A.V., Krysanov E.Yu., Kryazheva N.G., Pronin A.V., Chistyakova E.K. *Health of the Environment: Practical Evaluation*. 320 p. (Moscow: Center for Environmental Policy of Russia, 2000) (in Russian).
4. Zinichev V.V., Zotin A.I. Dependence of total oxygen consumption at different stages of Pacific chum development. *Ontogenez [Ontogenesis]*. 19 (2), 217–220. (1988) (in Russian).
5. Zotin A.I., Zotina R.S. *Phenomenological theory of growth, development and aging of the organism*. 364 p. (Moscow: Nauka, 1993) (in Russian).
6. Zotin A.I., Ozernyuk N.D. Influence of temperature on respiration and the level of ATP during the crushing of loach eggs. *Doklady AN SSSR*. 171 (4), 1002–1004 (1966) (in Russian).

УДК 581.1:551.583

ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ В ПРИРОДЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ РУССКОЙ РАВНИНЫ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

А.А. Минин, Э.Я. Ранькова, Ю.А. Буйволов,
И.И. Сапельникова, Т.Д. Филатова¹

В статье анализируются тренды фенологических характеристик берёзы бородавчатой, черёмухи обыкновенной, рябины обыкновенной и липы мелколистной в центральной части Европейской территории России (ЕТР). Оценки получены на базе данных многолетних наблюдений за наступлением фаз развёртывания первых листьев у берёзы и начала цветения черёмухи, рябины и липы за 1976–2015 гг. – период наиболее интенсивного современного глобального потепления в России. В целом, современное потепление климата оказывает определённое влияние на фенологию всех этих видов, однако проявляются пространственные и календарные различия в их фенологических реакциях.

¹ Минин Александр Андреевич – д.б.н., начальник мастерской ГАУ «Институт Генплана Москвы», aminin1959@mail.ru; Ранькова Эсфирь Яковлевна – в.н.с. Института географии РАН, firankova@gmail.com; Буйволов Юрий Анатольевич – в.н.с. Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, ubuyvolov@gmail.com; Сапельникова Инна Игоревна – с.н.с. Воронежского государственного природного биосферного заповедника им. В.М. Пескова, is@reserve.vrn.ru; Филатова Татьяна Дмитриевна – с.н.с. Центрально-Чернозёмного государственного природного биосферного заповедника им. проф. В.В. Алехина, filatova@zapoved-kursk.ru.

Ключевые слова: изменения климата, фенология берёзы, рябины, черёмухи, липы, скорость фенологического тренда, устойчивый переход температуры воздуха через пороговые значения, сумма активных температур.

PHENOLOGICAL TRENDS IN NATURE OF THE CENTRAL PART OF THE RUSSIAN PLAIN UNDER THE CONDITIONS OF MODERN WARMING

A.A. Minin¹, E.Ya. Ran'kova², Yu.A. Buyvolov³, I.I. Sapel'nikova⁴, T.D. Filatova⁵

¹The Moscow General Planning Research and Project Institute, State Unitary Enterprise (Genplan Institute of Moscow),

²Institute of Geography of RAS,

³Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet & RAS,

⁴Voronezh Nature Reserve, ⁵Central Black Earth Nature Reserve

The article touches upon the issue of the phenological characteristics of the *Betula pendula* (silver birch), *Prunus padus* (bird cherry), *Sorbus* (mountain ash), and *Tilia cordata* (small-leaved lime) in the central part of European Russia (ER). The data obtained are based on many years of observation of the first leaves unfolding phase for the *Betula pendula* and the flowering phase for the *Prunus padus*, *Sorbus*, and *Tilia cordata* in the period from 1976 till 2015 (the period of the most intense modern warming in Russia). In general, the current climate change affects the phenology of all the above-mentioned species; however, various species demonstrate spatial and calendar differences in their phenological reactions. The *Prunus padus* and *Sorbus* do not demonstrate significant trends in their flowering dates (or weak positive values of the linear trend coefficient) in the territories located between 52° and 54°N. To the north and south of those areas, the value of the coefficient is negative: up to -1.5 days/10 years for the *Prunus padus*, and up to and 1.0 days/10 years for the *Sorbus*. However, for the *Tilia cordata*, the area of positive values extends northwards up to 56°N. The discrepancies in the trends of phenological stages and trends of dates of the stable transition of the air temperature across threshold values close to the phenological stages are ranged from 2 to 10 times for the *Betula pendula*, *Prunus padus* and *Sorbus* and make up to 8–25 times for the *Tilia*. 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, phenology of *Sorbus*, phenology of *Prunus padus*, phenology of *Tilia cordata*, pace of phenological trend, stable transition of the air temperature across threshold values, sum of active temperatures.

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

Целью данной работы является анализ трендов дат развёртывания первых листьев у берёзы бородавчатой, зацветания черёмухи, рябины и липы за 1976–2015 гг. (период современного потепления в России) в центральной части Европейской территории России (ЕТР) в сопоставлении с характером многолетних изменений средней суточной температуры воздуха и сумм активных температур.

Материал и методика. По аналогии с оценкой трендов сезонной температуры по средней скорости её многолетних изменений [5], 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 (1976–2015 гг.). Методика расчётов и подготовки рядов фенологических данных подробно описана нами ранее [12]. В статье рассматривается территория между 51° и 59° с. ш. и 31° и 46° 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 развёртыванием первых листьев у берёзы бородавчатой (*Betula verrucosa* Ehrh. – *B. pendula* Roth.), началом цветения черёмухи 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 [8, 15]. 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 зацветёт 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 срокам наступления рассматриваемых фенофаз, а именно: 10°C – развёртывание первых листьев у берёзы, 12°C – зацветание черёмухи, 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 пяти дней подряд сумма накопленных положительных отклонений среднесуточной температуры выше суммы отрицательных. Или: T_0 – первый день, начиная с которого накопленная сумма градусо-дней остаётся положительной в течение не менее пяти дней подряд. В расчётах использованы данные наблюдений 30 метеостанций, ближайших к пунктам фенологических наблюдений (иногда одна станция была ближайшей сразу к двум и даже трём пунктам наблюдений).

Результаты анализа представлены ниже в виде пространственных распределений (полей) средних многолетних значений и оценок линейного тренда всех переменных.

За начало периода современного потепления в настоящей работе, следуя сложившейся практике, принят 1976 г. (см., например, [2, 4, 5, 16]).

Даты начала вегетационного периода. Устойчивый переход температуры воздуха весной через 5°C происходит с 9 апреля на юге по 21 апреля на севере рассматриваемой территории. Скорость перемещения «волны» перехода с юга на север неравномерна и составляет от 1,5 дней на 1° широты в срединной части до 3–4 дней на юге и севере; расположение изолиний в основном широтное (рис. 1а). Прослеживается

хорошо выраженная тенденция к более раннему наступлению вегетационного периода, 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. 16).

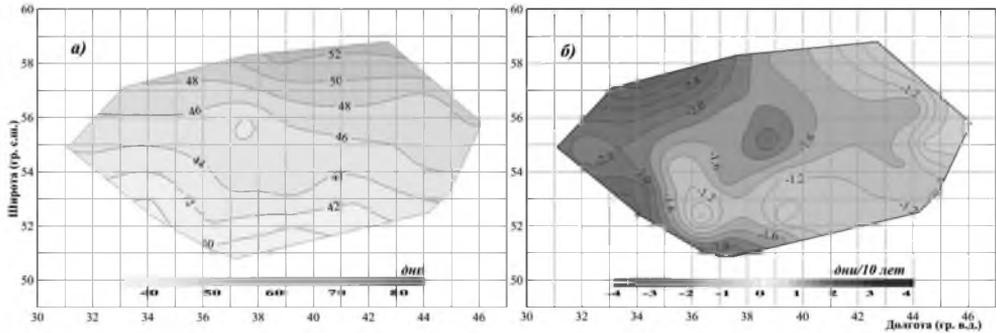


Рис. 1. Даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха весной через 5°C : а) многолетние средние за период 1976–2015 гг., б) коэффициенты линейного тренда за период 1976–2015 гг. (дни/10 лет).

Берёза бородавчатая. Развёртывание первых листьев наступает в сроки от 23 апреля на юге до 3 мая на севере. Структура изофен (рис. 2а) имеет чётко выраженный широтный характер с лагом от 3–4 дней на 1° 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 1° широты в северной (рис. 2в). Поле изолиний средних сумм активных температур не имеет выраженной зональности (рис. 2д). Наиболее высокие значения коэффициента тренда дат развёртывания первых листьев (более $-0,8/10$ лет) приурочены к северной и центральной частям территории (рис. 2б), тогда как коэффициент тренда переходов температуры через 10°C (рис. 2г) – 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 развёртывания первых листьев в восточной части примерно одинаковы, а в западной – выше в 2–4 раза (рис. 2б, г). Характерно, что интенсивность изменения сумм активных температур также выше в западном секторе; в восточном секторе есть территории с нулевыми коэффициентами (рис. 2е).

Таким образом, для берёзы максимальная интенсивность «фенологического» тренда в целом существенно ниже температурного. 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. 2е). Так бывает при стремительном приходе тепла после начала вегетации. Напротив, в аномальной зоне на юге участка (рис. 2б), в отличие от соседних регионов, показано, что 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.

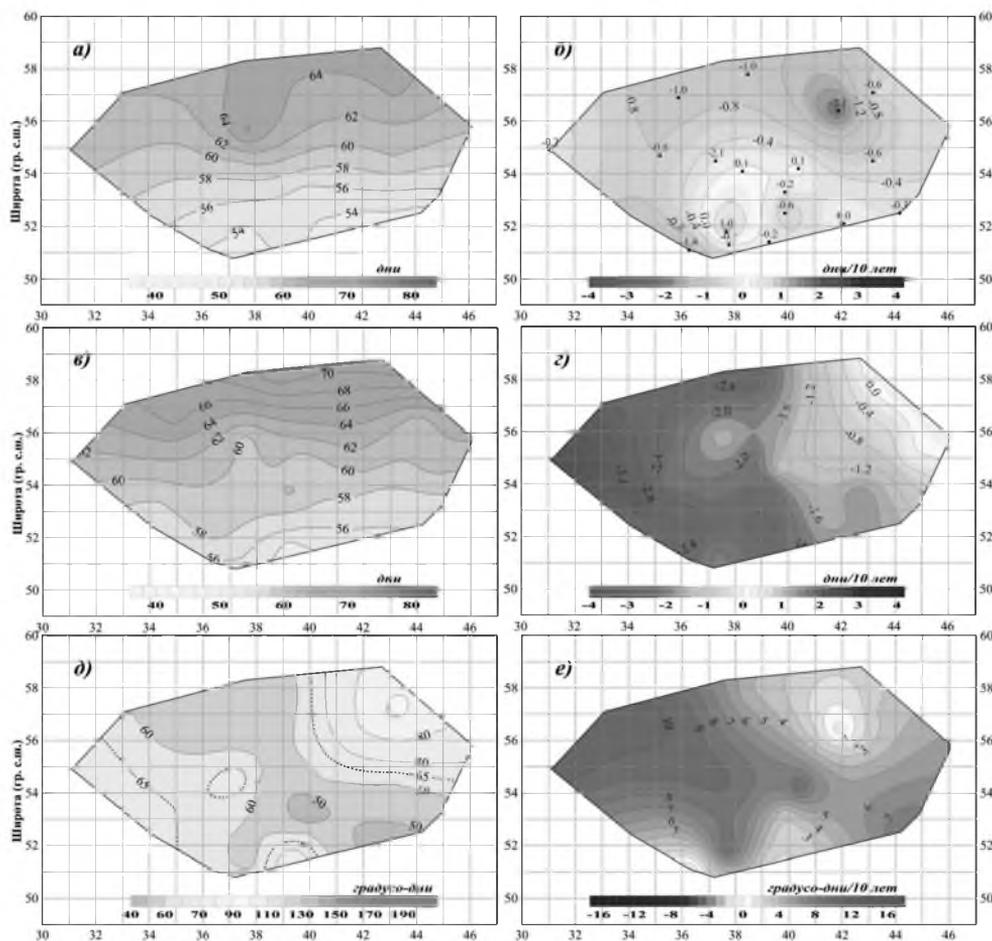


Рис. 2. Многолетние средние (слева) и коэффициенты линейного тренда (справа) для фенологии берёзы бородавчатой: дата развёртывания первых листьев (а, б), дата устойчивого перехода температуры через 10°C (в, г), сумма активных температур (от начала вегетации до даты развёртывания первых листьев) (д, е).

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

Расположение изофен широтное с лагом примерно от 1 дня на 1° широты в южной части до 2–3 дней в срединной и северной (рис. 3а). 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 1° широты) и замедленным в северной (до 2–3 дней на 1°) (рис. 3в). Поле средних многолетних сумм температур не имеет чёткой зональности (рис. 4д).

В поле коэффициентов линейного тренда черёмухи выделяется полоса пониженных значений между 52° и 54° с. ш., к северу и к югу от которой значения коэффициента (по модулю) повышаются до -1 – -1,5 за 10 лет, т. е. фаза стала наступать за последние 40 лет

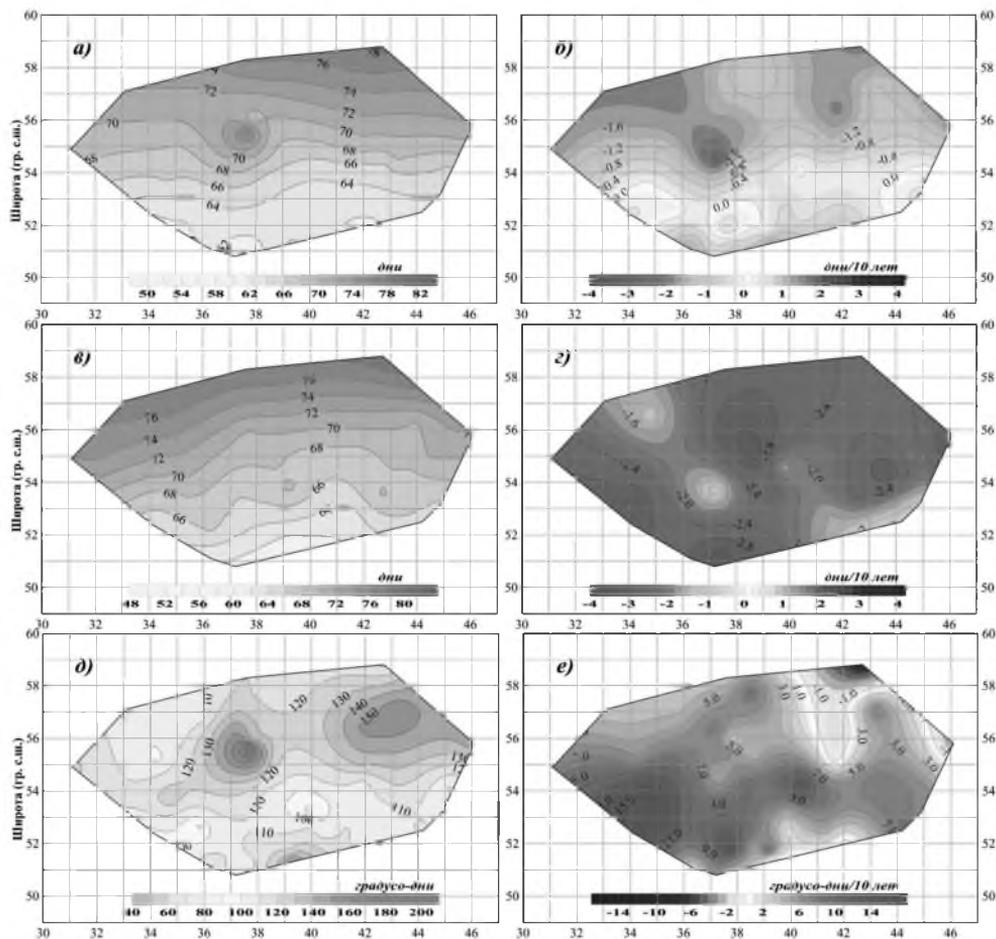


Рис. 3. Многолетние средние (слева) и коэффициенты линейного тренда (справа) фенологических характеристик черёмухи обыкновенной: дата зацветания (а, б); дата устойчивого перехода температуры воздуха через 12°C (в, г); сумма активных температур за период от начала вегетации до даты зацветания (д, е).

примерно на неделю раньше (рис. 3б). Как и в случае с берёзой, коэффициенты трендов близких по срокам к зацветанию черёмухи дат переходов температуры (через 12°C) в 2–4 раза выше (рис. 3б, г). Поля изолиний коэффициентов трендов фенологических и климатических характеристик существенно различаются. Следует отметить, что коэффициенты трендов сумм активных температур имеют повышенные значения именно в южной части региона (рис. 3е).

Рябина обыкновенная. Зацветание рябины символизирует переход от субсезона «разгар весны» к «предлетью». Наступает примерно через 10 дней после зацветания черёмухи, 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° широты на юге до 3–4 дней на севере (рис. 4а).

Изолинии средних многолетних дат переходов температуры через 14°C ориентированы с запада-юго-запада на восток-северо-восток с лагом от 2–3 дней на юге до 4 дней на 1° широты на севере (рис. 4в).

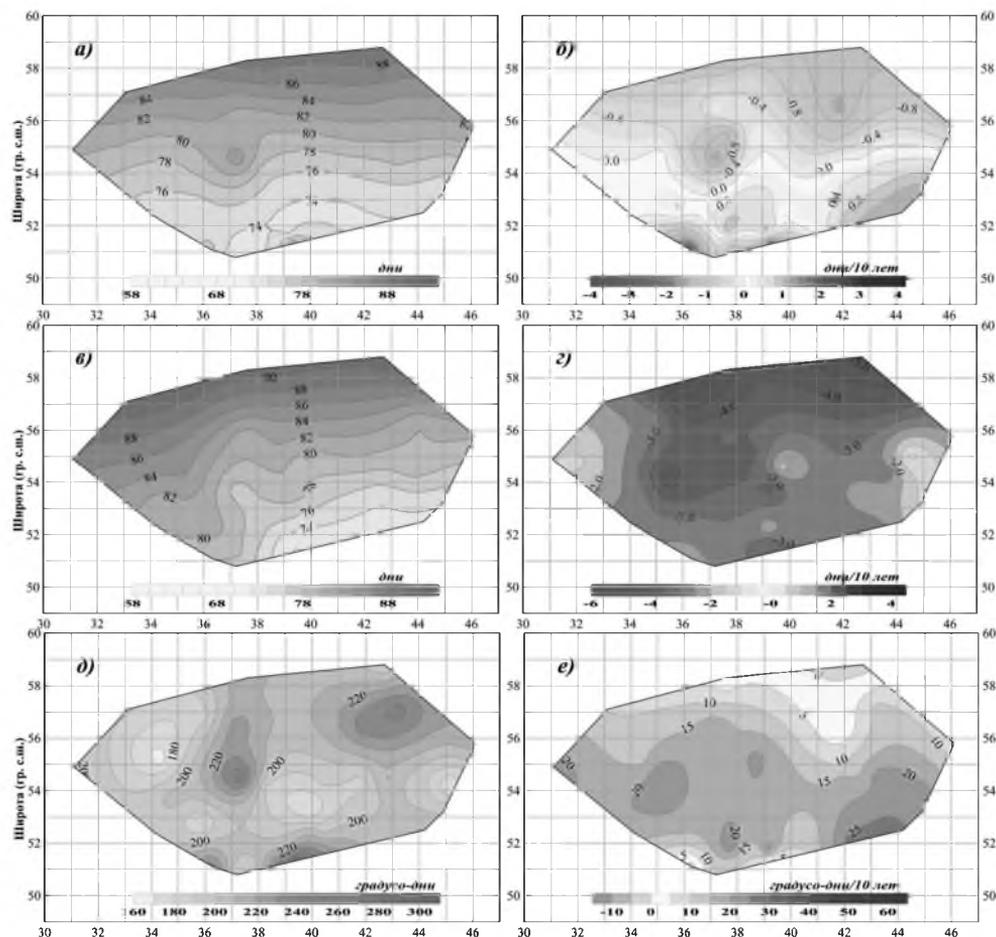


Рис. 4. Многолетние средние (а, в, д) и коэффициенты линейного тренда (б, г, е) фенологических характеристик рябины обыкновенной: дата зацветания (а, б); дата устойчивого перехода температуры воздуха через 14°C (в, г); сумма активных температур за период от начала вегетационного периода до даты зацветания рябины (д, е).

Характерной особенностью многолетних изменений дат зацветания рябины, как и в случае с черёмухой, является зона пониженных значений коэффициентов линейного тренда (положительных и отрицательных) в полосе между 52° и 54° с. ш. (рис. 4б). Причём 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 черёмухой) 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. 4г). 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 черёмухой, 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° с. ш., где изменений в сроках зацветания рябины практически нет (рис. 4е).

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° широты (рис. 5а). Изолинии переходов температуры через 17°C ориентированы с юго-запада на северо-восток. Скорость продвижения температурной «волны» от 1,5–2 дней на 1° широты на юго-востоке до 4–5 дней на северо-западе (рис. 5в). В поле сумм активных температур вновь зональность отсутствует (рис. 5д).

В поле значений коэффициентов линейного тренда дат зацветания липы зона положительных значений существенно расширилась (по сравнению с черёмухой и ряби-

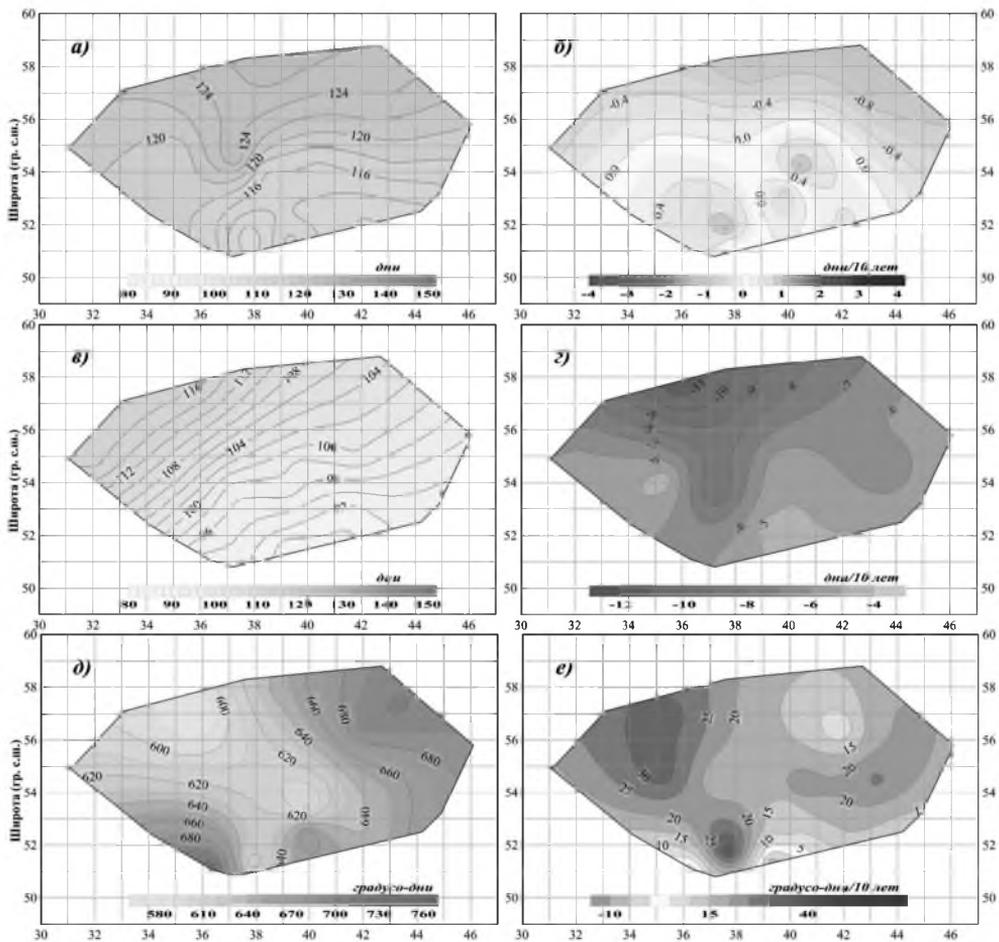


Рис. 5. Многолетние средние (слева) и коэффициенты линейного тренда (справа) фенологических характеристик липы мелколистной: дата зацветания (а, б); дата устойчивого перехода температуры через 17°C (в, г); сумма активных температур за период от начала вегетации до даты зацветания липы (д, е).

ной), отрицательные значения присутствуют на севере и локально на юге территории. Перепад значений коэффициента от $-0,8$ до $+0,4$ дня за 10 лет (рис. 5б).

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. 5г). 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. 5б, г), и это различие существенно выше аналогичных показателей у берёзы, черёмухи 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 чётко выраженных территориальных особенностей (рис. 5е).

Обсуждение результатов. 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 1° широты на юге до 4 дней на севере), то для переходов через пороговые значения температуры замедление существенно (до 10 и более дней на 1° 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.

Наиболее активны фенологические реакции севернее 54° с. ш. в зонах южной тайги и подтаёжных лесов [14]. Тогда как южнее, в зонах широколиственных лесов и луговых степей, тренды дат практически отсутствуют, а в случае с липой появляются и положительные значения коэффициента.

Положительные коэффициенты линейного тренда для липы мелколистной могут появляться в связи с региональными особенностями температурного режима в конце мая и июне. Даже если начало облиствения проходило в нормальные сроки, фаза зацветания будет запаздывать. В пользу этого предположения мы находим совпадение двух зон (рис. 5б, 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 среднесезонных сумм активных температур (рис. 5д) при значимом положительном коэффициенте линейного тренда (рис. 5е) свидетельствуют о том, что за последние годы происходило увеличение лага между началом вегетации и началом фазы, что возможно при пониженном температурном фоне (погода в июне), который не учитывается выбранными температурными критериями.

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

Скорости многолетних изменений (коэффициенты линейных трендов) фенологических явлений и дат устойчивых переходов температуры через пороговые зна-

чения существенно различаются, и это различие возрастает в ходе периода вегетации: 2–4 раза для берёзы и черёмухи, 5–10 раз для рябины и 8–25 раз для липы. Возрастные расхождений скоростей может быть обусловлено необходимостью прохождения растениями последовательных фаз вегетационного развития с определёнными 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° с. ш.). Данные особенности подтверждают полученные нами ранее результаты аналогичного анализа за период 1970–2010 гг. [10].

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 [3], резерв гомеостатических механизмов приспособления древесно-кустарниковых видов к внешним воздействиям 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» [6]. 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° северной широты.

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

Для того, чтобы пошла серьёзные нарушения гомеостатических механизмов зимнего покоя у растений, в природе должны проявиться и стать стабильными гораздо более сильные климатические изменения. Отсюда приведённые ниже доводы о важности роли светового дня для сокращения зимнего покоя могут оказаться не очень существенными, так как ограничивающим фактором является в первую очередь тем-

пература. Если февраль, 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 защитный эффект «льдоустойчивости». Поэтому, возможно, не происходит во время нахождения растения в состоянии «льдоустойчивости» важных биохимических процессов, направленных на подготовку к вегетации. Всё это запустится позже и будет протекать тем быстрее, чем быстрее и стабильнее пойдет волна тепла.

Заключение. 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, в том числе при изучении характера пространственной связи показателей продуктивности растительного покрова и испаряемости [1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17]. 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 динамические изменения условий внешней среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведюшкин М.А., Колосов П.А., Минин А.А., Хлебопрос Р.Г. Мультистабильность на границах растительных зон // Сибирский экологический журнал. 1995. Т.2, № 3. С. 253–262.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. Горышица Т.К. Экология растений: Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1979. 368 с.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. Климатические особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2015 г. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 1. С. 104–136.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. М., 2016. 67 с. (www.igce.ru).
6. Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 384 с.
7. Минин А.А. Климат и экосистемы суши: взаимосвязи и пространственно-временная изменчивость состояний // Итоги науки и техники. Сер. метеорол. и климатол. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 19. 172 с.
8. Минин А.А. Изменения в сроках наступления некоторых фенологических явлений у деревьев на Русской равнине за последние 30 лет // Ботанический журнал. 1998. Т. 83, № 6. С. 73–78.
9. Минин А.А. Фенологические особенности состояния экосистем Русской равнины за последние десятилетия // Изв. РАН. Сер. Географ. 2000. №3. С. 75–80.
10. Минин А.А., Воскова А.В. Гомеостатические реакции деревьев на современные изменения климата: пространственно-фенологические аспекты // Онтогенез. 2014. Т. 45, № 3. С. 162–169.
11. 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.

12. Минин А.А., Ранькова Э.Я., Рыбина Е.Г., Буйволов Ю.А., Сапельникова И.И., Филатова Т.Д. Феноиндикация изменений климата за период 1976–2015 гг. в центральной части Европейской территории России: берёза бородавчатая (повислая) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.)) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016. Т. 27. № 2. С. 17–28.

13. Минин А.А., Ранькова Э.Я., Рыбина Е.Г., Буйволов Ю.А., Сапельникова И.И., Филатова Т.Д. Феноиндикация изменений климата за период 1976–2015 гг. в центральной части Европейской территории России: берёза бородавчатая (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.)), черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 3. С. 5–22.

14. Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 429 с.

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

16. 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 and New York: Cambridge University Press. 1535 p.

17. Minin A.A. Some Aspects of Interrelations between Terrestrial Ecosystems and the Changing Climate // Biology Bulletin Reviews. 2012. V. 2, No. 2. Pp. 176–182.

REFERENCES

1. Vedushkin M.A., Kolosov P.A., Minin A.A., Khlebopros R.G. Multistability on the borders of the vegetation zones. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 2 (3), 253–262 (1995) (in Russian).

2. *The second assessment report on climate change and their effects on the territory of the Russian Federation*. 1008 p. (Moscow, Roshidromet, 2014) (in Russian).

3. Goryshina T.K. *Plant ecology*. 368 p. (Moscow: Vysshaya Shkola, 1979) (in Russian).

4. Gruzha G.V., Rankova E. Ya., Rocheva E.V., Samohina O.F. Climatic features of temperature regime at the surface of the globe in 2015. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 1, 104–136 (2016) (in Russian).

5. *A report on the peculiarities of climate on the territory of the Russian Federation in 2015*. 67 p. (Moscow, 2016, www.igce.ru) (in Russian).

6. Larkher V. *Plant ecology*. 384 p. (Moscow: Mir, 1978) (in Russian).

7. Minin A.A. *Climate and ecosystems: linkages and special-temporal variability of states*. 172 p. (Moscow: VINITI, Itogi nauki i tehniki, 1991) (in Russian).

8. Minin A.A. Changes in the time of setting in some phenological phenomena in trees growing on the Russian plain for the last 30 years. *Botanicheskii zhurnal*. 83 (6), 73–78 (1998) (in Russian).

9. Minin A.A. Phenological characteristics of ecosystems of the Russian plain during the last decades. *Izvestiya RAN, ser. Geographicheskaya*. 3, 75–80 (2000) (in Russian).

10. Minin A.A., Voskova A.V. The homeostatic reactions of trees to modern climate change: spatial phenological aspects. *Ontogenez*. 45 (3), 162–169 (2014) (in Russian).

11. Minin A.A., Gutnikov V.A. Phenoincication of current fluctuations in climate in the European part of Russia by the example of some forest-forming species and birds. *Lesovedenie*. 2, 68–74 (2000) (in Russian).

12. Minin A.A., Ran'kova E. Ya., Ribina E.G., Buyvolov U.A., Sapel'nikova I.I., Filatova T.D. Phenoincication of current fluctuations in climate in the center of the European part of Russia for the 1976–2015 years. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 27 (2), 17–28 (2016) (in Russian).

13. Minin A.A., Ran'kova E. Ya., Ribina E.G., Buyvolov Yu.A., Sapel'nikova I.I., Filatova T.D. Phenoincication of climate change for the period 1976–2015 in the center part of the European Russia: common birch (silver birch) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Roth.)), bird cherry (*Padus avium* Mill.), mountain ash (rowan) (*Sorbus aucuparia* L.), small-leaves lime (linden) (*Tilia cordata* Mill.). *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 28 (3), 5–22 (2017) (in Russian).

14. *Vegetation of European part of the USSR*. 429 p. (Leningrad, Nauka, 1980) (in Russian).

15. *Seasonal dynamic of Russian plain nature: Chronicle data* (Leningrad: Nauka, 1979, 1980) (in Russian).

16. 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.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1535 p. (Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press).

17. Minin A.A. Some Aspects of Interrelations between Terrestrial Ecosystems and the Changing Climate. *Biology Bulletin Reviews*. 2 (2), 176–182 (2012).

УДК 51-76 + 574.2

УСТОЙЧИВОСТЬ БИОТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ И ЭЛЕМЕНТЫ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Г.С. Розенберг¹

Устойчивость является важнейшим качеством систем. Обсуждаются математические формализации и экологические примеры различных определений устойчивости: устойчивость по Ляпунову, Лагранжу (стабильность), Пуассону (периодическая устойчивость), Свирежеву (иерархическая), Холлингу (упругость), Флейшману (живучесть), Гнеденко (надёжность) и др. Обсуждаются примеры использования фрактальной геометрии как развития статистических методов для описания структуры и устойчивости сообществ.

Ключевые слова: *устойчивость, стабильность, надёжность, живучесть, упругость, структура, фрактал.*

STABILITY OF BIOTIC COMMUNITIES AND ELEMENTS OF FRACTAL GEOMETRY

G.S. Rozenberg, Prof., Dr.Sci (Biol.)
Institute of Ecology of the Volga River Basin of RAS

The main idea of the article is that stability is the most important characteristic of any system. As the title implies the article describes mathematical formalizations and environmental examples of various definitions of stability such as Lyapunov stability, Lagrange stability, Poisson periodic stability, Svirezhev hierarchical stability, Holling (resilience), Fleischmann (survivability), Gnedenko (reliability), etc. The author considers examples of the use of fractal geometry in the development of statistical methods for the description of the structure and stability of biotic communities.

Keywords: *stability, reliability, survivability, elasticity, structure, fractal.*

Введение. Устойчивость (вместе со сложностью и целостностью) представляет собой одну из важнейших характеристик любой сложной системы и характеризует способность системы противостоять возмущающим факторам среды в целях своего сохранения и поддерживать свою структуру более или менее стабильной на протяжении

¹ Розенберг Геннадий Самуилович – проф., д.б.н., чл.-корр. РАН, директор Института экологии Волжского бассейна РАН, genarozenberg@yandex.ru.