

СТАТЬЯ

УДК 551.583:502.05(470.324)
DOI 10.17513/use.38371

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА МИГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛАНДШАФТАХ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

^{1,2}Мокшина Н.Я., ²Пахомова О.А., ²Андропов Е.А., ³Межова Л.А., ¹Закусилов В.П.

¹ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, e-mail: moksnad@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет имени И.А. Бунина», Елец;

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», Воронеж

В статье рассмотрена структура и динамика проявления климатических процессов в пределах Воронежской области за разные исторические эпохи и за последние два десятилетия. Начало XXI в. сопровождается климатическими катаклизмами, которые оказали влияние на геохимический состав ландшафтов в рассматриваемом регионе. В этой связи целью статьи стало выявление влияния климатических изменений на миграционные процессы химических элементов в ландшафтах Воронежской области. В результате исследования были определены закономерности изменения некоторых климатических параметров за 1961–2020 гг. и их влияние на миграционные процессы в ландшафтах, которые наиболее активно могут проявляться в системе сельскохозяйственного природопользования. Отражена взаимосвязь климатических изменений и миграционных процессов, протекающих в ландшафте, определены пространственные и временные закономерности их проявления и вероятностные особенности их моделирования. Полученные результаты могут быть применены для оценки негативного влияния современных климатических флуктуаций на региональное агро- и лесопользование. Проведенный анализ климатических параметров выявил важность определения периодов по сходным условиям миграционного режима вещества и расчета для каждого из них количественных интегральных параметров. Полученные результаты позволяют определить тенденции уровней нарушений природной среды региона и заложить их в системе мероприятий по охране и преобразованию сельскохозяйственного природопользования области.

Ключевые слова: изменение климата, миграционные процессы, химические элементы, ландшафт, ландшафтно-геохимическая система

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE MIGRATION PROCESSES OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE LANDSCAPES OF THE VORONEZH REGION

^{1,2}Mokshina N.Ya., ²Pakhomova O.A., ²Andropov E.A., ³Mezhova L.A., ¹Zakusilov V.P.

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Voronezh, e-mail: moksnad@mail.ru;

²Bunin Yelets State University, Yelets;

³Voronezh State Pedagogical University, Voronezh

The article examines the structure and dynamics of the manifestation of climatic processes within the Voronezh region over different historical epochs and over the past two centuries. The beginning of the 21st century was accompanied by climatic cataclysms, which had an impact on the geochemical composition of landscapes in the region under consideration. In this regard, the purpose of the article is to identify the impact of climate change on the migration processes of chemical elements in the landscapes of the Voronezh region. As a result of the study, the patterns of changes in some climatic parameters for the period 1961–2020 and their impact on migration processes in landscapes, which can be most actively manifested in the system of agricultural environmental management, were determined. The interrelation of climatic changes and migration processes occurring in the landscape is reflected, spatial and temporal patterns of their manifestation and probabilistic features of their modeling are determined. The results obtained can be applied to assess the negative impact of modern climatic fluctuations on regional agro- and forest management. The analysis of climatic parameters revealed the importance of determining periods based on similar conditions of the migration regime of a substance and calculating quantitative integral parameters for each of them. The results obtained make it possible to identify trends in the levels of violations of the natural environment of the region and incorporate them into the system of measures for the protection and transformation of agricultural environmental management in the region.

Keywords: climate change, migration processes, chemical elements, landscape, landscape-geochemical system

Введение

В настоящее время в связи с глобальными климатическими изменениями особое внимание отводится оценке их проявления

на региональных уровнях. Зональные ландшафты являются открытыми геосистемами, формирующимися в результате массоэнергетических процессов с окружающей сре-

дой. Поэтому изменение климатических параметров отражается на структуре и динамике миграционных процессов в ландшафтах и их компонентах. Качественная и количественная характеристики региональных климатических ресурсов взаимосвязаны со сложными погодообразующими процессами в атмосфере и антропогенной трансформацией ландшафтов. Ландшафтно-климатический подход основан на комплексном анализе всей совокупности климатических и миграционных процессов, протекающих в ландшафтах. Выделяют ландшафтно-геохимические системы, которые характеризуются рядом однотипных физико-географических характеристик и имеют специфический набор факторов и закономерностей. Региональные ландшафты в условиях климатических катаклизмов могут менять скорость и направленность геохимических процессов. Анализ влияния изменения климатических условий на ландшафты позволит прогнозировать и моделировать структурные и динамические процессы в них.

Цель исследования – выявление влияния климатических изменений на миграционные процессы химических элементов в ландшафтах Воронежской области за 1961–2020 гг.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели использовались аналитический, статистический, геохимический методы. Проанализированы многолетние сведения Воронежского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, специализированные массивы месячных сумм осадков и среднемесячных температур на территории России по данным мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИГМИ МЦД) [1–3]. Анализируемый период: 1961–2020 гг. Для определения динамики барического поля (чередования циклональных и антициклональных типов) были рассмотрены синоптические карты и карты барической топографии с 1947 по 2023 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что на миграционные процессы химических элементов в региональном ландшафте оказывают влияние климатические факторы [4, 5]. Воронежская область расположена в лесостепной зоне, в умерен-

ном климатическом поясе, с умеренной степенью континентальности климата, для нее природой созданы условия, оптимальным образом сочетающие солнечную освещенность и, соответственно, нагрев подстилающей поверхности с ее увлажненностью, что способствует накоплению растительной биомассы, активности химических реакций, происходящих в элементах ландшафта, и в общем является основой развития ландшафта [5].

Установлено, что средний поток солнечной энергии на земную поверхность достигает 3300 ккал/м², а ее полезная мощность составляет 1792 ккал/м². Термический режим территории характеризуется температурой воздуха и почвы. Среднегодовая температура воздуха Воронежской области составляет 5,5 °С, усредненные ее значения для самого холодного месяца, января, составляют –7,5 °С, для самого теплого, июля, составляют +20,1 °С, средние параметры из абсолютных минимумов определены около –30 °С, а максимумов +35 °С. От температурного режима в общем зависит скорость химических реакций. Увеличение температуры воздуха на 10° приводит к возрастанию скорости миграционных процессов в ландшафте в 2 раза [6]. Начиная с XXI в. увеличивается количество жарких дней, температура возросла на 2,2°, уменьшилось почти в два раза количество морозных типов погоды. Толщина снежного покрова изменилась с 25–30 до 10–20 см, а также продолжительность залегания снежного покрова с 140 до 110 дней, и устойчивый снежный покров начал устанавливаться с середины декабря [7]. Динамика температурного режима в годовом ходе, полученная по данным [3] за 1961–2020 гг., представлена на рис. 1.

Из-за своего географического положения территория Воронежской области находится под воздействием воздушных масс Атлантики, Арктического бассейна, а также масс, сформировавшихся над территорией Центральной Азии. В конце лета – начале осени, нередко во второй половине зимы и весной преобладает западный тип атмосферной циркуляции, сопровождающийся обычно активной циклонической деятельностью, значительными осадками, положительными аномалиями температуры воздуха зимой и отрицательными летом [2, 3]. Циркуляционные условия атмосферы способствуют переносу или накоплению вещества в зональных типах ландшафтов.

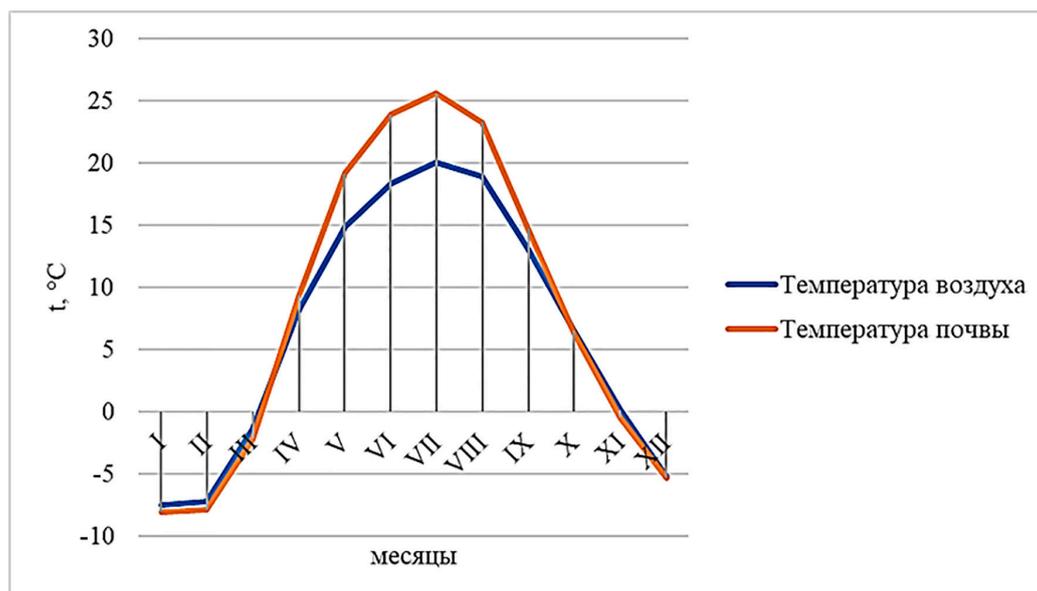


Рис. 1. Среднемесячный ход температур воздуха и почв (1961–2020 гг.) [3]

Для Воронежской области характерна, особенно в холодный период года, частая смена антициклональных и циклональных типов погоды [6, 8]. В результате анализа аэросиноптического материала за 1947–2023 гг. на территории области было установлено 9 циклональных и 7 антициклональных типов погоды. В основу данной классификации положено местоположение центров формирования данных барических образований, траектории их перемещения и их части (периферии), оказывающие влияние на территорию. Значительное количество циклональных типов погоды отмечено в осенне-зимний период, с наибольшей их повторяемостью в ноябре и декабре [9]. С данным типом связана облачная погода с высотой нижней границы облаков 300–500 м, а часто и ниже, около 100–200 м. Преобладание облачности нижнего яруса обуславливает выпадение осадков. Их выпадение способствует очищению атмосферы от примесей, содержащихся в ней. В конечном итоге происходит перемещение примесей, содержащихся в атмосфере, и накопление в компонентах ландшафта.

Антициклональный тип погоды чаще отмечается в теплое полугодие. Данному типу свойственны малооблачное (безоблачное) состояние неба, высокие температуры летом и низкие зимой. Установление сухой жаркой погоды, влияющей на увеличение скорости химических реакций в ландшафте. В осенне-зимний период, особенно

в утренние часы, нередко образование низкой (200–300 м) подынверсионной облачности и туманов; осадков при этом практически не выпадает.

В начале XXI в. количество аномальных явлений погодных условий возрастает. Среднее количество осадков до 1960-х гг. колебалось в пределах 389–548 мм в год. По последним данным (период осреднения 1961–2020 гг.) [2], среднегодовое количество осадков по Воронежской области составляет 579 мм в год. Максимальное их количество выпадает в июне-июле, минимальное – в холодное полугодие, с минимумом в марте (табл. 1). Максимум поступления химических веществ на ландшафт области приходится также на период максимального выпадения осадков, при этом существенную роль оказывает характер атмосферных осадков, скорость и продолжительность их выпадения [9]. Интенсивность ливней может достигать 1,16 до 2,76 мм/мин – это приводит к значительному поступлению минеральных и органических веществ на почвенный покров [6].

Пространственный перенос атмосферных аэрозолей осуществляется ветром. Годовая роза основных направлений ветра с обозначением их повторяемостей на территории Воронежской области, построенная за 1961–2020 гг. по данным [1], показана на рис. 2. Распределение средних скоростей ветра по месяцам и за год приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение среднего количества осадков и средних скоростей ветра в течение года

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Количество осадков (мм)	43	36	34	41	45	67	64	53	53	46	47	49	579
Скорость ветра, м/с	3,3	3,4	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2	2,2	2,4	2,9	3,1	3,4	2,8

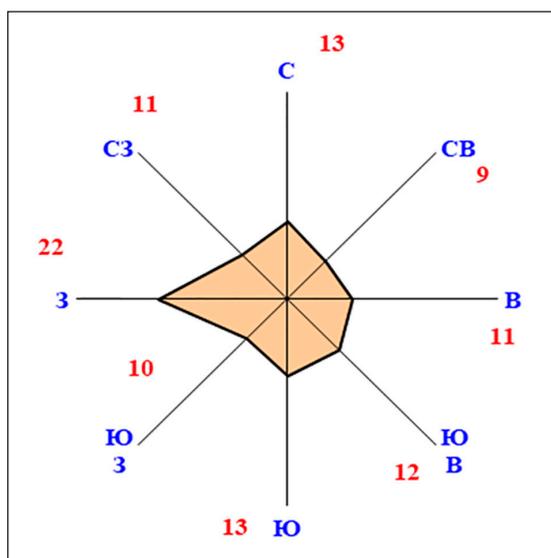


Рис. 2. Годовая роза ветров (1961–2020 гг.) [1]

Наибольшую повторяемость в году имеют ветры западного направления (21,5%). Меньше всего наблюдаются ветры северо-восточного направления (9,0%). Среднегодовая скорость ветра составляет 2,8 м/с, при этом в зимнее и весеннее время скорость несколько больше (3,3–3,4 м/с), в летнее – меньше (2,2 м/с) [1]. Продолжительность ветра с большими скоростями в теплый период года обычно меньше, чем в холодный, однако при ливнях и грозах наблюдается резкое шквалистое, но кратковременное усиление ветра. Ветровой перенос усиливает саморегулирующие свойства атмосферы. Количество дней со штилем и скоростью ветра до 1–2 м/с достигает 32%, и характерны они для летнего периода.

По данным ветрового переноса можно рассчитать энергетическую результирующую ветра [10]. Энергетическая результирующая ветра характеризует энергию, которую можно получить от воздушной массы, движущейся над территорией, с одного квадратного километра. Этот показатель позволяет определить энергообмен воздушной среды с окружающей территорией. Для региональных ландшафтов основными источниками

загрязнения атмосферы являются урбанизированные территории, энергетическая результирующая ветра позволит определить массу выноса ингредиентов по воздуху от промышленных источников загрязнения.

Для определения качественной и количественной характеристики миграционного потока необходимы сведения о химическом составе снеговых и дождевых вод. Для Воронежской области средняя минерализация атмосферных осадков невысокая и составляет 31,2 мг/л. Наибольшие колебания в снеговых и дождевых водах наблюдаются в содержании ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} . На территорию региона может поступить более 13,00 т/км² солей [5, 6], что доказывает роль климатических факторов на формирование геохимического фона региональных ландшафтов. На территории области климатические показатели в пространственном отношении изменяются незначительно. Так, разница в температуре при движении с запада на восток и с севера на юг не превышает 2–3°, а величины выпадающих осадков колеблются в пределах 20–50 мм [2, 3]. Отмечено нарастание частоты аномальных климатических условий, которые негативно влияют на сельскохозяйственное природопользование. По годам в зависимости от их климатических особенностей наблюдаются колебания урожайности сельскохозяйственных культур, которая тесно взаимосвязана и с почвенными ресурсами региона. Неоднородное почвенное пространство во взаимосвязи с климатическими процессами меняет свойства миграционных потоков в ландшафте. В зональных ландшафтах исторически формируются массоэнергетические процессы, и их функциональный режим зависит от особенностей взаимосвязи всех компонентов природы.

Динамика многолетних климатических показателей существенно изменяет характер миграционных процессов вещества в ландшафте. Известны четыре эпохи изменения климата [11] (рис. 3) и три циркуляционные эпохи по преобладающему переносу воздушных масс, которые в конечном счете приводят к изменению условий миграционного режима вещества в ландшафте (табл. 2) [12, 13].

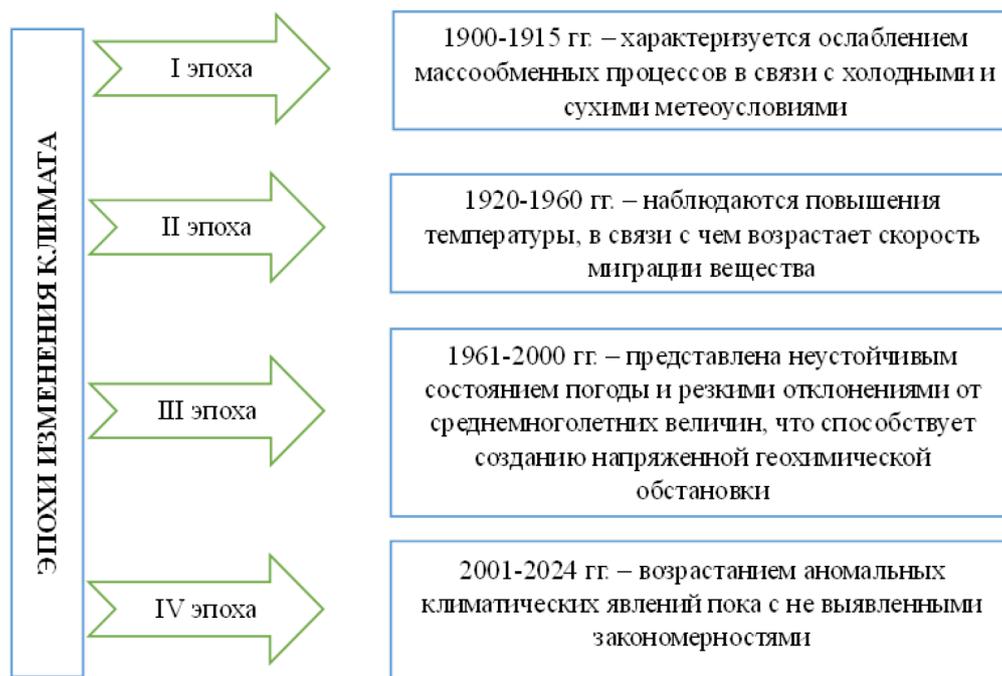


Рис. 3. Эпохи изменения климата на территории России (1900–2024) [11]

Таблица 2

Многолетние циклы преобладающего циркуляционного режима (1899–2014 гг.) [12]

Эпохи	I	II	III
Годы	1899–1915	1916–1956	1957–2014
Особенности циркуляционных процессов	Преобладание блокирующих процессов	Преобладание зональной циркуляции	Преобладание выходов циклонов из низких широт в высокие

Эпоху после 2014 г. до настоящего времени можно характеризовать как эпоху с преобладанием высокочастотных колебаний циркуляционных процессов, с преобладанием межширотного обмена.

Рассмотрение изменения основных химических параметров в многолетнем цикле позволяет классифицировать их по направленности воздействия на миграционные процессы вещества, потому что изменения климата находят отражение в водно-тепловом и биогенном режиме ландшафтов. Причем следует различать прямое и косвенное влияние климата на геохимическую миграцию вещества. Интенсивность миграционных процессов тесно взаимосвязана не только с пространственной, но и с временной дифференциацией климата. Характер миграции вещества изменяется в зависимости от многолетних и сезонных флуктуаций климатических параметров.

Проведен историко-географический анализ более чем векового цикла природных условий, связанных с солнечной активностью, которая отражается на сочетании теплых и влажных эпох [14]. В табл. 3 приведены сочетания лет (периоды) по сходным метеоусловиям с 1836 по 1956 г. с характерными для них режимами температуры и осадков, а также особенностями миграционных процессов химических веществ.

По данным Всемирной метеорологической организации, начиная с 1960 г. наблюдается повышение температуры, а 2015–2020 гг. были самыми теплыми. При этом можно выделить волны похолодания –1970–1990 и 2000–2005 гг. Отмечена тенденция увеличения количества осадков на 5–10 мм в год, снижается мощность снежного покрова, продолжительность его залегания, усиливается циклональный режим атмосферы.

Таблица 3

Историко-географический анализ природных условий (1836–1956 гг.) [14]

Годы	Температурный режим	Режим осадков	Особенности миграционных процессов химических веществ
1836–1852	не показательно, близко к норме	выпадение большего количества осадков	промывной режим и активизация миграционных процессов
1853–1877	не показательно, близко к норме	среднеувлажненный период весной и летом	оптимизация миграционных процессов
1878–1886	не показательно, близко к норме	обильные осадками зимой и летом	возрастание выноса вещества
1887–1898	не показательно, близко к норме	недостаток осадков весной и летом	замедление вертикального массообмена, увеличение скорости химических реакций
1899–1914	не показательно, близко к норме	недостаточное увлажнение в сочетании с обильными осадками	взаимодействие процессов миграции и аккумуляция вещества
1915–1928	не показательно, близко к норме	преобладают обильные летние осадки в сочетании с короткими засухами	возрастание миграционных процессов в летний период в сочетании с застойными явлениями и резким всплеском скоростей химических реакций
1929–1935	отдельные суровые зимы (температуры значительно ниже нормы)	преобладает влажное лето и отдельные суровые зимы	создаются оптимальные условия для миграционных процессов летом и нарушение миграционного цикла зимой
1936–1939	жаркое лето (температуры значительно ниже нормы)	засушливое лето (дефицит осадков)	увеличение скорости миграции вещества
1940–1945	холодные годы (температуры ниже нормы)	влажные годы (количество осадков выше нормы)	процессы вертикального выноса вещества с резким уменьшением скоростей химических реакций
1946–1956	достаточно частые оттепели в зимний период	годы с достаточным количеством осадков в зимний период и летними засухами	изменение миграции вещества по сезонам года и увеличение скорости химических реакций в летний период

На основании проведенного анализа, по мнению авторов, данные примеры иллюстрируют диапазон колебаний миграционных процессов во многолетнем цикле, показывают их разнонаправленность. Это позволяет вычленять сезонную и временную динамику миграции. Многолетние изменения солнечной активности находят отражение в сочетании климатических показателей и являются энергетическими факторами миграционных процессов. Колебания осадков теплого и холодного периода происходят не синхронно. В периоды ослабления западного переноса черты континентальности климата увеличиваются, при этом температуры июля возрастают, а температуры января снижаются.

Заключение

Таким образом, начиная с 1960 г. наблюдается повышение температуры и отмечается общая тенденция к увеличению увлажнения, при этом 1960-е и 1980-е гг. характе-

ризовались относительной засушливостью, 1970-е и 1990-е гг. – увеличением увлажненности. В начале XXI в. отмечено повышение температуры на 1,2–1,4 °C по сравнению с XX в. Следующее десятилетие, до 2035 г., также будет характеризоваться тенденцией к увеличению количества осадков и возрастанием среднегодовой температуры.

Показатели климата региона прослеживаются во всех составляющих зональной ландшафтной геосистемы. Качественный анализ климатических показателей выявил возможность определения периодов по сходным условиям миграционного режима вещества и расчета для каждого из них количественных интегральных параметров. Это позволит более достоверно обосновать геоэкологические условия почвенного покрова, ландшафтов отдельных регионов, с учетом известной цикличности атмосферных процессов, связанных с периодичностью солнечной активности, а также с изменением антропогенных условий, об-

условленных общим ростом народонаселения земного шара и активной индустриализацией человеческого общества.

Полученные результаты позволяют определить тенденции уровней нарушений природной среды региона и заложить их в системе мероприятий по охране и преобразованию сельскохозяйственного природопользования области. Климатические условия лесостепной и степной зон на рубеже XXI в. характеризуются частой сменой погодных условий и высокой вероятностью наступления засушливых периодов, которые необходимо учитывать для оптимизации сельскохозяйственной деятельности. Сопоставление статистических данных урожая сельскохозяйственных культур и климатических параметров с миграционными процессами в почве даст возможность выявить протекающие в них негативные процессы. Материалы исследования можно использовать при оценке функционального режима региональных агро- и лесных геосистем и положить в основу усовершенствования его мониторинга. В зависимости от конкретных задач используются различные логические цепочки периодичности ритмов температур, осадков, циркуляционных процессов. Пульсационно-ритмические механизмы природных процессов определяют скачкообразные изменения направленности и темпов природных процессов и импульсы дальнейшего развития.

Список литературы

1. Специализированные массивы // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 06.08.2024).
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. 2014. [Электронный ресурс] URL: <http://meteo.ru/data/total-precipitation/> (дата обращения: 06.08.2024).
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России // Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621485. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/temperature/> (дата обращения: 06.08.2024).
4. Кочуров Б.И., Капитальчук И.П., Кузнецов И.Е., Закусилов В.П., Гоцев Д.В. Анализ фоновых метеорологических полей в целях геоэкологического изучения территории // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2021. Т. 7, № 2. С. 279–290. URL: <https://sn-geography.cfuv.ru/> (дата обращения: 06.08.2024).
5. Чернятина Г.Н., Межова Л.А., Луговской А.М. Оценка миграционных и депонирующих процессов природных сред южных районов воронежской области // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22272> (дата обращения: 20.01.2025).
6. Кожанов А.А. Геоэкологическая оценка влияния топливно-энергетической системы Воронежской области на окружающую среду: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Калуга, 2006. 23 с.
7. Дмитриева В.А., Сушков А.И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 2. С. 56–63. URL: <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/11302/1> 1408 (дата обращения: 20.01.2025). DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63.
8. Гарькуша Д.Н., Великохатская В.В., Красюк А.С. Многолетние изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков в городе Воронеж // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 9 (147). URL: <https://research-journal.org/archive/9-147-2024-september/10.60797/IRJ.2024.147.91> (дата обращения: 12.11.2024). DOI: 10.60797/IRJ.2024.147.91.
9. Луговской А.М. Мониторинг природной среды методом индикации сосны обыкновенной в условиях техногенеза Русской равнины: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Волгоград, 2004. 37 с.
10. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 6. С. 20–28. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/591> (дата обращения: 20.01.2025).
11. Кононова Н.К., Хмелевская Л.В. Многолетние колебания дат начала и продолжительности циркуляционных сезонов внетропических широт Северного полушария // Известия РАН. Сер. География. 2011. № 3. С. 43–62. URL: <https://atmospheric-circulation.ru/wpcontent/uploads/2011/12/Kononova.pdf> (дата обращения: 20.01.2025).
12. Кононова Н.К. Флуктуации глобальной циркуляции атмосферы в XX–XXI вв. // Сложные системы. 2016. № 1 (18). С. 22–37. URL: <https://thecomplexsystems.ru/archive> (дата обращения: 20.01.2025).
13. Задорожная Т.Н., Закусилов В.П., Акимов Л.М. Особенности влияния внешних факторов на формирование циркуляционного режима Северного полушария // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 9. С. 40–48. URL: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=264> (дата обращения: 23.01.2025).
14. Скрыбин М.П. Дубовые леса и вековые циклы в природных условиях // Восстановление и повышение производительности дубрав лесостепи: научные записки Воронежского Лесотехнического ин-та. Воронеж, 1960. Т. 20. С. 211–217.