

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**CLIMATIC RESOURCES****КЛИМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

УДК 551.583

В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: m.a.hitrykau@gmail.com***ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УВЛАЖНЕНИЯ
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В 1955–2019 гг.**

Аннотация. На основе среднесуточных данных по количеству осадков и приземной температуре воздуха, а также месячным значениям числа ясных дней и среднего балла общей облачности за период 1961–2019 гг. оценены изменения влажностного режима территории Беларуси и изменения засушливости климата. Рассматриваются пространственно-временные изменения количества осадков за год и отдельные сезоны, экстремальности выпадения осадков, степени покрытия облаками и гидротермического коэффициента по Г. Т. Селянину (ГТК). С помощью метода спектрального сингулярного анализа исследована временная структура временных рядов значений количества осадков, облачности и ГТК за период 1955–2019 гг. Установлено, что в условиях современного потепления климата (1991–2019 гг.) среднее количество осадков на территории Беларуси выросло до 650 мм, что на 2–2,5 % выше, чем в предшествующий период (1961–1990 гг.). Наибольший прирост количества осадков отмечался в зимне-весенний период (прирост 8–10 %), а летом происходило сокращение количества осадков. Темпы прироста количества осадков в 5–6 раз ниже темпов повышения средней температуры. Экстремальность выпадения осадков выросла; наибольший прирост наблюдается в 1991–2019 гг. для числа случаев сильных ливней (числа дней с осадками более 10 и 20 мм/день). Период 1991–2019 гг. характеризовался повышением степени покрытия облаками, которое наиболее наглядно иллюстрируется уменьшением числа ясных дней. Изменения значений ГТК показывают, что усиление засушливости климата наблюдается на всей территории Беларуси. Среднее значение ГТК для периода 1991–2019 гг. составило 1,33, что на 0,11 ниже, чем для предыдущего периода. В настоящее время для трети территории Беларуси, преимущественно Полесья и прилегающих регионов, характерно недостаточное увлажнение (средние значения ГТК ниже 1,3).

Ключевые слова: изменения климата, осадки, общая облачность, число ясных дней, ГТК по Г. Т. Селянину, пространственное распределение, засушливость климата

V. F. Loginov, M. A. Khitrykau*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: m.a.hitrykau@gmail.com***CHANGES IN HUMIDIFICATION CHARACTERISTICS ON THE TERRITORY OF BELARUS IN 1955–2019**

Abstract. This paper investigates the changes in humidification characteristics and aridity of climate in Belarus during the period from 1961 to 2019 on the base of average daily values of rainfall, air temperature and monthly values of number of clear days and average cloudiness. The parameters analyzed included yearly and seasonal precipitation, extremity of precipitation, total cloud cover and hydrothermic coefficient by G. T. Selyaninov (HTC). Temporal structure of precipitation, cloud cover and HTC data series for 1955–2019 was analyzed using Spectral Singular Analysis (SSA). Average yearly precipitation amount in Belarus in 1991–2019 increased to 650 mm, which is 2–2.5 % higher than average amount for 1961–1990. The most significant increase in precipitation amount has been observed in winter and spring months (8–10 % in average); in summer total precipitation amount has decreased. Precipitation growth rate appeared to be 5–6 times lower than temperature growth rate. Extremity of precipitation has increased; most significant increase has been observed in number of heavy rains in 1991–2019 (total precipitation amount of 10 and 20 mm/day). Total cloud cover on the territory of Belarus has increased in 1991–2019. Changes in number of clear days illustrate this better than actual characteristics of cloudiness. Changes in HTC values show that aridity of climate increases in all regions of Belarus. Average HTC value for the territory of Belarus in 1991–2019 is 1.33, which is lower than average for 1961–1990 by 0.11. By this time, about a third of the country, predominantly Polesie and surrounding regions, has insufficient water supply (average HTC values are below 1.3).

Keywords: climate change, precipitation, total cloud cover, number of clear days, HTC by G. T. Selyaninov, spatial distribution, aridity of climate

У. Ф. Логінаў, М. А. Хітрыкаў*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: m.a.hitrykau@gmail.com***ЗМЯНЕННЕ ХАРАКТАРЫСТЫК УВІЛЬГАТНЕННЯ НА ТЭРЫТОРЫІ БЕЛАРУСІ ў 1955–2019 гг.**

Анотацыя. На падставе сярэднясутачных дадзеных па колькасці ападкаў і прыземнай тэмпературы паветра, а таксама месячным значэнням колькасці ясных дзён і сярэдняга бала агульнай воблачнасці за перыяд 1961–2019 гг. ацэнены змяненні рэжыму ўвільгатнення тэрыторыі Беларусі і засушлівасці клімату. Разгледжваюцца прасторава-

часавыя змяненні колькасці ападкаў за год і асобныя сезоны, экстрэмальнасць выпадзення ападкаў, ступені пакрыцця аблакамі і гідратэрмічнага каэфіцыенту па Г. Т. Селянінаву (ГТК). З дапамогай метаду сігулярнага спектральнага аналізу даследавана структура часавых радоў значэнняў колькасці ападкаў, воблачнасці і ГТК за перыяд 1955–2019 гг. Выяўлена, што ва ўмовах сучаснага пацяплення клімату (1991–2019 гг.) сярэдняя колькасць ападкаў у Беларусі вырасла да 650 мм, што на 2–2,5 % вышэй, чым у папярэдні перыяд (1961–1990 гг.). Найбольшы прырост колькасці ападкаў быў адзначаны ў зімне-вясенні перыяд (прырост 8–10 %), а летам адбывалася змяншэнне колькасці ападкаў. Тэмпы прыросту колькасці ападкаў былі ў 5–6 разоў меншыя за тэмпы павышэння сярэдняй тэмпературы. Экстрэмальнасць выпадзення ападкаў павялічылася; найбольшы прырост быў уласцівы колькасці выпадкаў моцных ліўняў у 1991–2019 гг. (колькасці дзён з ападкамі больш за 10 і 20 мм/дзень). Перыяд 1991–2019 гг. таксама характарызаваўся павялічваннем ступені пакрыцця аблакамі, якое найбольш выразна ілюструе змяншэнне колькасці ясных дзён. Змяненні значэнняў ГТК паказваюць, што ўзмацненне засушлівасці клімату назіраецца на ўсёй тэрыторыі Беларусі. Сярэдняе значэнне ГТК за перыяд 1991–2019 гг. склала 1,33, што на 0,11 менш, чым для папярэдняга перыяду. На сёняшні дзень каля 1/3 тэрыторыі Беларусі, пераважна Палессе і сумежныя рэгіёны, характарызуецца недастатковым увільгатненнем (сярэднія значэнні ГТК менш за 1,3).

Ключавыя словы: змены клімату, ападкаў, агульная воблачнасць, колькасць ясных дзён, ГТК па Г. Т. Селянінаву, прасторавае размеркаванне, засушлівасць клімату

Введение. Положительный эффект современных изменений климата проявляется прежде всего в повышении теплообеспеченности территории страны. По сравнению с предыдущим (1961–1990 гг.) в последнее тридцатилетие (1991–2019 гг.) средние значения сумм активных температур выше 10 °C выросли на 350–450 °C [1], что соответствует их повышению на 15–18 %. В течение периода 1991–2019 гг. среднегодовые значения температуры в абсолютном большинстве случаев превышали норму на 1–1,5 °C и более [2]. Повышение теплообеспеченности благоприятно сказывается на развитии сельского хозяйства, позволяет расширить видовой и сортовой состав выращиваемых культур (в частности, ввести более урожайные поздние сорта), способствует сокращению отопительного сезона и расходов топлива и тем самым облегчает нагрузку на коммунальное хозяйство. Отрицательный аспект современных изменений климата связан с тем, что одновременно с ростом температур в Беларуси растет засушливость климата. Среднее количество осадков за период 1991–2019 гг. превышает аналогичное значение за период 1961–1990 гг., однако относительная величина прироста незначительна: 2–2,5 %. Темпы прироста температуры оказались несоразмерно больше темпов прироста количества осадков. В результате общие влагозапасы территории Беларуси сокращаются.

Данные последних исследований показывают, что усиление засушливости становится главной проблемой изменений климата на территории Беларуси. Повторяемость и продолжительность засушливых периодов за время современного потепления климата растет [3], что в совокупности с повышением средних температур приближает климат Беларуси к климату лесостепей и степей [4]. Изменяется также и режим выпадения осадков: число дней с ливнями и само количество ливневых осадков в период современного потепления климата увеличилось [1, 5, 6]. Главный негативный аспект подобных изменений связан с тем, что ливневые осадки не способствуют пополнению запасов почвенной влаги, так как большая часть выпавшей влаги расходуется на поверхностный сток. Наиболее наглядной характеристикой совокупных влагозапасов территории является параметр TWS (Terrestrial Water Storage), который рассчитывается на основании данных спутниковых наблюдений за изменением гравитационного поля Земли в рамках проекта GRACE [7]. Он включает в себя информацию о грунтовой, поверхностной и атмосферной влаге; наблюдения охватывают период с 2002 г. Согласно данным наблюдений, для территории Беларуси характерна отрицательная тенденция изменений значений TWS, которая существенно усилилась в 2010-е годы [8]. Прогноз изменения климата Беларуси в ближайшем будущем предусматривает дальнейшее усиление засушливости [9, 10]. Наибольшую проблему это представляет для сельского хозяйства страны. Данные наблюдений [8] показывают, что на обрабатываемых землях Беларуси негативные эффекты изменений климата в виде усиления засушливости преобладают над положительными эффектами в форме повышения теплообеспеченности, что ставит под вопрос дальнейшее успешное развитие сельского хозяйства.

В этой связи анализ пространственно-временных изменений характеристик увлажнения территории является важнейшей задачей для развития климатозависимых отраслей экономики. В качестве показателей увлажнения были рассмотрены среднегодовое количество осадков,

сезонные осадки, а также осадки за теплый, и холодный периоды года, число дней с осадками более 5, 10 и 20 мм/день и количество осадков в дни зимних оттепелей. В качестве интегрального показателя степени увлажненности территории использовался гидротермический коэффициент по Г. Т. Селянинову (ГТК) [11]. Кроме того, были проанализированы изменения облачности и числа ясных дней за весь год и теплый, и холодный периоды, которые позволяют получить более полное представление об изменении атмосферной циркуляции и режима выпадения осадков. Оценивались изменения средних значений параметров на метеорологических станциях, а также особенности пространственных изменений («сдвигов») изогий.

Методы и использованные данные. Информационной базой для исследования стали данные суточного разрешения по количеству осадков и приземной температуре, а также данные месячного разрешения по величине облачности и числу ясных дней на 48 метеорологических станциях Беларуси за период с 1961 по 2019 г., предоставленные Республиканским гидрометцентром. Для анализа использовались данные с продолжительными рядами наблюдений. Станции Мстиславль, Дрогичин, Любань, Щучин, Толочин, Колодищи и Самохваловичи были исключены из анализа в силу малой продолжительности периода наблюдений.

Особенности временной структуры изменений количества осадков, облачности и ГТК были изучены с помощью метода сингулярного спектрального анализа (Singular Spectrum Analysis), также известного как «метод гусеницы» [12]. Он основан на получении выборки для скользящих отрезков заданной длины из исходного временного ряда. Этот метод позволяет разложить исходный временной ряд на элементарные составляющие и определить цикличность их изменений. В данной работе с помощью метода сингулярного спектрального анализа исследованы ряды средних значений годового количества осадков, количества осадков за холодный период года, среднегодовой облачности и ГТК по территории Беларуси за период 1955–2019 гг. Количество осадков в холодный период года рассматривалось отдельно, так как оно теснее всего связано с изменениями величины облачности и интенсивностью циклогенеза в Северной Атлантике [3, 4]. Для реализации анализа на основе «метода гусеницы» использовались средства системы математического моделирования *MatLab* [13] и языка программирования *Python* [14, 15]. Они позволяют выделить 9 и 3 элементарных составляющих временных рядов соответственно.

С целью оценки масштабов климатических изменений за весь период современного потепления в настоящей работе в качестве основных сравнительных периодов рассматриваются период 1961–1990 гг., который раньше использовался для вычисления значений климатических норм [16], и период 1991–2019 гг., являющийся репрезентативным для характеристики современного потепления климата.

Результаты и их обсуждение

Количество осадков. Характерной чертой пространственного распределения осадков является его высокая неоднородность, что обусловлено влиянием большого числа естественных и антропогенных факторов: атмосферной циркуляции, особенности подстилающей поверхности, степень урбанизации территории и др. В связи с этим распределение количества осадков характеризуется большим числом локальных максимумов и минимумов (рис. 1). Это наиболее выразительно проявляется в характере распределения годового количества осадков (рис. 1, а, б).

В течение периода, предшествовавшего современному потеплению климата, наименьшее среднегодовое количество осадков отмечается на станции Брагин, а наибольшее – на станции Лынтупы. Разность между ними превышает 240 мм. Среднее по территории страны количество осадков составляет 637 мм; его величина увеличивается при продвижении с юго-востока на северо-запад. На отдельных станциях, например в Житковичах, формируются локальные максимумы осадков (рис. 1, а), но в целом зависимость от степени континентальности климата прослеживается достаточно четко. В течение периода современного потепления климата среднее по республике годовое количество осадков увеличивается до 652 мм (прирост 15 мм).

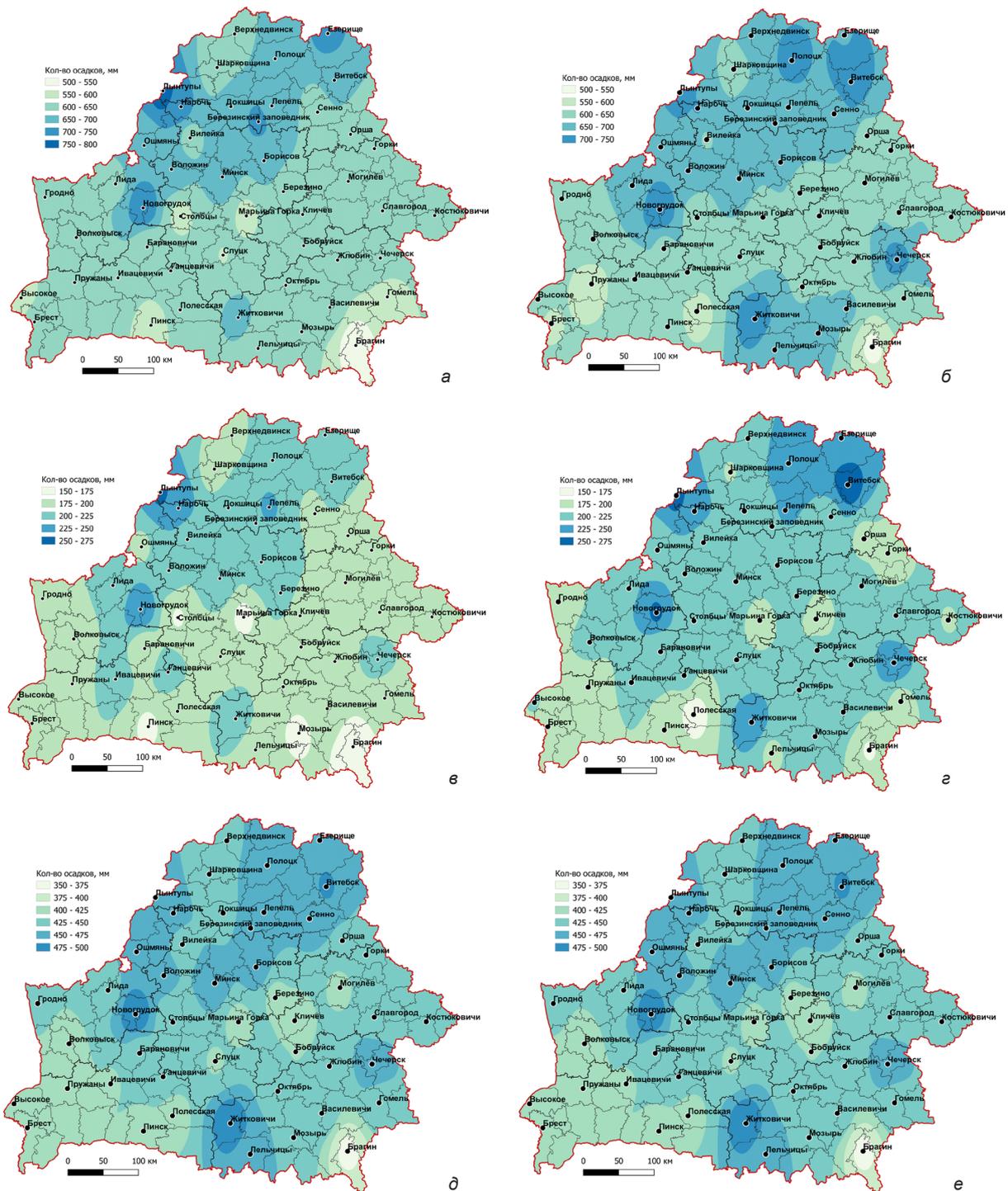


Рис. 1. Среднее количество осадков за год (а, б), холодный (в, г) и теплый (д, е) периоды года в периоды 1961–1990 гг. (а, в, д) и 1991–2019 гг. (б, г, е)

Брагин остается станцией с наименьшим среднегодовым количеством осадков, а станцией с наибольшим среднегодовым количеством осадков становится Новогрудок. Разность между ними составляет 200 мм. При этом на многих других станциях юго-восточной Беларуси годовое количество осадков существенно возрастает и становится сопоставимым с северо-западной Беларусью. Поступление атмосферной влаги на юго-западную и западную части Беларуси сокращается. Подобные перемены связаны с изменением путей циклонов в период современного

потепления климата, а также повышением повторяемости и продолжительности засушливых периодов, связанных с блокирующими антициклонами [3, 4, 17]. Кроме того, в теплый период года важную роль сыграли изменения местных факторов осадкообразования: испарение и конвекция [3, 17]. Высокая пятнистость пространственного распределения величины годового количества осадков не позволяет сделать системных выводов о «сдвиге» изогий на территории Беларуси.

Пространственное распределение количества осадков за холодный период года отличается меньшей пространственной неоднородностью, что объясняется большими масштабами циклогенеза в это время. На протяжении всего рассматриваемого периода (1961–2019 гг.) разность между максимальным и минимальным среднегодовым количеством осадков сохраняется на уровне 100 мм, при этом среднее количество осадков возрастает от 199 мм в 1961–1990 гг. до 210 мм в 1991–2019 гг. Прирост количества осадков хорошо просматривается на картах (рис. 1, в, з): в период до начала современного потепления климата изогия значений >200 мм охватывала около 1/3 всей территории Беларуси, а в настоящее время она охватывает почти 3/4 территории страны. Это свидетельствует о ее сдвиге на 200–250 км на юго-восток. Увеличение количества осадков в холодный период года связано в первую очередь с усилением циклонической активности в период современного потепления климата [3, 4].

В теплый период года важным фактором, определяющим общее количество осадков, являются местные процессы осадкообразования. В связи с этим пространственное распределение осадков в этот период отличается высокой пространственной неоднородностью. Размер и положение локальных экстремумов менялись на протяжении рассматриваемого периода: период 1961–1990 гг. характеризовался большим числом мелких локальных экстремумов и расположением области максимальных значений осадков на севере и северо-западе Беларуси, где в рельефе преобладают возвышенности. Области минимальных значений осадков были приурочены к низменностям юга Беларуси. В 1991–2019 гг. число локальных экстремумов осадков сократилось, однако их пространственные масштабы увеличились. Сформировались три больших максимума осадков на северо-западе, северо-востоке и юге (окрестности станции Житковичи) Беларуси. Наибольшая область минимальных значений осадков образовалась на юго-западе страны (рис. 1, д, е). Прирост количества осадков за 1991–2019 гг. относительно периода 1961–1991 гг. составил всего 4 мм. При этом важно отметить, что этот прирост обеспечивался за счет повышения количества осадков весной и осенью. Повторяемость и продолжительность засушливых периодов с конца 1990-х до начала 2010-х годов оказались наиболее существенными в летний период.

Главной особенностью пространственного распределения количества осадков за зимний период является относительно низкая пространственная неоднородность. Число локальных экстремумов осадков невелико и их площадь очень мала. Причина этого заключается в том, что при сокращении рассматриваемого периода года сокращается и количество факторов, влияющих на количество осадков. Разность между максимальным и минимальным количеством осадков за сезон на территории страны достаточно велика и составляет 70 мм (в период 1991–2019 гг. возрастает до 75 мм), что связано с неустойчивостью погоды в зимний период в Беларуси, усилившейся в период современного потепления климата. Среднее количество осадков в зимний период в 1991–2019 гг. возросло на 9 мм относительно периода 1961–1990 гг. и составило 125 мм. В период до начала современного потепления климата области с количеством осадков более 125 мм представляли собой отдельные изолированные экстремумы, сосредоточенные преимущественно в северо-западной части страны. В 1991–2019 гг. изогия >125 мм продвинулась на 100–150 км на юг и юго-восток, образовав сплошную зону на северо-западе страны и крупные отдельные экстремумы на юго-востоке (рис. 2, а, б).

Наиболее выразительные изменения характера выпадения осадков произошли в весенний период. Во-первых, в 1991–2019 гг. разность между максимальным и минимальным количеством осадков за сезон сократилась до 45 против 75 мм, характерных для периода 1961–1990 гг. Во-вторых, среднее количество осадков в период современного потепления климата выросло

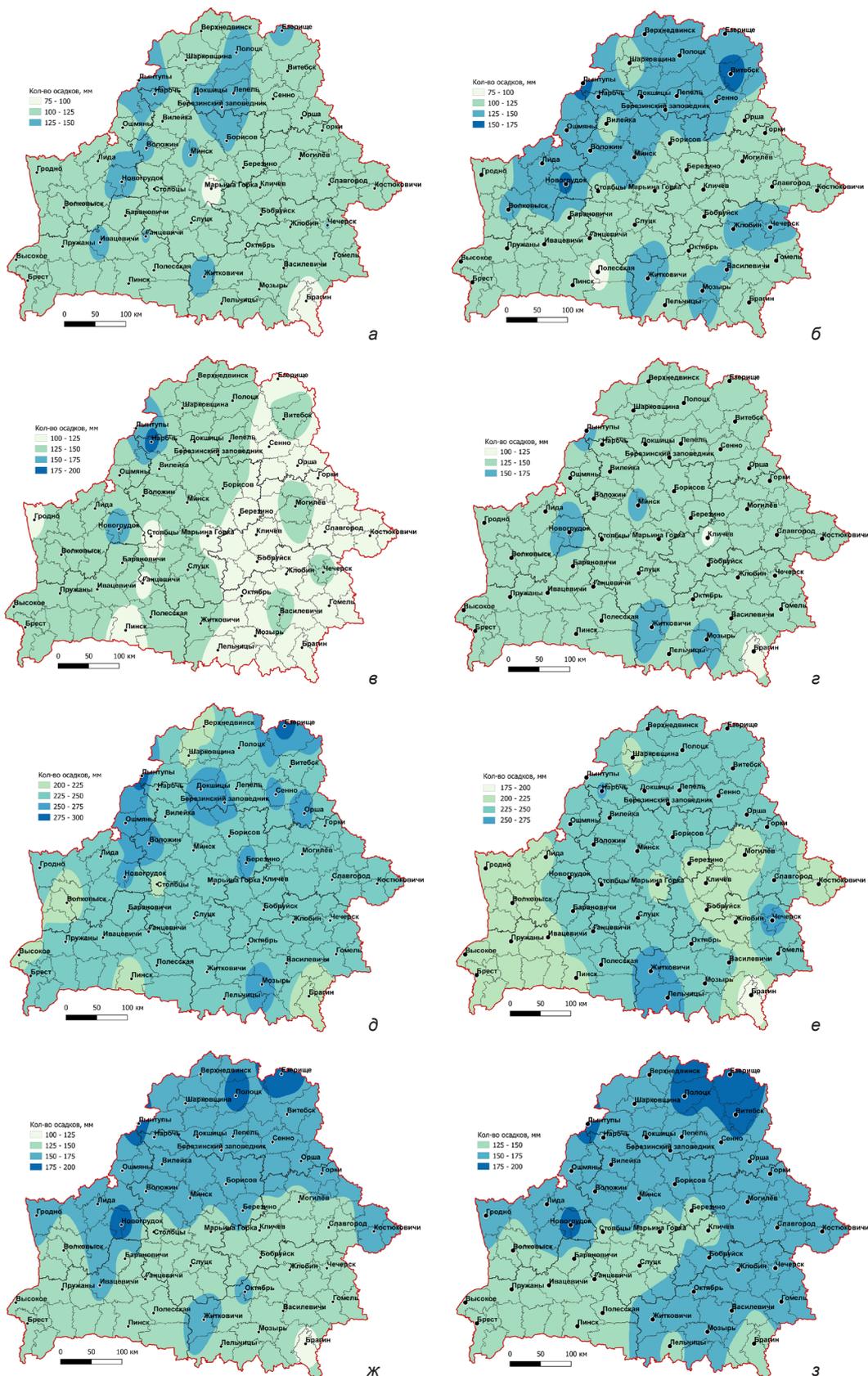


Рис. 2. Среднее количество осадков за календарные зиму (а, б), весну (в, г), лето (д, е) и осень (ж, з) в периоды 1961–1990 гг. (а, в, д, ж) и 1991–2019 гг. (б, г, е, з)

на 13 мм и составило 141 мм. Изогиета >125 мм продвинулась более чем на 300 км на запад – область со средним количеством осадков >125 мм занимает практически всю территорию Беларуси (рис. 2, в, г). Это позволяет говорить о том, что характер выпадения осадков в Беларуси в весенний период стал существенно равномернее. Причина этого заключается в повышении циклонической активности в холодный период года (март) и более раннего начала активных конвекционных процессов местного осадкообразования, характерных для летнего периода, из-за смещения сроков начала климатического лета на более ранний срок [3, 17, 18].

Усиление засушливости, отмечающееся в современный период климата, наиболее выразительно проявляется в летний период, что связано с повышением средних температур и продолжительности засушливых периодов по причине более частых случаев блокирующих антициклонов и снижения циклонической активности в целом [3, 4]. Среднее количество осадков за летний период снизилось с 240 мм в 1961–1990 гг. до 229 мм в 1991–2019 гг. Изогиета значений осадков <225 мм продвинулась на 70–100 км на восток; сформировались большие области пониженных значений осадков на западе Беларуси, а также в центральной части Могилевской и Гомельской областей (рис. 2, д, е). Разность между максимальным и минимальным количеством осадков за сезон на протяжении рассматриваемого периода сохранялась на уровне 75–80 мм.

Характер изменений количества осадков в осенний период существенно отличается в западной и восточной Беларуси. На протяжении всего рассматриваемого периода в западной части Беларуси не происходило значимых изменений, а в восточной Беларуси в 1991–2019 гг. произошло смещение изогиеты >150 мм на ~ 200 км (рис. 2, ж, з). Наиболее вероятной причиной этого является смещение на восток преобладающей траектории циклонов в период современного потепления климата. Вследствие этих изменений среднее количество осадков в осенний период выросло на 4 мм и составило 157 мм, а разность между максимальным и минимальным количеством осадков за сезон сократилась на 10 мм.

Разложение временных рядов средних по территории Беларуси значений количества годовых осадков и осадков за холодный период года с помощью метода спектрального сингулярного анализа показало, что в структуре выделенных элементарных компонент преобладают короткопериодные колебания продолжительностью около 2 лет. Их амплитуда модулируется долгопериодными колебаниями более низкой частоты. Согласно анализу в системе *MatLab*, в структуре сглаженных реконструированных временных рядов среднегодового количества осадков обнаруживается квазидвадцатидвухлетняя цикличность (рис. 3, а, б), которая становится менее выраженной после 1990 г. В структуре сглаженного временного ряда количества осадков в холодный период года четко прослеживается квазиодиннадцатилетний цикл, однако в 1991–2019 гг. он существенно ослабевает, и в структуре временного ряда начинает проявляться квазипятилетний цикл (рис. 3, в, г). Средствами анализа языка Python в изменениях количества осадков в холодный период года обнаруживается квазишестидесятилетняя цикличность в главной элементарной компоненте (рис. 3, д). Необходимо отметить, что ни одна из выделенных элементарных компонент временного ряда среднегодового количества осадков не объясняет более 3 % всей дисперсии ряда за 1955–2019 гг., а в холодный период года это значение падает до 2 %.

Экстремальность выпадения осадков. Во многих работах говорится о том, что усиление экстремальности выпадения осадков является одной из характерных черт изменений климата в период современного потепления [5, 6]. На территории Беларуси одновременно с увеличением числа и силы ливней общее число дней с осадками сокращается, а поскольку при ливневых осадках большая часть выпавшей влаги расходуется на поверхностный сток, то количество влаги, поступающей в почву, снижается, что является одной из причин формирования более частых почвенных засух.

Для анализа изменений экстремальности выпадения осадков на территории Беларуси нами рассмотрены изменения числа дней с количеством осадков более 5, 10 и 20 мм/день за период 1991–2019 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг. Полученные результаты приведены на рис. 4.

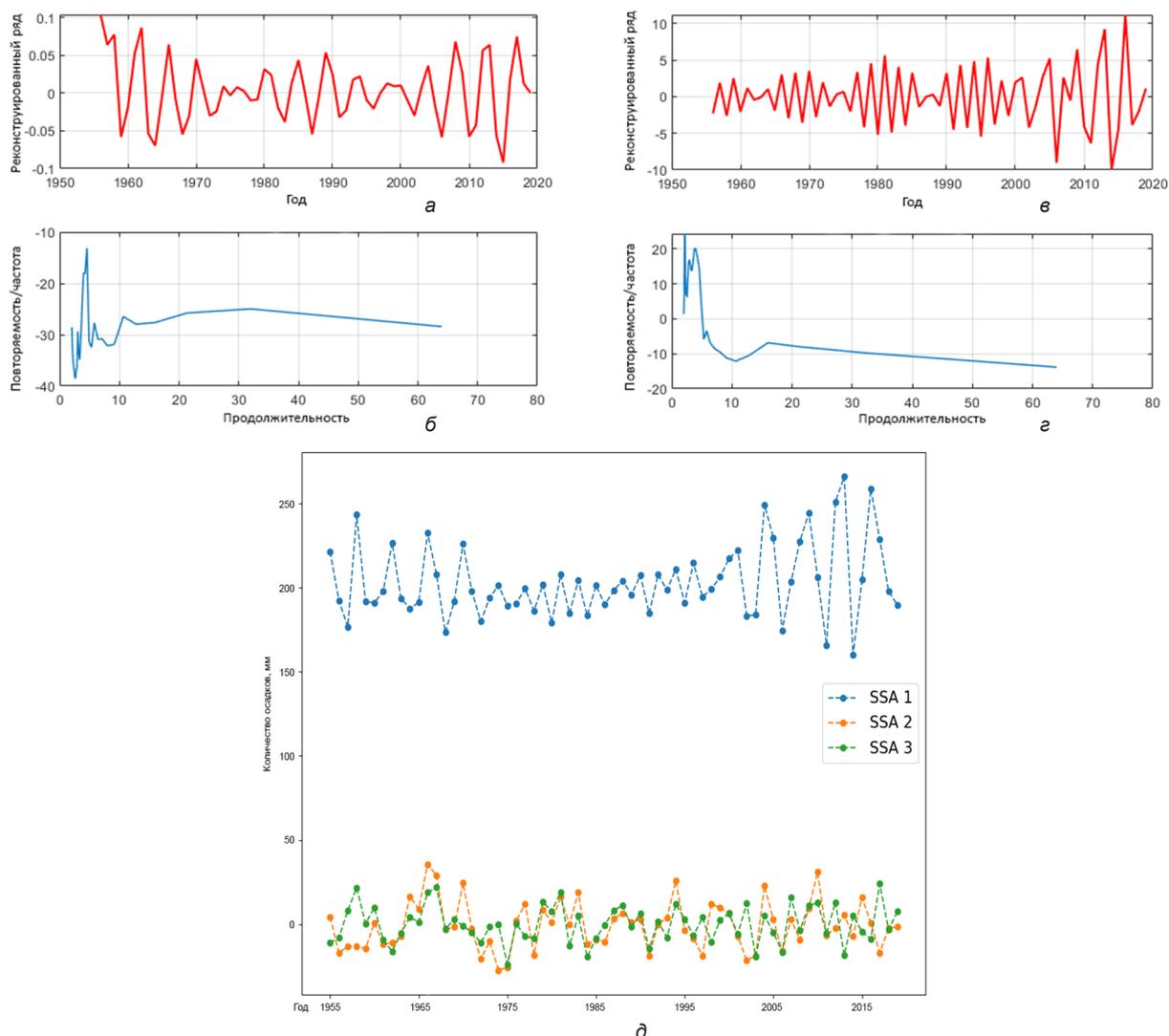


Рис. 3. Реконструированные временные ряды (а, в) и периодограммы колебаний значений количества осадков (б, г) за год (а, б) и холодный период года (в, г) по данным анализа с помощью «метода гусеницы» в системе *MatLab*, а также главные элементарные компоненты временного ряда значений осадков в холодный период года по данным анализа с помощью средств языка программирования *Python* (д)

Число дней с осадками более 5 мм/день в период с 1961 по 2019 г. меняется незначительно: в 1991–2019 гг. их среднее число выросло на 2,8 % относительно периода 1961–1990 гг. и составило 40,6 дней. Что же касается характера пространственного распределения, то оно также не претерпело существенных изменений. Исключением является только юго-восточная часть Беларуси, где произошло наибольшее усиление экстремальности выпадения осадков (рис. 4, а, б).

За рассматриваемый период среднее число дней с осадками более 10 мм/день выросло от 14,6 до 15,7 дней (прирост составил 7,5 %); наибольший прирост числа дней отмечался в юго-восточной и восточной Беларуси, а также на востоке Брестской области (рис. 4, в, г). На остальной части территории республики изменения менее значительны.

Наиболее ярким индикатором усиления экстремальности выпадения осадков на территории Беларуси служит изменения числа дней с осадками более 20 мм/день. В течение периода 1991–2019 гг. число таких дней возросло до 4 в среднем по республике, что на 0,7 дня выше, чем среднее значение для периода 1961–1990 гг. Таким образом, за период современного потепления число дней с осадками более 20 мм/день выросло более чем на 20 %. Пространственное распределение изменений числа дней с осадками более 20 мм/день характеризуется тем,

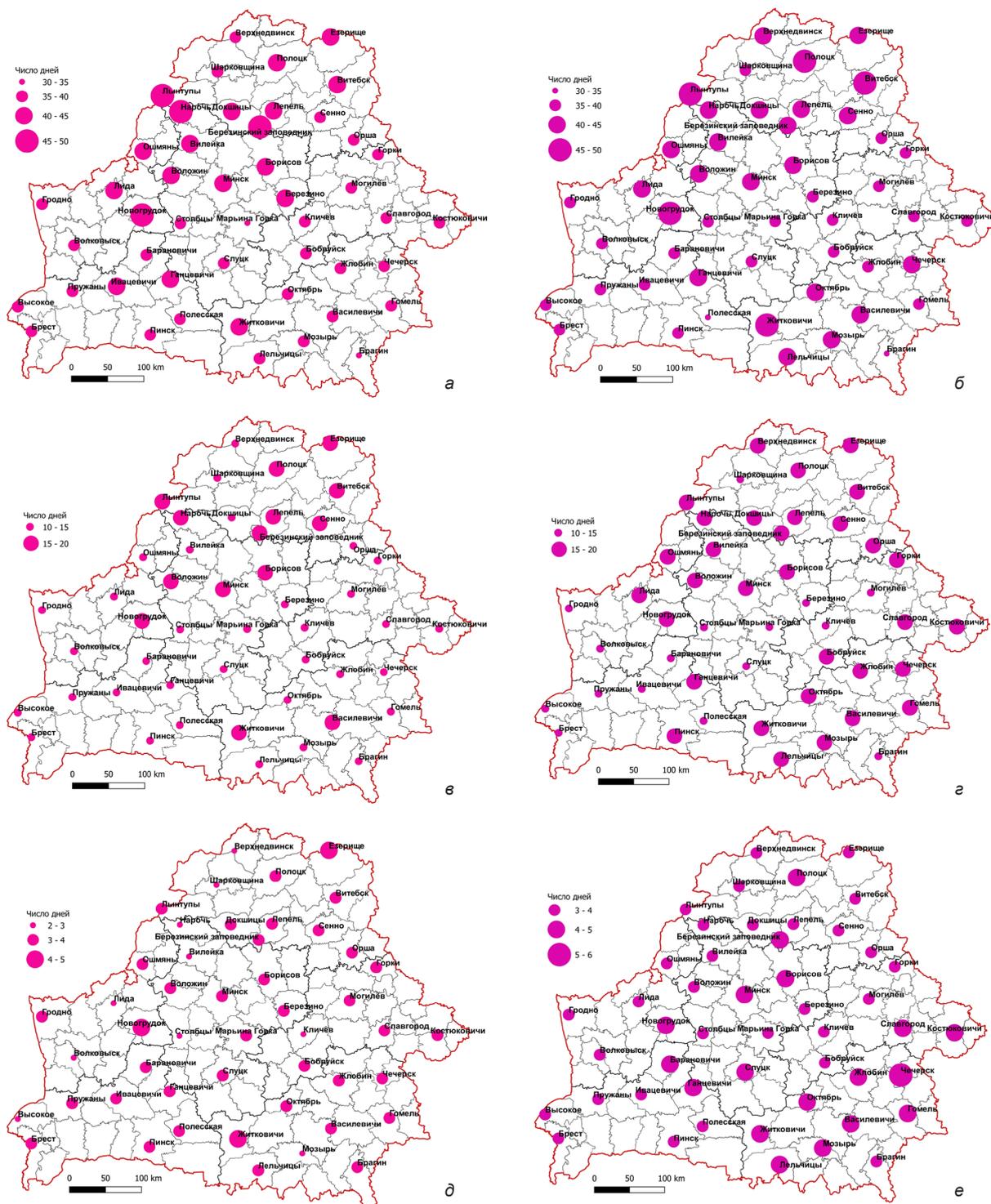


Рис. 4. Число дней с осадками более 5 мм/день (а, б), 10 (в, г) и 20 мм/день (д, е) в периоды 1961–1990 гг. (а, в, д) и 1991–2019 гг. (б, г, е)

что существенный прирост числа дней произошел практически на большей части территории Беларуси. Выпадение более 20 мм осадков в течение одного дня в Беларуси связано с усилением конвекции и формированием мощных кучево-дождевых облаков, что возможно только в летний период. Значительное повышение летних температур на территории страны в последние десятилетия привело к усилению летних конвекционных процессов, которое обеспечило усиление экстремальности выпадения осадков.

Повышение экстремальности выпадения осадков делает актуальной проблему удержания влаги, поступающей при ливневых осадках. Результаты полевых экспериментов показывают, что осуществление этой задачи возможно внедрением лесонасаждений [19] и иными мерами агролесоводства.

Количество осадков в дни зимних оттепелей. Электронные базы данных Республиканского гидрометцентра располагают сведениями о числе дней с жидкими, смешанными и твердыми осадками, однако информация о том, какое количество осадков поступило в виде дождя, снега, мокрого снега и др. в них отсутствует. В связи с этим в настоящей работе в качестве характеристики количества жидких и смешанных осадков в холодный период года принят показатель количества осадков за дни зимних оттепелей. Полученные результаты приведены на рис. 5.

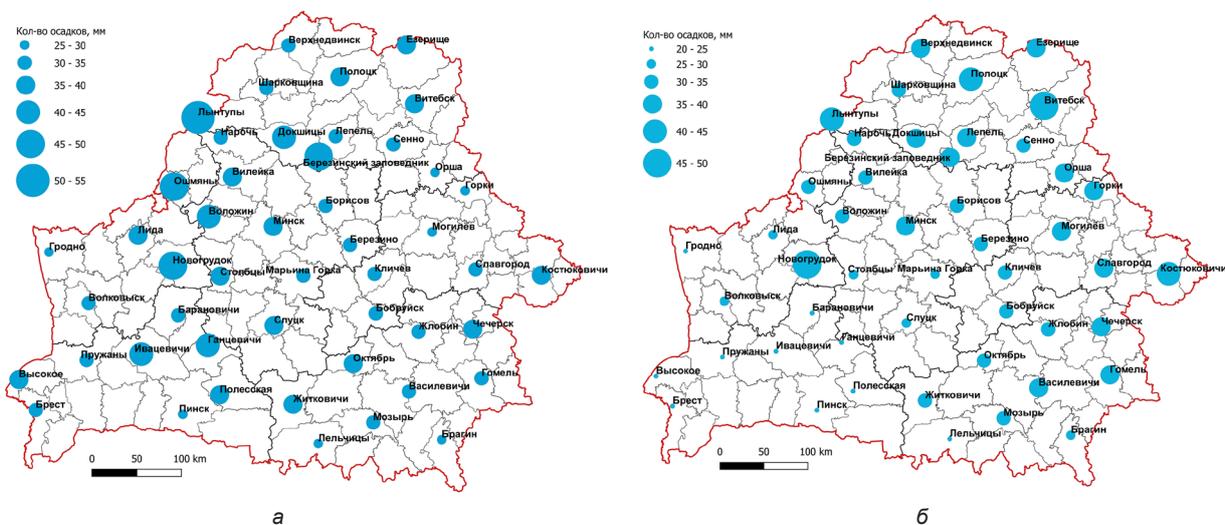


Рис. 5. Среднее количество осадков, выпадающих в дни зимних оттепелей за периоды 1961–1990 гг. (а) и 1991–2019 гг. (б)

Как видно из рис. 5, в период современного потепления климата произошло существенное изменение характера выпадения осадков в дни зимних оттепелей. Во-первых, среднее по республике значение количества осадков в период оттепелей уменьшилось с 35,3 мм в 1961–1990 гг. до 32,4 мм в 1991–2019 гг. (снижение составило 8 %). Во-вторых, область максимальных значений осадков сместилась с северо-западной Беларуси и западной части Белорусской гряды на восточную половину страны. В настоящий период наименьшее число осадков в дни зимних оттепелей отмечается в юго-западной Беларуси. Причины подобных изменений, вероятно, связаны со смещением преобладающих траекторий циклонов в холодный период года на восток и соответственно ростом продолжительности оттепелей в указанном регионе. Кроме того, произошло сокращение зимнего периода, что оказалось наиболее заметно в юго-западной части Беларуси.

Облачность. Колебания степени покрытия облаками является важнейшим индикатором изменений климата. Они наглядно иллюстрируют изменения атмосферной циркуляции на глобальном, региональном и местном уровнях, а также тесно связаны с характеристиками увлажненности рассматриваемой территории. Повышение количества осадков обычно напрямую связано с увеличением общей облачности, хотя число дней с осадками при этом может не претерпевать существенных изменений [1].

Полученные результаты (рис. 6) показывают, что средний балл облачности в период современного потепления климата вырос во все периоды года, хотя в абсолютном выражении этот прирост мал. Так, среднегодовой балл облачности в 1991–2019 гг. составил 6,9, что на 0,1 выше среднего балла облачности для предшествующего периода (рис. 6, а, б). Пространственное распределение среднего балла облачности по территории Беларуси также не претерпело

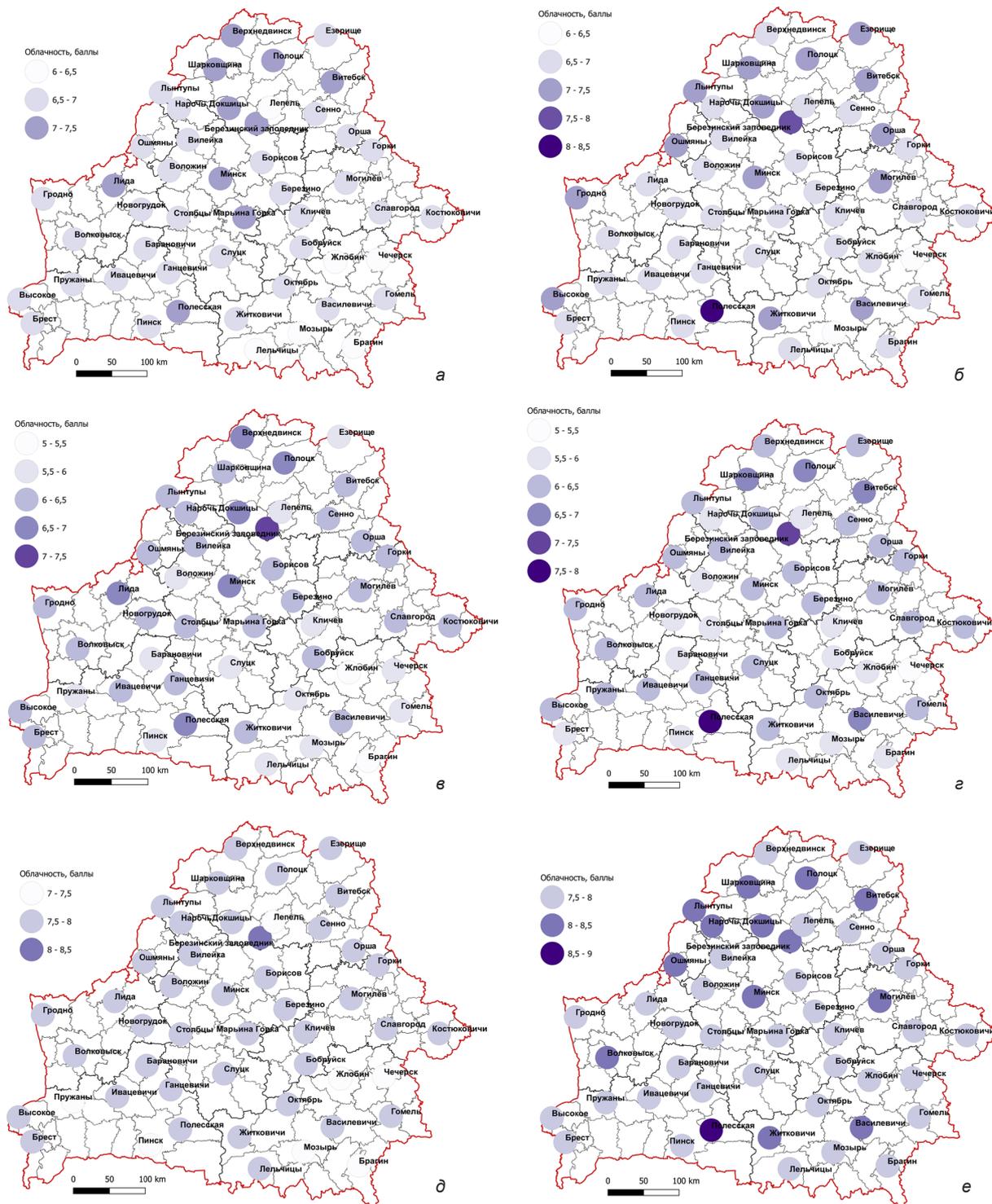


Рис. 6. Средний балл общей облачности за год (а, б), холодный (в, г) и теплый (д, е) периоды года в периоды 1961–1990 гг. (а, в, д) и 1991–2019 гг. (б, г, е)

существенного изменения. Наибольший прирост облачности фиксировался в северной части Беларуси, а также на отдельных станциях на юго-востоке и западе страны. Эти изменения являются следствиями изменения характера атмосферной циркуляции в указанных регионах.

Теплый период года характеризовался малозаметными изменениями общей облачности (рис. 6, в, г). Среднее значение облачности оставалось на уровне 6,2 баллов, и его пространственное распределение не претерпело существенных изменений; незначительный при-

рост облачности отмечался только на севере и юго-востоке Беларуси на отдельных станциях. Прирост общей облачности на юго-востоке страны связан с увеличением роли местных факторов облакообразования (испарение и конвекция), а повышение облачности в северной части Беларуси, вероятнее всего, связано с повышением циклонической активности в переходные сезоны и смещением преобладающей траектории циклонов на северо-восток.

Наиболее заметные изменения общей облачности наблюдаются в холодный период года. Средний балл облачности в период современного потепления климата вырос на 0,2 и составил 7,9 (прирост менее 3 %). Облачность существенно выросла в северной и восточной части страны, в то время как в западной Беларуси средние значения преимущественно остались на том же уровне. Подобные изменения согласуются с утверждением, что в период современного потепления климата из-за повышения температуры поверхности океана циклоническая активность возросла [3, 17], а изменения характера пространственного распределения облачности объясняются смещением преобладающих траекторий циклонов.

Исследование временной изменчивости средних по территории Беларуси значений облачности за период 1955–2019 гг. с помощью метода сингулярного спектрального анализа показало результаты, схожие с разложением временного ряда значений количества осадков. Ни одна из выделенных элементарных компонент не объясняла более 3 % всей дисперсии временного ряда. Цикличность обнаруживается только в структуре реконструированного временного ряда при анализе с помощью системы *MatLab*. Как и для среднегодового количества осадков, в изменениях облачного покрова выделяется квазидвадцатидвухлетний цикл.

Число ясных дней. Число ясных дней выступает в качестве дополнительного показателя при оценке изменений степени покрытия неба облаками. По своей сути, изменения этого показателя противоположны изменениям общего балла облачности и, как следствие, с увеличением количества осадков будет связано снижение числа ясных дней.

Согласно полученным результатам, период современного потепления климата характеризуется существенным снижением числа ясных дней: в 1991–2019 гг. в среднем по республике отмечалось 20,4 ясных дня, в то время как в 1961–1990 гг. в год в среднем отмечалось 26,4 ясных дня (рис. 7, а, б). Таким образом, за период современного потепления климата число ясных дней за год снизилось на 23 %. Снижение числа ясных дней отмечалось по всей территории Беларуси, и только в окрестностях Белорусской гряды снижение оказалось меньшим. Отчасти это связано с тем, что этот регион всегда характеризовался наиболее низкими значениями числа ясных дней, поскольку служил некоторой орографической преградой на пути движения воздушных масс с запада.

В теплый период года было отмечено наибольшее в абсолютном выражении снижение числа ясных дней: среднее значение за 1991–2019 гг. составило 14 дней против 17,7 в 1961–1990 гг. Снижение числа ясных дней фиксировалось по всей территории Беларуси, однако наиболее существенным оно было в юго-восточной части страны. Это связано прежде всего с усилением местных процессов облако- и осадкообразования вследствие более значительного повышения средних температур, испарения и конвекционных процессов.

Снижение числа ясных дней в холодный период года составило 2,3 дня, и в настоящее время среднее по республике число ясных дней составляет 6,4 дня. В целом снижение числа ясных дней в холодный период года происходило равномерно по всей территории Беларуси. Главной причиной снижения числа ясных дней в холодный период года является усиление циклонической активности.

Таким образом, число ясных дней является более наглядным показателем изменения характера атмосферной циркуляции, чем изменения балла общей облачности. Последние оценки носят качественный характер и в значительной мере субъективны.

Гидротермический коэффициент по Г. Т. Селянинову. Наиболее наглядной характеристикой режима увлажнения территории являются комплексные показатели тепло- и влагообеспеченности. В метеорологической литературе стран СНГ для этих целей чаще всего используется гидротермический коэффициент по Г. Т. Селянинову, представляющий собой соотношение

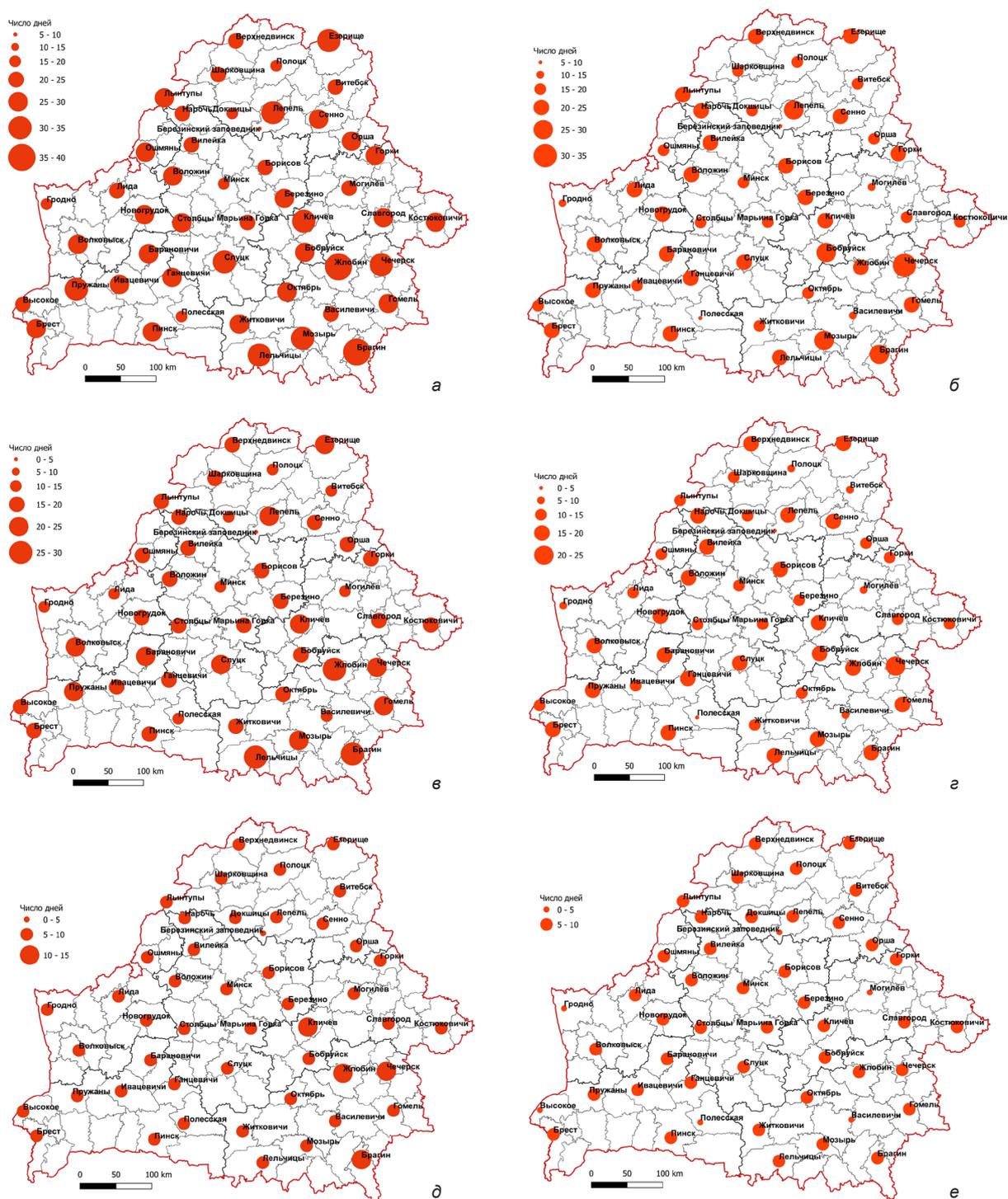


Рис. 7. Число ясных дней за год (а, б), холодный (в, г) и теплый (д, е) периоды года в периоды 1961–1990 гг. (а, в, д) и 1991–2019 гг. (б, г, е)

увеличенной в 10 раз суммы осадков за период со средними температурами выше 10 °С к сумме активных температур выше 10 °С [11]. Значения ГТК=1 принято в качестве границы влажной и засушливой зон; значения ГТК, находящиеся в пределах 1,3–1,6, считаются показателем достаточного увлажнения. В рамках данной работы нами было проведено сравнение средних значений ГТК за периоды 1961–1990 гг. (рис. 8, а) и 1991–2019 гг. (рис. 8, б).

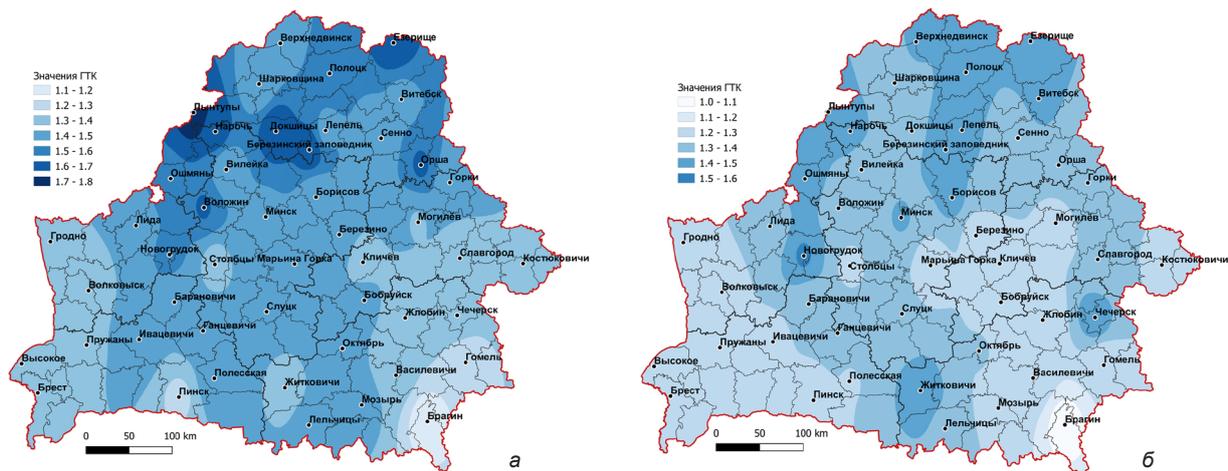


Рис. 8. Среднее значение ГТК по Г. Т. Селянину за периоды 1961–1990 гг. (а) и 1991–2019 гг. (б)

Как видно из рис. 8, засушливость климата в Беларуси в период современного потепления климата существенно усилилось. Среднее значение ГТК по территории страны уменьшилось на 0,11 и теперь составляет 1,33. Снижение максимального значения составило 0,26. Интересно отметить, что максимумы и минимумы значений ГТК на территории Беларуси совпадают с экстремумами для показателя годового количества осадков. До начала периода современного потепления климата область недостаточного увлажнения занимала только 6 административных районов на юго-востоке Беларуси, а в настоящее время она охватывает практически все Полесье и Предполесье за исключением территорий, прилегающих к станции Житковичи. Таким образом, площадь засушливой зоны в Беларуси достигла трети страны. Изолиния значений ГТК, равных 1,3, отступила на 50 км на запад и почти 200 км на север. Кроме того, образовалась новая область пониженных значений ГТК на западе и юго-западе Беларуси, где отступление изолинии ГТК=1,3 на север было еще большим. Причина такого усиления засушливости состоит в том, что темпы прироста количества осадков в 5–6 раз ниже темпов повышения средней температуры. Единственной метеорологической станцией в Беларуси, где в период современного потепления климата отмечался прирост средних значений ГТК, является станция Житковичи; здесь прирост значений ГТК составил 0,06.

Исследование временного ряда средних по республике значений ГТК за период с 1955 по 2019 г. показало, что все выделенные элементарные компоненты находятся на уровне шумов: они объясняют не более 2,7 % всей дисперсии исходного временного ряда. Выраженных многолетних циклов в изменении реконструированного временного ряда значений ГТК и элементарных компонент также не прослеживается.

Заключение. В период современного потепления климата среднее количество осадков на территории Беларуси увеличилось на 2–2, 5%, однако темпы повышения количества осадков в 5–6 раз ниже, чем темпы повышения средней температуры, что приводит к усилению засушливости климата. Наиболее существенный прирост количества осадков в Беларуси наблюдается в зимне-весенний период; летом отмечается сокращение количества осадков. Увеличение количества осадков в зимне-весенний период связано с изменениями атмосферной циркуляции, а снижение количества осадков в летний период обусловлено усилением антициклонической активности и действием местных факторов осадкообразования.

Экстремальность выпадения осадков в период современного потепления климата существенно выросла: по сравнению с периодом 1961–1990 гг. число дней с осадками более 10 мм/день выросло на 7 %, а число дней с осадками более 20 мм/день – на 20 %. Рост числа дней

с ливневыми осадками не способствует эффективному пополнению запасов почвенной влаги и создает неблагоприятные условия для роста и развития растений.

Количество осадков в дни зимних оттепелей в период 1991–2019 гг. выросло в восточной Беларуси, в то время как в центральной и западных частях страны оно либо сохранилось на уровне, аналогичном периоду 1961–2019 гг., либо даже снизилось. Причина заключается в том, что устойчивость и продолжительность периода отрицательных температур в Беларуси уменьшилась.

В абсолютном выражении средний балл облачности на территории Беларуси в период современного потепления климата несущественно изменился в сторону повышения. Максимальный прирост отмечался в холодный период года и составил менее 3 % в относительном выражении. Наиболее наглядным показателем, характеризующим изменения степени покрытия облаками в Беларуси, оказалось число ясных дней. В среднем за год оно снизилось на 23 %, причем снижение числа дней в теплый и холодный периоды года было сопоставимым. Причина заключается в изменениях циркуляции атмосферы, а также увеличении роли местных факторов облако- и осадкообразования.

Масштабы усиления засушливости климата в Беларуси ярко выражены в изменениях средних значений ГТК по Г. Т. Селянинову. Если в период 1961–1990 гг. среднее значение ГТК составляло 1,44, то в период современного потепления климата оно снизилось до 1,33. В настоящее время около трети территории Беларуси находится в зоне недостаточного увлажнения.

Разложение временных рядов значений количества осадков, облачности и ГТК с помощью метода сингулярного спектрального анализа показало, что в структуре сглаженных временных рядов среднегодового количества осадков и среднего балла облачности за год прослеживается квазидвадцатидвухлетняя цикличность, а в структуре рядов среднего количества осадков за холодный период года прослеживаются квазиодинадцатилетний и квазишестидесятилетний циклы. В период современного потепления климата (1991–2019 гг.) они становятся менее выраженными. В то же время ни одна из выделенных элементарных компонент не объясняет более 3 % всей дисперсии временных рядов.

Список использованных источников

1. Оценка влияния урбанизации и мелиорации на климатические, водные, земельные и лесные ресурсы Беларуси: отчет о НИР (заключ.) / Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды; рук. В. И. Мельник. – Минск, 2016. – 101 с. – № ГР 20163200.
2. Лысенко, С. А. Особенности современного изменения климата в Республике / С. А. Лысенко, И. В. Буяков // Природопользование. – 2020. – № 1. – С. 17–27.
3. Логинов, В. Ф. Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 218 с.
4. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск: ТетраСистемс, 2008. – 496 с.
5. Логинов, В. Ф. Изменения климата в Беларуси и их последствия для ключевых секторов экономики (сельское, лесное и водное хозяйство) / В. Ф. Логинов. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 152 с.
6. Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси: учеб. пособие / В. Ф. Логинов [и др.]. – М., 2016. – 58 с.
7. GRACE Tellus. Gravity recovery & climate experiment, Jet Propulsion Laboratory, NASA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/
8. Глобальные и региональные изменения климата и их связь с биопродуктивностью наземных экосистем / С. А. Лысенко [и др.] // Природопользование. – 2019. – № 2. – С. 20–31.
9. Логинов, В. Ф. Пространственно-временные изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков. // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2017. – №1. – С. 42–57.
10. Хитриков, М. А. Прогноз изменений биоклиматического потенциала территории Беларуси / М. А. Хитриков // XV Междунар. науч. конф.: Молодежь в науке – 2018: сб. материалов Междунар. конф. молодых ученых, Минск, 29 октября–1 ноября 2018 г. / НАН Беларуси. – Минск: Беларус. наука, 2019. – С. 180–191.
11. Селянинов, Г. Т. К вопросу о классификации сельскохозяйственных культур по климатическому признаку / Г. Т. Селянинов // Тр. по с.-х. метеорологии / Всесоюз. акад. сел. хоз-ва, Ин-т земледелия, Отд. с.-х. метеорологии; под ред. А. В. Вознесенского. – Л., 1930. – Вып. 21. – С. 130–171.
12. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница»–SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие / Н. Э. Голяндина. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.

13. MATLAB [Electronic resource] // MATLAB – MathWorks. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
14. Python programming language [Electronic resource] // Python. – Mode of access: <https://www.python.org>
15. pyts [Electronic resource] // pyts. – Mode of access: <https://pyts.readthedocs.io/en/stable/#>
16. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм: ВМО – № 1203 [Электронный ресурс] / Всемир. метеорол. орг. – Женева : ВМО, 2017. – Режим доступа: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4168
17. *Логинов, В. Ф.* Современные изменения регионального и глобального климата / В. Ф. Логинов С. А. Лысенко. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 314 с.
18. *Табальчук, Т. Г.* Анализ пространственно-временных изменений температуры воздуха на территории Беларуси / Т. Г. Табальчук // Природопользование: сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования; гл. ред. А. К. Карабанов. – Минск, 2016. – Вып. 30. – С. 24–32.
19. *Молчанов, А. А.* Гидрологическая роль леса / А. А. Молчанов. – М.: АН СССР, 1960. – 487 с.

Поступила 10.08.2020