

УДК 911.2
DOI 10.17513/use.38073

ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРОДА ЕКАТЕРИНБУРГА В СВЯЗИ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ

Янцер О.В.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет», Екатеринбург,
e-mail: ksenia_yantser@bk.ru

Представлено исследование особенностей сезонной динамики растений в г. Екатеринбурге, выступающих индикаторами климатических изменений. Исследование сезонного развития антропогенных комплексов выступает важной составляющей характеристики динамических состояний современных ландшафтов. В качестве материалов исследования выступили многолетние ряды значений температур приземного воздуха и количества атмосферных осадков для метеостанции, а также данные сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Мирового центра данных. В ходе статистической обработки материалов были проанализированы средняя многолетняя дата наступления явления по городу, дисперсия, стандартное отклонение (ошибка) среднего значения и крайние даты регистрации явления. Временные ряды оценивались с помощью линейного тренд-анализа, характеризующего изменения климата с выбранным разрешением и представляющего тенденцию изменения показателя в виде прямой линии. Исследованы термический режим и сумма атмосферных осадков в г. Екатеринбурге на основе наблюдений за гидрометеорологическими параметрами за период с 1890 по 2020 г. Отражена корреляция данных характеристик с сезонными явлениями, которые выступают феноиндикаторами, свидетельствующими о наступлении определенного периода в годичном цикле природы. В ходе исследования выявлены разнонаправленные тренды и тенденции относительно сроков наступления фенологических явлений вегетационного периода, что имеет практическое значение для развития антропогенных комплексов.

Ключевые слова: климат, сезонная динамика, биота, Екатеринбург

THE MAIN TRENDS OF SEASONAL VEGETATION DYNAMICS IN YEKATERINBURG IN CONNECTION WITH CLIMATIC CHANGES

Yantser O.V.

Ural State Pedagogical University, Yekaterinburg, e-mail: ksenia_yantser@bk.ru

A study of the features of seasonal dynamics of plants in Yekaterinburg, acting as indicators of climate change, is presented. The study of the seasonal development of anthropogenic complexes is an important component of the characteristics of the dynamic states of modern landscapes. The materials of the study were long-term series of values of surface air temperatures and precipitation for the weather station, as well as data from the website of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information of the World Data Center. In the course of statistical processing of materials, the average long-term date of occurrence of the phenomenon in the city, variance, standard deviation (error) of the average value and the extreme dates of registration of the phenomenon were analyzed. The time series were estimated using a linear trend analysis characterizing climate changes with the selected resolution and representing the trend of the indicator in the form of a straight line. The thermal regime and the amount of atmospheric precipitation in Yekaterinburg are studied on the basis of observations of hydrometeorological parameters for the period 1890-2020. The correlation of these characteristics with seasonal phenomena is reflected, which serve as phenomenological indicators indicating the onset of a certain period in the annual cycle of nature. The study revealed multidirectional trends and trends regarding the timing of the onset of phenological phenomena of the growing season, which is of practical importance for the development of anthropogenic complexes.

Keywords: climate, seasonal dynamics, biota, Yekaterinburg

В связи с наблюдаемыми изменениями последнего столетия и их негативными последствиями выполнено множество исследований, посвященных изучению разномасштабных климатических процессов и оценкам сценариев изменения климата [1]. Одним из актуальных направлений исследований последних лет стали долгосрочные наблюдения по фенологическим программам и выявление реакции растений на колебания климата. Их результаты нередко индицируют наблюдаемые тенденции в современном потеплении климата. Одна-

ко тенденция более раннего наступления весенних фенологических явлений, фиксируемая вслед за повышением температуры среды, свойственна не всем видам и природным комплексам [2–4]. На урбанизированных территориях отклики биоты могут иметь свои тенденции и тренды.

Во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата (2014) отражен неоднородный характер глобального потепления в XX в., выделены периоды волн потеплений с 1910 по 1945 г., с 1976 г. по настоящее время и слабого по-

холодания – с 1946 по 1975 г. Одним из самых физиономичных элементов, реагирующих на изменения, служит растительность, которая быстро адаптируется к условиям и процессам, характеризуется наглядными параметрами и выполняет функцию индикатора динамических изменений [5–7]. Количественные фенологические показатели характеризуются непрерывностью и постепенностью изменяющихся параметров. Границы естественных сезонов и их подразделений определяются по ярким, хорошо заметным сезонным явлениям – феноиндикаторам, которые своим появлением свидетельствуют о наступлении определенного этапа в годичном цикле природы. Индикаторная сущность этих явлений сохраняется практически во всех природных зонах умеренного пояса.

Без исследования сезонного развития антропогенных комплексов характеристика динамических состояний современных ландшафтов будет неполной. Городская среда включает природные, архитектурно-планировочные, экологические, социально-культурные условия обитания жителей, она интенсивно преобразуется, неоднородна и дифференцирована. Несмотря на контролирование человеком вещественно-энергетических потоков, город не может быть изолирован от воздействия природных процессов. Городской ландшафт неотделим от природного, и их совместное рассмотрение присуще урбогеосистемной концепции, которая впервые была обоснована Н.В. Фирсовой [8]. Городские растительные сообщества отличаются от природных бедностью флористического состава. Ботанические сады, скверы, дендрарии, аллеи, лесные парки городских окраин, как и природные комплексы, характеризуются разными сезонными состояниями. Однако ход динамики процессов в урбанизированной среде отличается, поскольку кроме географических факторов на развитие растительности оказывают влияние застройка, утепляющее воздействие построек и коммуникаций, особые режимы ветра, влажности и освещенности. Целью исследования послужило изучение трендов сезонной динамики растений в г. Екатеринбурге как индикаторов климатических изменений.

Материалы и методы исследования

Согласно схеме физико-географического районирования, предложенной В.И. Прокаевым [7], Екатеринбург расположен в границах таежной области Исетско-Лялинской

провинции восточных предгорий Среднего Урала. Территория характеризуется высокой плотностью населения и антропогенной нагрузкой на природные комплексы.

Исходными материалами исследования послужили многолетние ряды значений температур приземного воздуха и количества атмосферных осадков для метеостанции, данные сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Мирового центра данных (ВНИИГ-МИ–МЦД). Для Екатеринбурга имеются 130-летние ряды наблюдений за гидрометеорологическими параметрами за период с 1890 по 2020 г. Все процедуры расчета и анализа были выполнены с использованием ПО Excel и Statistica 10.0. метеоданные. Для анализа изменения температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков для большинства метеорологических станций Урала в качестве современного был принят последний 30-летний ряд данных с 1991 по 2020 г. По рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) для оценки метеорологических показателей, характеризующих текущий или современный климат, используются базовые периоды продолжительностью в 30 лет. В настоящее время средние показатели базового периода 1961–1990 гг. называют климатической нормой.

В работе собраны данные по программам УОЛЕ, фенологической комиссии Всесоюзного географического общества, Русского географического общества, локализованные в Фенологическом центре БИН РАН им. В.Л. Комарова и собственных наблюдений автора. Фенологические наблюдения в Екатеринбурге ведутся с конца XIX в. Количество наблюдаемых объектов и явлений за период исследования варьировало в зависимости от программ и наличия наблюдателей. Так, в архивных документах чаще встречались записи по началу пыления ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench), осины (*Populus tremula* L.), цветения мать-и-мачехи (*Tussilago*), сокодвижения и зеленения березы (*Betula pubescens*, *Betula pendula* Roth.) и черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.), цветения черемухи обыкновенной, липы (*Tilia cordata*), цветения рябины (*Sorbus aucuparia*), шиповника (*Rosa canina*), брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.), иван-чая узколистного (*Chamaenerion*); созреванию плодов рябины обыкновенной, шиповника, черники (*Vaccinium myrtillus*), началу

пожелтения березы, массовому пожелтению листьев березы, осины и липы, хвои лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.), началу и концу массового листопада у берез, осины, липы. В разное время наблюдениями были охвачены северо-западные, северо-восточные, центральные и южные районы города и его окрестностей, поэтому для относительных периодов потепления и похолодания полнота представленности дат наступления ключевых явлений живой природы различна. Более кондиционные данные проанализированы по началу сокодвижения и зеленения березы, цветения мать-и-мачехи, черемухи обыкновенной, брусники, иван-чая узколистного, рябины, шиповника; по созреванию плодов черники, началу пожелтения, началу и концу массового листопада у березы.

Многолетние ряды фенологических наблюдений накоплены классическим методом, который по классификации В.А. Батманова называется первичным методом группы регистраторов срока [9]. Его суть заключается в регистрации даты наступления какого-либо явления на определенной территории. Затем материал был проанализирован на дефектность. Даты, отклонения которых составили более ± 3 суток от средних и явно аномальные, были исключены из базы данных. При статистической обработке материалов оценены следующие параметры: средняя многолетняя дата наступления явления по городу (X ср.), дисперсия (σ^2), стандартное отклонение (ошибка) среднего значения (σ) и крайние даты регистрации явления. При допустимом в фенологических исследованиях 5%-ном уровне значимости, оцениваемом по критерию Стьюдента ($P = 0,95$), принималось, что значения среднегодовых фенодат достоверны в интервале X ср. $\pm 2 \sigma$. Для оценки временных рядов применен линейный тренд-анализ, который позволяет характеризовать многолетние изменения климата с выбранным разрешением и представить тенденцию изменения показателя в виде прямой линии. Оценка тренда проводилась методом наименьших квадратов, 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 – год наблюдения). Значение коэффициента A дает среднюю скорость изменения рассматриваемой характеристики (сут/10 лет) на исследуемом отрезке времени [3]. Анализи-

ровался такой параметр линейного тренда, как коэффициент наклона линии тренда (КНЛТ), характеризующий тенденцию (среднюю скорость) изменений анализируемой величины (относительной аномалии) на заданном отрезке времени. Величиной коэффициента детерминации R^2 оценивался вклад линейного тренда в общую изменчивость показателя. Уровень статистической значимости тренда определялся с помощью t -критерия Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

В целом для территории Екатеринбурга наблюдается увеличение значений среднегодовой температуры приземного воздуха по сравнению с базовым периодом на $+0,8$ °С. Анализ временных изменений среднегодовой температуры воздуха, сглаженных по 11-летиям, показал, что за весь исследуемый период времени на изучаемой территории КНЛТ составляет $0,20$ – $0,29$ °С/10лет. КНЛТ в центральные месяцы сезонов года минимален в апреле – $0,20$ °С/10 лет. Наибольшие значения угловых коэффициентов наблюдаются осенью, достигая $0,36$ °С/10лет, при R^2 от $0,5$ до $0,7$. Повышение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха относительно значений базового периода произошло в основном за счет увеличения среднемесячных температур января, февраля и октября на $+0,6$... $+2,7$ °С, рост средних температур апреля, сентября и ноября в Екатеринбурге выражен слабо.

Наряду с термическим режимом важным метеорологическим показателем служит сумма атмосферных осадков, выпавших за определенный период времени. Для территории характерно увеличение годового количества атмосферных осадков на 3 – 9 % относительно климатической нормы. Положительные изменения количества осадков в среднем наблюдаются на протяжении декабря – мая, а с июня по ноябрь отмечается тенденция к уменьшению. Для установления современных параметров изменения суммы осадков данные были приведены к единому временному ряду 1981–2020 ($n = 40$) и осреднены 11-летним скользящим сглаживанием. Абсолютная величина угловых коэффициентов за весь период наблюдений составила $97,3$ мм/10 лет, коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,7$, в период с 1981 по 2020 г. наблюдается тенденция к увеличению суммы годовых осадков – $11,5$ мм/10 лет при $R^2 = 0,20$.

Тренды сезонных явлений в г. Екатеринбурге
по периодам потеплений и похолоданий в XX–XXI вв.

Явление	1910–1945 гг.		1946–1975 гг.		1976–2020 гг.	
	Уравнение	R ²	Уравнение	R ²	Уравнение	R ²
Начало сокодвижения у берез	$-0,0533x + 49,879$	0,01	–	–	$-0,1311x + 50,608$	0,23
Начало цветения мать-и-мачехи	–	–	$371,59x + 35717$	0,22	$-5,747x + 42385$	0,13
Начало зеленения берез	$-0,7765x + 88,827$	0,07	$-0,0135x + 74,889$	0,01	$-0,1194x + 75,059$	0,26
Начало цветения черемухи	$71,339x + 42490$	0,57	$-0,1853x + 80,181$	0,19	$-0,0793x + 74,439$	0,15
Начало цветения рябины	$-0,0963x + 79,599$	0,05	$-0,1147x + 78,969$	0,04	$0,0706x + 74,713$	0,04
Начало цветения шиповника	–	–	$-0,0856x + 99,062$	0,08	$-0,164x + 99,043$	0,17
Начало цветения брусники	$0,623x + 80,436$	0,27	–	–	–	–
Начало цветения иван-чая	$-0,2061x + 82,208$	0,03	–	–	–	–
Начало созревания черники	$-0,21x + 82,12$	0,03	–	–	–	–
Начало пожелтения берез	–	–	$-0,7803x + 183,92$	0,67	$-0,8242x + 153,92$	0,74
Начало заметного листопада у берез					$-3,431x + 42997$	0,12
Конец массового листопада у берез	–	–	–	–	$1,256x + 217,52$	0,50

По месяцам выявлены разнонаправленные изменения: значительное увеличение количества осадков наблюдается в марте до 59%, уменьшение характерно для октября. Положительные изменения количества осадков наблюдаются с декабря по май, а с июня по ноябрь отмечается тенденция к уменьшению.

Вегетационный период характеризуется наибольшим напряжением и временной изменчивостью процессов в биоте. Устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через +5 °C сопряжен с пробуждением органической природы. Он индицируется началом сокодвижения, цветением мать-и-мачехи и началом зеленения березы (таблица). Многолетняя динамика сроков наступления данных фенофаз зачастую дает возможность оценить тенденции изменения термических условий весны.

Однако для изучаемой территории по начальным фазам развития березы практически в отдельные временные отрезки относительных потеплений и похолодания выявлена лишь тенденция к более раннему наступлению при R² = 0,01–0,26 со средними скоростями изменений сроков -0,5–2,1 сут/10 лет. В разных районах города даты наступления зеленения березы отличаются: фронт явления наступает с юга и юго-востока на север и северо-запад. Начало цветения мать-и-мачехи в период похолодания имеет тенденцию к запаздыванию, кото-

рая сменяется тенденцией к более раннему наступлению феноявления в последующий период потепления с 1976 г. Зацветание черемухи тесно коррелирует с переходом среднесуточных температур через значения +10 и +12 °C и сигнализирует о разгаре весны. Коэффициент корреляции явления с переходными температурами +10 °C и +12 °C выше, чем у других весенних явлений, и составляет 0,93 и 0,86 соответственно. Разница между средними датами наступления зеленения березы и цветения черемухи составляет 5–7 суток, коэффициент корреляции между сроками явлений составляет 0,67. В период потепления в начале века черемуха в городе зацвела позже, положительный тренд обоснован статистически при R² = 0,57. С 1946 по 2020 г. выявлена тенденция к ее более раннему зацветанию, синхронная с климатическими изменениями. Средние скорости изменений сроков зацветания черемухи обыкновенной составляют от -1,5 до 3,0 сут/10 лет.

Переход температуры через +14 °C совпадает с окончанием весны, переходит к летним значениям в первой декаде июня и проявляется началом цветения шиповника и рябины. У шиповника наблюдается тенденция к более раннему наступлению цветения с 1946 по 2020 г., сроки начала цветения рябины в период относительного похолодания имеют тенденцию к опережению, а в период потепления с 1976 г. – сла-

бую тенденцию к запаздыванию. Термический рубеж в +17 °С обуславливает наступление наиболее типичных летних событий в органической природе на большей части изучаемой территории. Средняя многолетняя дата перехода – 24 июня. Зацветают иван-чай, брусника, к концу периода поспевают черника. Материалы по данным явлениям фрагментарны, более кондиционными служат данные за период с 1910 по 1945 г. В этот период относительного потепления цветение иван-чая и созревание ягод черники имело синхронную тенденцию к более раннему наступлению, а начало цветения брусники имеет устойчивый положительный тренд.

Начало осени физиономично отражают начало пожелтения листьев березы, начало заметного листопада у берез, а завершение вегетации – конец массового листопада. Начало пожелтения в течение последних 70 лет имеет отрицательный тренд и более раннее наступление, сигнализируя о сдвиге фенологической границы начала сезона. Конец массового листопада становится более растянут во времени и отражает тенденцию к более позднему завершению вегетации вида.

Заключение

В условиях г. Екатеринбурга в XX–XXI вв. выявлен рост температуры воздуха и тенденция к увеличению количества атмосферных осадков. Анализ накопленного фенологического материала позволил выявить разнонаправленные тренды и тенденции в сроках наступления фенологических явлений вегетационного периода. Тенденции к более раннему наступлению весны и осени, вероятно, стали реакцией древесных и кустарниковых видов – феноиндикаторов на общие климатические изменения. Исследование позволило сделать вывод о том, что фенология травянистых и кустарниковых видов в большей степени определяется микроклиматическими условиями произрастания. Сезонное развитие отдельных доминантных видов кустарников и деревьев также не всегда синхронно отражает общую направленность и быстрый отклик на изменение климатических условий города. Вероятно, это связано с особенностями городской застройки и определяемыми ей ветровым, соляричным режимом, воздействием водоемов в черте города и на его окраинах, а также с различными адаптационными

ми механизмами отдельных видов растений в условиях региональных климатических трансформаций.

Изучение сдвигов границ сезонов имеет практическое значение, поскольку сроки пыления, зацветания видов растений важно знать жителям любых местностей, подверженным аллергическим реакциям. Исследование трендов сезонной динамики растительности важно для организации озеленения и лесоустроительных работ в условиях городской среды, обустройство рекреационных зон определяются сроками сезонного развития растений.

Список литературы

1. Шерстюков Б.Г., Салугашвили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Труды ГУ ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 175. С. 43–51.
2. Минин А.А., Воскова А.А. Гомеостатические реакции деревьев на современные изменения климата: пространственно-фенологические аспекты // Онтогенез. 2014. Т. 45, № 3. С. 162–169.
3. Минин А.А., Ранькова Э.Я., Рыбина Е.Г., Сапельникова И.И. 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 мелколиственная (*Tilia cordata Mill.*) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016. Т. XXVIII, № 3. С. 5–22.
4. Минин А.А., Ранькова Э.Я., Буйволов Ю.А., Сапельникова И.И., Филатова Т.Д. Фенологические тренды в природе центральной части Русской равнины в условиях современного потепления // Жизнь Земли. 2018. Т. 40, № 2. С. 162–174.
5. Иванова Ю.Р., Скок Н.В. Сезонное развитие растительных сообществ в контексте изменяющихся погодных условий низкогорий Среднего Урала // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2019. Т. 30, № 1–2. С. 70–89. DOI: 10.21513/2686-7710-2019-1-70-89.
6. Ivanova U.R., Skok N.V., Yantser O.V. Spatial Heterogeneity In Phenological Development Of Prunus Padus L. In The Yekaterinburg City // Geography, environment, sustainability. 2019. Vol. 2 (12). P. 273–281.
7. Гурьевских О.Ю., Иванова Ю.Р., Скок Н.В., Юровских А.М., Янцер О.В. Картографирование фенологических и биоклиматических показателей в ландшафтных провинциях Урала // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108); URL: <https://research-journal.org/archive/6-108-2021-june/kartografirovanie-fitofenologicheskix-yavlenij-i-bioklimaticheskix-pokazatelej-v-landshaftnyx-provinciyax-urala> (дата обращения: 14.05.2023). DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.065.
8. Фирсова Н.В. Урбогеосистемы Центрально-Черноземного региона: ландшафтная структура, типология, оптимизация землепользования: автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Воронеж, 2012. 46 с.
9. Янцер О.В., Скок Н.В. Фенологические методы исследований в изучении динамики ландшафтов: общий обзор // Вестник Башкирского государственного университета. Серия «География». 2016. № 1. С. 91–100.