

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ
CLIMATIC RESOURCES
КЛИМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ

УДК 551.583(476)

Ю. А. Бровка

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: brovka.yuliya@mail.ru*

**ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЗАСУХ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ
В ПЕРИОД СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА**

Аннотация. Рассмотрено влияние особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии на формирование продолжительных атмосферных засух на территории Беларуси с мая по сентябрь в период потепления климата (1989–2020 гг.). С использованием классификации атмосферной циркуляции внетропических широт Северного полушария Б. Л. Дзердзеевского дана оценка повторяемости различных циркуляционных механизмов в месяцы с продолжительными атмосферными засухами на большей части территории Беларуси. Выявлены элементарные циркуляционные механизмы, способствующие возникновению засухи на территории Беларуси, и тенденции изменения их общей продолжительности в мае–сентябре за 1899–2019 гг. Определены особенности пространственного изменения осредненного гидротермического коэффициента в годы с засухами в различные месяцы, что позволило выявить наиболее подверженные атмосферной засухе регионы и оценить ее интенсивность и площадь распространения. Во время рассматриваемых засух установлено преобладание дней со стационарными антициклонами, которые чаще формируются при меридиональной южной циркуляции атмосферы. В некоторые годы преобладают дни с меридиональной северной циркуляцией, сопровождающейся выходами южных циклонов, которые обеспечивают поступление субтропического воздуха на территорию Беларуси и локальные осадки.

Ключевые слова: элементарный циркуляционный механизм, атмосферная засуха, гидротермический коэффициент

Yu. A. Brovka

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: brovka.yuliya@mail.ru*

**CIRCULATION CONDITIONS FOR THE FORMATION AND SPATIO-TIME DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC
DROUGHTS ON THE TERRITORY OF BELARUS IN THE PERIOD OF MODERN CLIMATE WARMING**

Abstract. The article considers the influence of atmospheric circulation features in the Northern Hemisphere on the formation of long-term atmospheric droughts on the territory of Belarus from May to September during the period of climate warming (1989–2020). Using the classification of atmospheric circulation of extratropical latitudes of the Northern Hemisphere by B. L. Dzerdzevsky, an estimate is made of the frequency of various circulation mechanisms in months with prolonged atmospheric droughts in most of the territory of Belarus. Elementary circulation mechanisms are identified that contribute to the occurrence of drought in the territory of Belarus, and trends in their total duration in May–September for 1899–2019. The features of the spatial change of the average hydrothermal coefficient in years with droughts in different months were determined, which made it possible to identify the regions most prone to atmospheric drought and to estimate its intensity and distribution area. During the considered droughts, the predominance of days with stationary anticyclones, which are more often formed during the meridional southern circulation of the atmosphere, was established. In some years, days with meridional northern circulation prevail, accompanied by southern cyclones, which provide subtropical air to the territory of Belarus and local precipitation.

Keywords: elementary circulation mechanism, atmospheric drought, hydrothermal coefficient

Ю. А. Броўка

*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: brovka.yuliya@mail.ru*

**ЦЫРКУЛЯЦЫЙНЫЯ ўМОВЫ ФАРМАВАННЯ І ПРАСТОРВА-ЧАСОВАЕ РАЗМЕРКАВАННЕ АТМАСФЕРНЫХ
ЗАСУХ НА ТЭРЫТОРЫІ БЕЛАРУСІ ў ПЕРЫЯД СУЧАСНАГА ПАЦЯПЛЕННЯ КЛІМАТУ**

Анотацыя. У артыкуле разгледжаны ўплыў асаблівасцей цыркуляцыі атмасферы ў Паўночным паўшар'і на фарміраванне працяглых атмасферных засух на тэрыторыі Беларусі з мая па верасень у перыяд пацяплення клімату (1989–2020 гг.). З выкарыстаннем класіфікацыі атмасфернай цыркуляцыі пазатрапічных шырот Паўночнага паўшар'я Б. Л. Дзер-

дзееўскага дадзена ацэнка паўтаральнасці розных цыркуляцыйных механізмаў у месяцы з працяглымі атмасфернымі засухамі на большай частцы тэрыторыі Беларусі. Выяўлены элементарныя цыркуляцыйныя механізмы, якія спрыяюць узнікненню засухі на тэрыторыі Беларусі, і тэндэнцыі змены іх агульнай працягласці ў маі–верасні за 1899–2019 гг. Вызначаны асаблівасці прасторавай змены асераднёнага гідратэрмічнага каэфіцыента ў гады з засухамі ў розныя месяцы, што дазволіла выявіць найбольш схільныя да атмасфернай засухі рэгіёны і ацаніць яе інтэнсіўнасць і плошчу распаўсюджвання. Падчас разгляданых засух ўстаноўлена перавага дзён са стацыянарнымі антыцыклонамі, якія часцей фарміруюцца пры мерыдыяльнай паўднёвай цыркуляцыі атмасферы. У некаторыя гады пераважаюць дні з мерыдыяльнай паўночнай цыркуляцыяй, якая суправаджаецца выходамі паўднёвых цyklонаў, што забяспечваюць паступленне субтрапічнага паветра на тэрыторыю Беларусі і лакальныя ападка.

Ключавыя словы: элементарны цыркуляцыйны механізм, атмасферная засуха, гідратэрмічны каэфіцыент

Введение. Современное потепление климата, начавшееся в прошлом столетии и продолжающееся до настоящего времени, характеризуется быстрым ростом зимних температур до начала 1990-х годов, с последующим его замедлением и увеличением скорости роста температуры в летний сезон [1, 2]. За период 1990–2020 гг. потепление летом происходит в 1,7 раза быстрее, чем зимой [2]. В период потепления климата увеличилось среднее для Беларуси количество осадков в зимне-весенний период, в октябре, а также в июле, уменьшилось – в июне и августе. Увеличилась частота засухи в различные месяцы вегетационного периода, особенно во вторую половину лета, на территории Беларуси, а также на соседних территориях: Европейской части России, Украине [3–5]. В связи с этим актуальным является изучение условий циркуляции атмосферы, при которых возможно формирование наиболее значительных по площади распространения и продолжительности засух на территории Беларуси при современном потеплении климата.

Цель проводимого исследования – оценка повторяемости механизмов атмосферной циркуляции и особенностей пространственно-временного изменения гидротермического коэффициента во время наиболее крупных засух при современном потеплении климата Беларуси (1989–2019 гг.); выявление многолетней тенденции общего числа дней с элементарными циркуляционными механизмами, определяющими формирование засух на территории Беларуси, в мае–сентябре с 1899 по 2019 г.

Вопросами изменения циркуляции атмосферы в Северном полушарии с 1899 г. до настоящего времени занимаются ученые Института географии РАН, используя классификацию циркуляционных механизмов Северного полушария Б. Л. Дзерdzeевского, В. М. Курганской и З. М. Витвицкой, дополненную в 1970-е годы С. С. Савиной, Л. В. Хмелевской новыми динамическими схемами элементарных циркуляционных механизмов. Основным признаком типизации является наличие или отсутствие, направление и количество блокирующих процессов (арктических вторжений) на полушарии. Выделено 4 группы циркуляции (зональная, нарушения зональности, меридиональные северная и южная), 13 типов циркуляции, 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ), как основная единица типизации. В пределах одного типа существуют различия ЭЦМ в направлениях арктических вторжений или выходов южных циклонов, а также различия ЭЦМ по знаку барических полей над океанами и континентами в летний и зимний сезоны [6].

Н. К. Кононовой выполнен анализ динамических схем элементарных циркуляционных механизмов С. С. Савиной и Л. В. Хмелевской, отражающих географическое положение и площади областей высокого и низкого давления в Северном полушарии; рассмотрен внутrigодовой ход (с суточным осреднением) и изменение многолетней продолжительности каждого ЭЦМ, по преобладающей группе циркуляционных механизмов выделены 3 циркуляционные эпохи [6, 7]. С 1957 г. до настоящего времени отмечается меридиональная южная эпоха, для различных периодов которой характерно увеличение продолжительности меридиональных южных и/или северных процессов, повышенная продолжительность зональных процессов (1970–1980 гг.).

В работе [8] показано, что в период развития меридиональной южной циркуляционной эпохи возрастает повторяемость переходов других ЭЦМ в ЭЦМ меридиональной южной группы циркуляции, уменьшается непрерывная продолжительность отдельных ЭЦМ, уменьшается число переходов ЭЦМ с блокирующими процессами в другой ЭЦМ с сохранением элементов предыдущего процесса. Все это свидетельствует о росте неустойчивости атмосферных процессов в течение второй половины XX в. – начале XXI в., особенно в период с 1998 г., что может привести к увеличению повторяемости экстремальных климатических явлений. Согласно работе [9], в 2019 г. впервые за весь период составления Календаря последовательной смены ЭЦМ (с 1899 г.) отмечались месяцы (апрель–май), в которые действовала только одна группа циркуляции атмосферы – меридиональные северные (блокирующие) процессы, с которыми на территории России были связаны дефицит осадков и быстрое повышение температура воздуха.

Изменения количества осадков в Белорусском Полесье в различные эпохи циркуляции атмосферы рассмотрены в работе [10]. Установлено, что при переходе от зональной к меридиональной южной эпохе с увеличением продолжительности меридиональной северной и меридиональной южной групп

циркуляции (1957–1969 гг.) увеличились коэффициенты корреляции между количеством осадков на метеостанциях. При росте годовой продолжительности меридиональных южных процессов и уменьшении числа дней с меридиональной северной группой циркуляции (1981–1997 гг.) происходит снижение сумм осадков и уменьшение тесноты связи между ними на исследуемых станциях. В период увеличения числа дней с меридиональной северной группой циркуляции и уменьшения числа дней с меридиональной южной группой (1988–2008 гг.) отмечены рост количества осадков, увеличение тесноты связи между количеством осадков в широтном направлении и уменьшение в меридиональном направлении.

Анализ пространственного распределения и циркуляционных условий формирования экстремальных засух на Европейской территории России с конца XX века, а также на юге Восточно-Европейской равнины (южнее 54° с.ш.) в начале XXI века с использованием типизации циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому детально представлен в работах [4, 5, 11]. Авторами [5] отмечено, что засухи над Восточно-Европейской равниной формируются при арктических вторжениях на Восточную Европу, когда арктический антициклон соединяется с Азорским; при арктических вторжениях на Атлантический океан или Западную Европу, которые способствуют продвижению на восток отрога Азорского антициклона; при разрушении полосы высокого давления над Восточно-Европейской равниной или отрога Азорского антициклона и образовании стационарных антициклонов.

Повторяемость выявленных с использованием стандартизированного индекса осадков SPI сильных атмосферных засух на территории Европейской части России с середины прошлого столетия до 2016 г., тенденции повторяемости таких засух в условиях современного летнего потепления и в периоды положительных и отрицательных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики исследованы в работах [12, 13]. Установлены увеличение повторяемости длительных периодов аномально высоких температур, рост частоты сильных летних засух (особенно на юго-востоке Европейской части России) в период потепления Северной Атлантики (с 1995 г.). На большей части территории сильные засухи стали начинаться на одну-две недели раньше, чем в холодную фазу Северо-Атлантического колебания (1963–1994 гг.). Такие изменения отмечены на фоне ослабления зональной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе и увеличения числа дней с блокирующими антициклонами, максимальная повторяемость которых отмечалась около 30° в.д.

Материалы и методика исследований. Исследование циркуляционных условий формирования засух на территории Беларуси основано на типизации циркуляции атмосферы внетропических широт Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. На основании приведенных в работе [6] осредненных динамических схем элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) определены те из них, которые имеют наибольшую повторяемость с мая по сентябрь, при которых территория Беларуси полностью или частично находится в области повышенного атмосферного давления.

При анализе циркуляционных условий формирования засух на территории Беларуси использованы данные Института географии РАН (www.atmospheric-circulation.ru) [14] о продолжительности определенных ЭЦМ в Северном полушарии в разные месяцы года с 1899 по 2019 г. и ежедневный Календарь последовательной смены ЭЦМ для расчета повторяемости различных ЭЦМ в периоды с засухами.

Для определения лет с наиболее продолжительными, а также охватывающими наибольшие площади засухами в различные месяцы использованы материалы Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Гидрометцентр) о засухах на территории Беларуси. Для анализа метеорологических условий в различных частях страны в дни с определенными ЭЦМ использованы данные Государственного климатического кадастра суточных сумм осадков и максимальных суточных температур.

В период современного потепления климата (с 1989 г.) выделены годы с засухой по всей Беларуси, на большей части ее территории в мае (1993, 2000, 2018 гг.), июне (1999, 2015, 2019 гг.), июле (1992, 1994, 1995, 1999, 2002 гг.), августе (1992, 1996, 2002, 2007, 2013, 2015, 2018 гг.). В эти годы засуха наблюдалась в течение всего рассматриваемого летнего месяца. Продолжительность засух весной составляла 2–3 декады, причем в 1993, 2000 гг. они начинались в апреле и отмечались до середины мая. Для периода современного потепления климата выявлены годы с продолжительными засухами (2–3 месяца) на всей или большей части Беларуси (июль–август 1992 г., июнь–июль 1999 г., июль–август 2002 г.), примерно на 1/2 ее территории (май–июнь 2018 г.) В более прохладный период (1960–1988 гг.) только в 1979 г. наблюдалась засуха с середины мая до конца июня по всей Беларуси.

Для оценки особенностей распространения атмосферных засух на территории Беларуси в различные месяцы вегетационного периода выбран критерий засушливости – гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК).

В качестве исходных данных для расчета ГТК использованы результаты наблюдений за среднемесячной температурой воздуха и количеством осадков на 48 метеостанциях Беларуси и 20 метеостанциях за ее пределами в годы с засухами. При пространственно-временном анализе ГТК использована принятая в Республиканском гидрометцентре [15] градация и соответствующие характеристики условий увлажнения территории: более 1,6 – влажные, 1,31–1,6 – оптимальные, 1,01–1,3 – слабозасушливые, 0,71–1,0 – засушливые, 0,40–0,7 – очень засушливые, 0,21–0,39 – сухие и 0,2 и менее – очень сухие условия. Для территории Беларуси атмосферной засухой считаются условия увлажнения с ГТК 0,7 и менее. Существуют различные градации степени засухи по значениям ГТК [16–18]. В данной работе используется следующая градация: экстремальная засуха (ГТК 0,2 и менее), сильная (менее 0,4), средняя (0,4–0,7). Также можно рассматривать засушливые условия с ГТК 0,71–1,0 как слабую атмосферную засуху.

Результаты исследований. Циркуляционные условия, при которых формируются засухи на территории Восточно-Европейской равнины и на территории Беларуси, рассмотрены в работе [5]. Анализ осредненных динамических схем элементарных циркуляционных механизмов и их средней многолетней повторяемости в годовом ходе [6] показал, что засухи на территории Беларуси в мае–сентябре могут быть связаны с блокирующими ЭЦМ для Европейского сектора – арктическими вторжениями (4б, 10а, 10б), с восточными отрогами Азорского антициклона (2в, 6, 7ал), стационарными антициклонами различного происхождения (2а, 3, 9а, 13л).

Согласно работе [6], при ЭЦМ 2в, 7ал восточный отрог Азорского антициклона распространяется почти на всю Европу, значительно меньшую площадь он занимает при ЭЦМ 6. Территория Беларуси находится в области повышенного атмосферного давления.

ЭЦМ 4б, 10а и 10б характеризуются блокирующими процессами (арктическими вторжениями) над Европой, образующими устойчивые антициклоны, которые соединяются с вытянутыми на Европу гребнями Азорского антициклона (ЭЦМ 4б, 10б) или с Сибирским антициклоном (ЭЦМ 10а). Территория Беларуси находится в области повышенного давления, сформировавшейся в результате арктического вторжения, наиболее длительного и интенсивного при ЭЦМ 10а.

При ЭЦМ 2а и ЭЦМ 3 территория Беларуси находится на периферии стационарного антициклона, охватывающего в первом случае юг Европейской части России и Западной Сибири, во втором – почти всю Восточно-Европейскую равнину. Тип ЭЦМ 9а характеризуется антициклоном над Восточной Европой и частью Западной Сибири, который распространяется на юго-восточную часть Беларуси.

ЭЦМ 13л (летний подтип меридиональной южной циркуляции) отличается циклонической деятельностью над Арктикой и большей длительностью существования по сравнению с другими ЭЦМ. Над Восточно-Европейской равниной, в том числе над территорией Беларуси, формируется стационарный антициклон вследствие разрушения восточного отрога Азорского антициклона. Траектория циклонов проходит западнее Беларуси.

Следует отметить, что классификация циркуляции атмосферы по Б. Л. Дзержевскому и осредненные динамические схемы циркуляционных механизмов позволяют только в общих чертах охарактеризовать циркуляционные условия формирования засух в Беларуси; для детализации циркуляционных условий необходим анализ ежедневных синоптических карт.

Внутригодовое распределение среднего количества дней с рассматриваемыми ЭЦМ за период современного потепления климата с 1989 по 2019 г. представлено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в мае–августе значительно больше среднее число дней с меридиональной южной циркуляцией (ЭЦМ 13л), южными циклонами (ЭЦМ 8 и 12), чем с группой ЭЦМ 2а+3+9а и особенно арктическими вторжениями и Азорским антициклоном. При этом наибольшее среднее число дней со стационарным антициклоном (ЭЦМ 13л) отмечается в летние месяцы, с периферией стационарного антициклона (ЭЦМ 2а+3+9а) на территории Беларуси – в мае–июле. Наиболее высокая средняя продолжительность южных циклонов характерна для апреля–мая, для арктических вторжений – вторая половина лета, для Азорского антициклона – начало лета.

Повторяемость ЭЦМ во время крупных атмосферных засух. Оценка общего числа дней с различными циркуляционными механизмами в месяцы с засухами на большей части территории и в наиболее длительные периоды засух (2–3 месяца) представлена на рис. 2, 3.

В месяцы с засухами в большинстве лет отмечено 55 % дней и более с антициклональными циркуляционными условиями, которые благоприятны для возникновения атмосферной засухи: в мае, августе – 55–84 %, в июне–июле – 73–100 %. Исключением являются май 1993 г. (32 % дней), август 2007 и 2015 г. (45 % дней).

Как видно из рис. 2, в большинстве засушливых месяцев, особенно в июне–июле, преобладает число дней со стационарными антициклонами. Примерно в 2/3 лет они чаще связаны с меридиональной

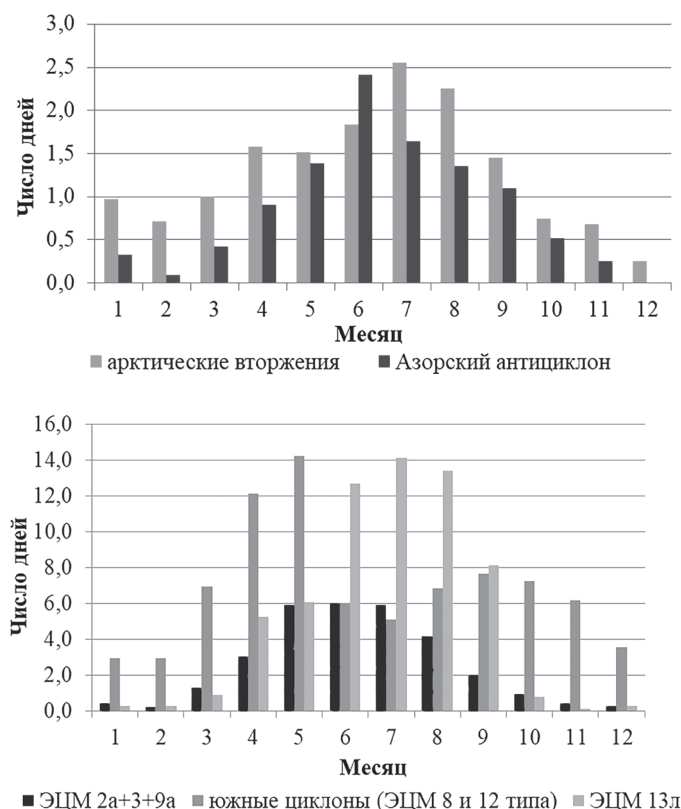


Рис. 1. Внутригодовое распределение среднего числа дней с группами ЭЦМ за период потепления климата 1989–2019 гг.

южной циркуляцией (ЭЦМ 13л), а в некоторые годы и с меридиональной северной циркуляцией (ЭЦМ 9а). В отдельные годы возрастает общее число дней с арктическими вторжениями во время засух в июле (1999, 1995 гг.) и августе (2013 г.), а также число дней с распространением на территорию Беларуси отрога Азорского антициклона в эти месяцы (в июле 1992, 1995 гг. и в августе 1992 г.).

В периоды засух наблюдались ЭЦМ меридиональной северной группы циркуляции (тип 8 и 12), при которых территория Беларуси располагается в области пониженного давления, на восточную часть Европы (ЭЦМ 8а, 8бл, 12а, 12бл) или на всю Европу (8вл, 12вл) отмечаются выходы южных циклонов. Преобладание этих ЭЦМ в засушливые месяцы и наибольшее общее число дней с выходами южных циклонов отмечено в мае (1993 г. – около 2/3 всех дней) и августе (2007 и 2015 гг. – более половины дней).

Анализ суточных сумм осадков в мае 1993 г. показал, что выходы южных циклонов (ЭЦМ 12-го типа) не приносили значительных осадков на территорию Беларуси. На большинстве метеостанций отмечалось 1–2 дня с максимальным суточным количеством осадков около 6–11 мм. Локально на юге и юго-востоке страны выпадали интенсивные осадки (17–18 и 28–30 мм/сут) или длительные осадки (в течение двух дней 8–12 мм/сут, 13–16 мм/сут, на МС Житковичи 5 дней с 10–17 мм/сут), связанные с подтипом 12а. В то же время при ЭЦМ 12-го типа на территорию Беларуси мог поступать теплый воздух со Средиземноморья, который поддерживал сформировавшуюся атмосферную засуху.

В очень сухой август 2015 г. при выходах на территорию Беларуси южных циклонов (ЭЦМ 12а, 12бл) осадки отсутствовали в большинстве дней; в отдельные дни отмечалось до 5 редко до 7 мм/сут. Только на МС Лынтупы в 3-ю декаду августа выпало около 1/3 месячной нормы осадков (20 мм). В августе 2007 г. при ЭЦМ 12-го типа интенсивные осадки также не выпадали; и лишь на отдельных метеостанциях отмечались дни с наибольшим количеством осадков около 10–15 мм/сут. Более значительное суточное количество осадков выпало локально: МС Костюковичи – около 16 и около 40 мм/сут, МС Барановичи – около 26 мм/сут.

Наибольшая общая продолжительность прочих ЭЦМ во время засух в различные месяцы (см. рис. 2) наблюдается в августе 1996 (11 дней) и 1992 гг. (5 дней).

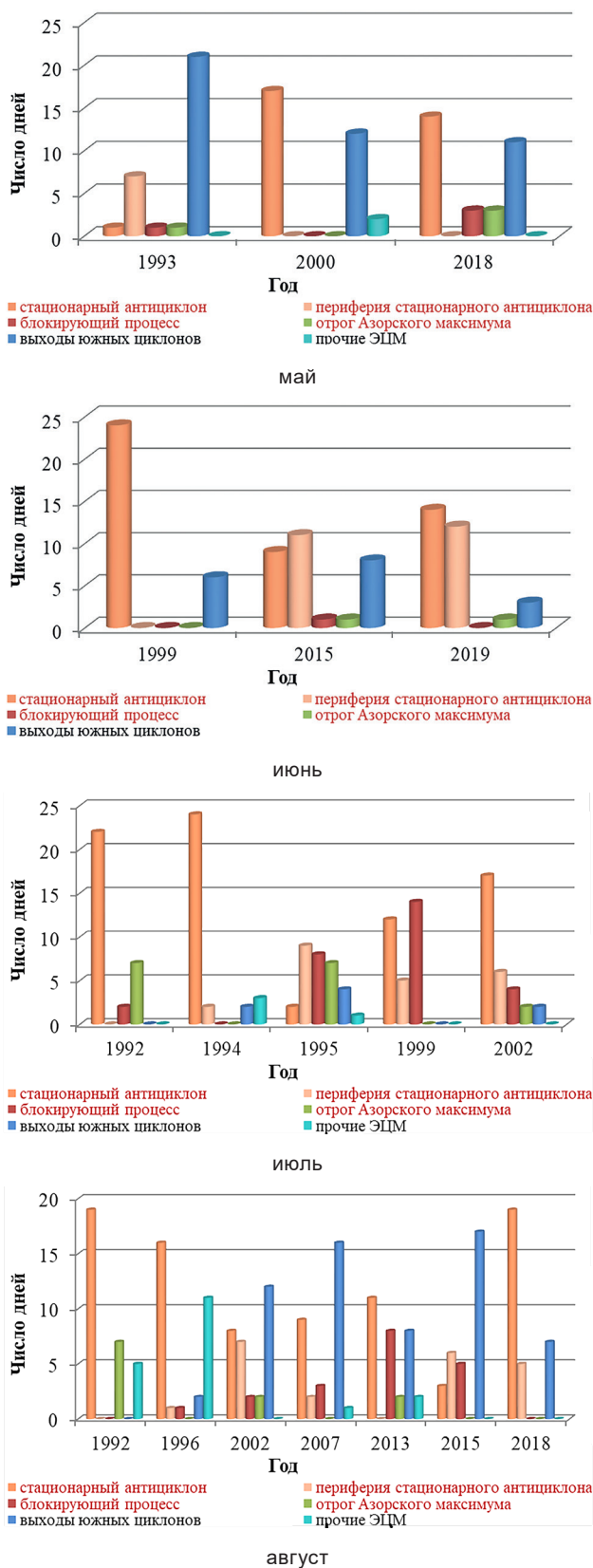


Рис. 2. Общее число дней с различными циркуляционными условиями в засушливые месяцы в годы современного потепления климата: стационарный антициклон (ЭЦМ 13л), периферия стационарного антициклона (ЭЦМ 2а+3+9а), блокирующие процессы, связанные с арктическими вторжениями (ЭЦМ 4б+10а+10б), восточный отрог Азорского антициклона (ЭЦМ 2в+6+7ал), выходы южных циклонов (8а+8бл+8вл+12а+12бл+12вл)

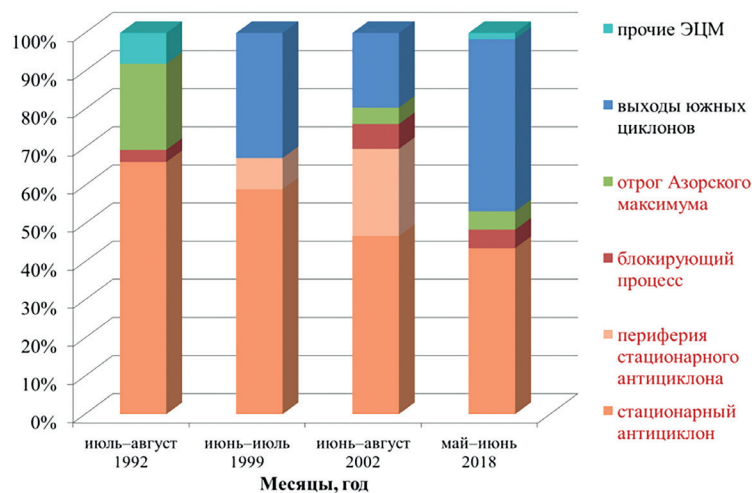


Рис. 3. Доля общего числа дней с различными циркуляционными условиями во время продолжительных засух в период современного потепления климата: стационарный антициклон (ЭЦМ 13л), периферия стационарного антициклона (ЭЦМ 2а+3+9а), блокирующие процессы, связанные с арктическими вторжениями (ЭЦМ 4б+10а+10б), восточный отрог Азорского антициклона (ЭЦМ 2в+6+7ал), выходы южных циклонов (8а+8бл+8вл+12а+12бл+12вл)

Почти во все выбранные засушливые месяцы в большинстве дней с прочими ЭЦМ осадки отсутствуют или были незначительные и только в некоторые дни их количество не превышает 5–10 мм/сут. В августе 1992 г. при зональной циркуляции (ЭЦМ 2б), когда территория Беларуси близко расположена к периферии Азорского антициклона, а выходы южных циклонов смещаются к востоку [6], отмечаются единичные случаи локальных осадков (11–22 мм/сут). В августе 1996 г. при северной меридиональной циркуляции (ЭЦМ 9б), когда к юго-западу Беларуси распространяется отрог Азорского антициклона, на отдельных метеостанциях на юге и юго-востоке Беларуси выявлены 1–3 дня с более интенсивными осадками (до 33–80 мм/сут), связанными с выходами южных циклонов.

Как показано на рис. 3, при продолжительных атмосферных засухах в 50–90 % дней отмечаются циркуляционные условия, способствующие формированию таких засух. В летние месяцы чаще всего наблюдаются стационарные антициклоны на территории Беларуси (примерно в 70 % дней), тогда как во время весенне-летних засух отмечается менее 50 % дней со стационарными антициклонами и преобладают ЭЦМ, с которыми связаны выходы южных циклонов. Проведенные исследования показали, что с последними связаны только локальные интенсивные осадки на территории Беларуси в отдельные дни: максимальное количество составляет 10–28 редко 43–60 мм/сут.

В период длительных засух во все дни (1992, 2018 гг.) или в 67–88 % дней стационарные антициклоны связаны с меридиональной южной циркуляцией (ЭЦМ 13л).

Анализ элементарных циркуляционных механизмов, которые отмечались в различные годы в наиболее влажные месяцы с разным температурным фоном, показал следующие результаты. В мае–июне во влажные месяцы наблюдается уменьшение числа дней с ЭЦМ 13л; оно, как правило, ниже среднего для этих месяцев значения за период потепления климата. В июле–августе таких особенностей не выявлено. Кроме того, во влажный май увеличивается общее число дней с ЭЦМ 2а, 3, 9а, при которых территория Беларуси расположена на периферии стационарных антициклонов. Во многие годы во влажные июнь и июль отмечено увеличение числа дней с выходами южных циклонов на территорию Беларуси (ЭЦМ 8-го и 12-го типов, а также ЭЦМ 2б): в 1,6–4,3 раза больше среднего для этих месяцев значения.

Многолетние изменения общей продолжительности способствующих формированию засух ЭЦМ в теплый период. На основании данных [14] выполнен анализ коэффициентов линейных трендов (α) продолжительности различных ЭЦМ, при которых формируются засухи на территории Беларуси, в теплый период (май–сентябрь) (рис. 4).

Восточные отроги Азорского антициклона располагаются над территорией Беларуси при ЭЦМ 2в, 6, 7ал, относящихся к группам циркуляции зональной и нарушения зональности [6]. В исследуемом периоде (1899–2019 гг.) можно выделить 1959–2019 гг., когда отмечается уменьшение продолжительности ЭЦМ со скоростью 3,6 дней / 10 лет (см. рис. 4, а). Коэффициент корреляции линейного тренда статистически значим (уровень значимости 5 %), однако тренд описывает не более 15 % изменчивости показателя.

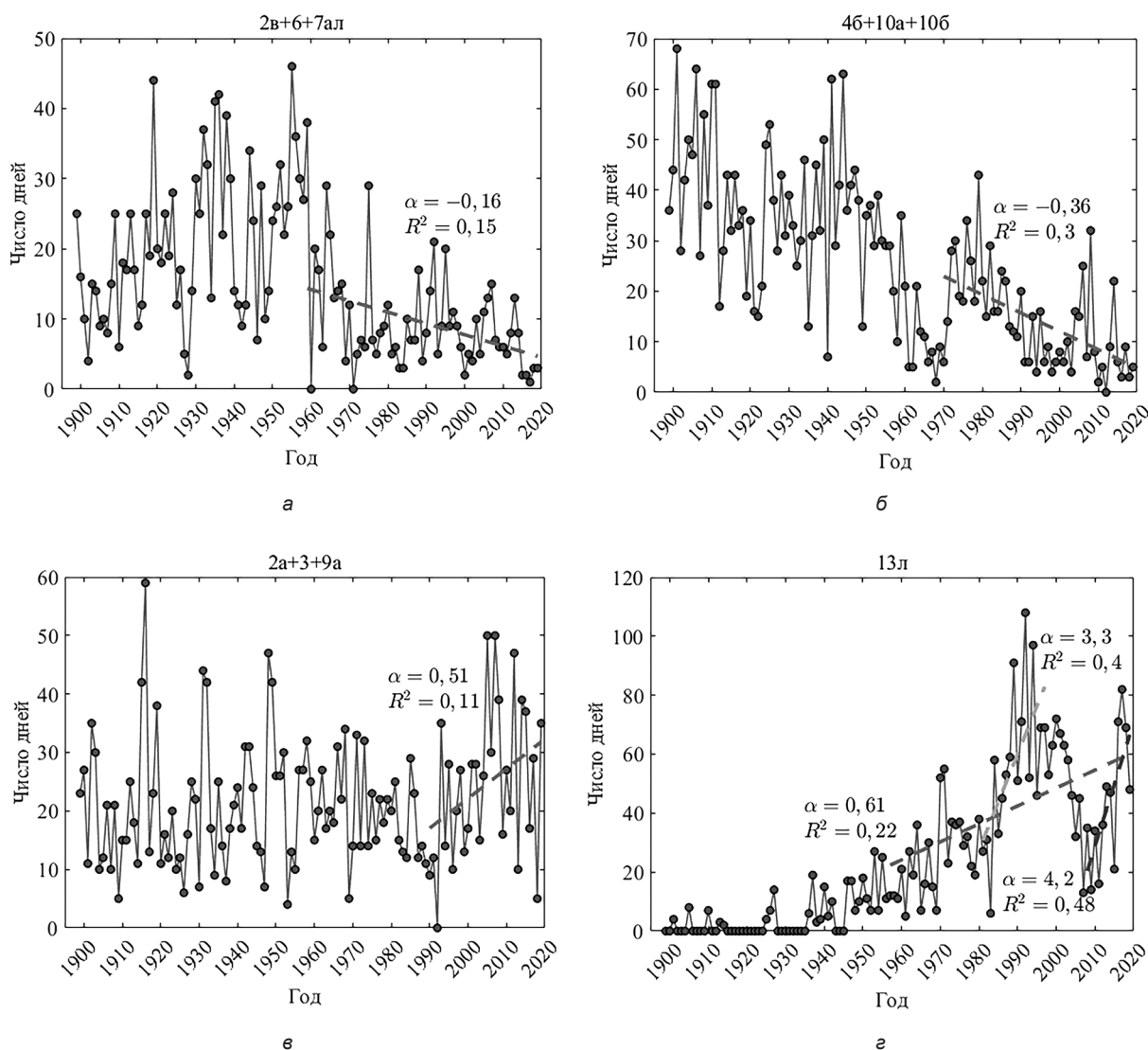


Рис. 4. Линейные тренды изменения количества дней с определенными ЭЦМ с мая по сентябрь:
 а – отроги Азорского антициклона; б – арктические вторжения (блокирующие ЭЦМ);
 в – стационарные антициклоны (периферия); г – стационарные антициклоны,
 связанные с меридиональной южной циркуляцией атмосферы (подтип 13л), на территории Беларуси

Арктические вторжения (блокирующие процессы) представлены ЭЦМ 4б, 10а, 10б, относящимися к группам циркуляции меридиональной северной и нарушения зональности. Для блокирующих процессов на территории Беларуси характерен нисходящий линейный тренд и снижение общего числа дней на 3,6 дня / 10 лет в 1970–2019 гг. (см. рис. 4, б). Коэффициент корреляции исходных значений и расчетных статистически значим (0,55).

Иная тенденция отмечается для изменения продолжительности стационарных антициклонов (см. рис. 4, в, г). Для стационарных антициклонов (ЭЦМ 2а, 3, 9а), западная периферия которых распространяется до границ Беларуси или занимает юго-восток страны, отмечается значительный рост числа дней в 1990–2019 гг. (скорость роста около 5 дней / 10 лет). Коэффициент корреляции линейного тренда значимый (0,33), но находится в пределах статистической ошибки ($Sr = 0,18$).

В изменении продолжительности стационарных антициклонов, связанных с меридиональной южной циркуляцией атмосферы (ЭЦМ 13л), выявлен положительный тренд (скорость линейного роста ~ 6 дней / 10 лет), выраженный для периода с 1957 г. (начало эпохи южной циркуляции). Наибольшая скорость роста (около 30–40 дней / 10 лет) суммарного количества дней со стационарными антициклонами в мае–сентябре выявлена для двух более коротких периодов: 1981–1997 и 2008–2019 гг., когда отмечалось увеличение повторяемости ЭЦМ 13л (см. рис. 4, г). Коэффициент корреляции линейного тренда для периода с 1957 г. ($r = 0,47$) статистически значим с учетом его ошибки.

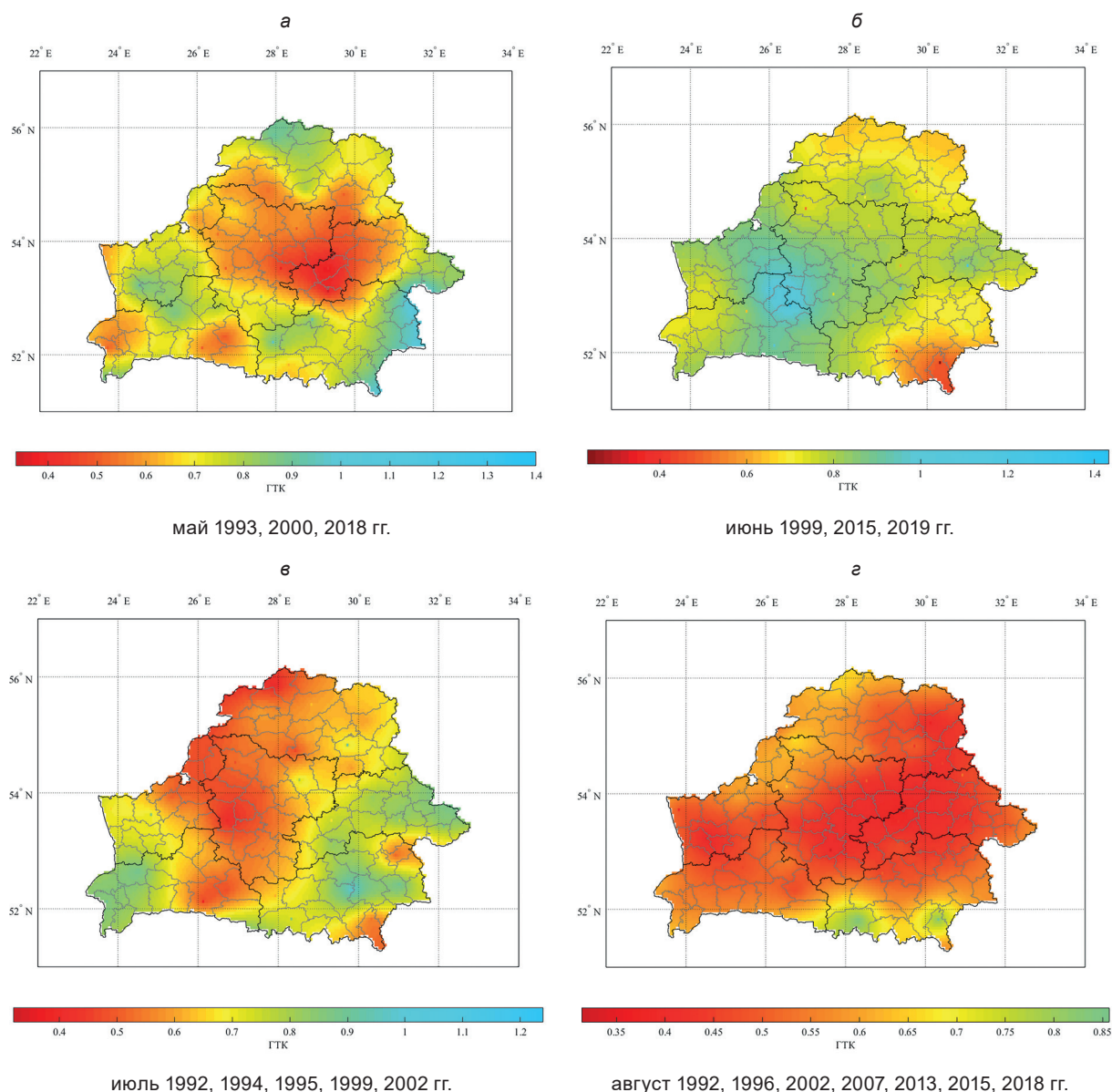


Рис. 5. Пространственное распределение осредненного ГТК за годы с засухами в различные месяцы с мая по август

Для двух коротких периодов коэффициенты корреляции (соответственно 0,63 и 0,69) значимы в пределах их статистических ошибок (соответственно $Sr = 0,20$ и $0,23$).

При сохранении тенденции к увеличению в теплый период числа дней со стационарными антициклонами, в первую очередь связанными с меридиональной южной циркуляцией атмосферы (ЭЦМ 13л), вероятность формирования атмосферной засухи может возрасти главным образом в мае–июне.

Особенности пространственного изменения осредненного гидротермического коэффициента в различные месяцы с атмосферной засухой. Анализ условий увлажнения территории Беларуси (пространственного изменения осредненного ГТК) в различные месяцы с засухой показал, что атмосферные засухи в исследуемые годы отмечались в мае на большей части территории (рис. 5, а): осредненный ГТК составлял 0,5–0,7, локально в центральной и восточной частях страны – до 0,4 и менее. На небольшой по площади территории на севере, западе, крайнем востоке–юго-востоке страны наблюдались засушливые (ГТК до 1,0), редко слабозасушливые условия.

Анализ осредненного ГТК за годы с засухой в июне показал (рис. 5, б), что в этот месяц засуха, как правило, охватывает около 1/2 территории Беларуси: юго-восточный регион, где отмечаются наиболее низкие значения ГТК (<0,4), северную часть страны. Более ограниченное распространение засухи на западе–юго-западе Беларуси (ГТК около 0,7). На остальной территории, за исключением

локального участка на севере Брестской области, отмечаются засушливые условия (ГТК до 1,0), которые можно рассматривать как слабую засуху.

При засухах в июле (рис. 5, в) более чем на половине территории Беларуси наблюдается средняя атмосферная засуха (ГТК до 0,4), которая распространяется на всю Витебскую, Минскую, западную половину Гродненской и Брестской областей, на локальных участках на востоке и юго-востоке страны. На остальной территории отмечаются менее засушливые условия со значениями ГТК до 1,0 (слабая засуха).

В годы с наиболее сухим августом Беларусь почти полностью оказывается в области распространения атмосферной засухи (рис. 5, г), причем на половине территории ГТК составляет около 0,4–0,5. На локальных, небольших по площади участках в Гомельской области в этот месяц отмечаются менее засушливые условия с ГТК до 0,85 (слабая засуха).

Таким образом, в мае, июле на большей части территории страны, в августе почти на всей ее территории наблюдались низкие осредненные значения ГТК за годы с атмосферными засухами в эти месяцы (см. рис. 5). Если в мае полоса с атмосферными засухами вытянута в широтном направлении и охватывает в основном северо-запад, центр и северо-восток Беларуси, то в июле – в субмеридиональном (с северо-востока к югу), занимая север, северо-запад, центральную часть Беларуси и восток Брестской области. В августе атмосферная засуха распространяется по всей территории страны, но полоса с наиболее низкими ГТК вытянута в широтном направлении с запада к востоку–северо-востоку. Существенно отличаются значения и пространственное распределение осредненного ГТК за годы с атмосферной засухой в июне. В каждый выбранный год засуха занимает различные регионы Беларуси, поэтому только на небольшой территории осредненный ГТК соответствует критерию атмосферной засухи.

Пространственное изменение ГТК за годы с засухой в мае–августе позволяет оценить значения ГТК в засушливые годы и выявить территорию, на которой наиболее проявляется атмосферная засуха.

Выводы. 1. Анализ числа дней с элементарными циркуляционными механизмами, отмечавшимися во время засух в различные месяцы и годы в период потепления климата, показал преобладание стационарных антициклонов, особенно в летние месяцы. В отдельные годы увеличивается общая продолжительность блокирующих процессов и нахождения отрога Азорского максимума на территории Беларуси. В некоторые годы (в 3 из 18 случаев засух) в месяцы с засухой преобладали дни с выходами южных циклонов на территорию Беларуси, с которыми связаны лишь локальные осадки и поступление теплого воздуха с субтропических широт.

2. Для большинства лет в месяцы с атмосферными засухами отмечается 55–100 % дней с антициклоническими условиями, способствующими формированию таких засух, а в периоды продолжительных засух (2–3 месяца) – 50–90 % дней с антициклонами над территорией Беларуси. В большинстве лет преобладают стационарные антициклоны, связанные с меридиональной южной циркуляцией атмосферы. Если сравнивать с наиболее влажными месяцами, то только в мае–июне выражено увеличение доли дней с меридиональной южной циркуляцией атмосферы во время засух; в июле–августе такой особенности не выявлено.

3. Выполнен временной анализ изменения продолжительности различных ЭЦМ в мае–сентябре с 1899 по 2019 гг., при которых возможно формирование засух на территории Беларуси. Выявлена тенденция к уменьшению числа дней с распространением на восток Азорского антициклона с 1960 г. и устойчивые нисходящие тренды числа дней с арктическими вторжениями в мае–сентябре с 1970 г. Число дней со стационарными антициклонами устойчиво растет за счет увеличения с 1960-х годов продолжительности меридиональной южной циркуляции атмосферы (ЭЦМ 13л) и роста с 1990 г. продолжительности стационарных антициклонов, периферия которых может заходить на территорию Беларуси (ЭЦМ 2а, 3, 9а).

При сохранении тенденции к увеличению числа дней со стационарными антициклонами, главным образом с летним подтипом меридиональной южной циркуляции 13л, может возрасти вероятность возникновения продолжительных и значительных по площади распространения засух.

4. Выявлены особенности пространственного распределения осредненного гидротермического коэффициента для выделенных лет с засухами в различные месяцы. В августе атмосферная засуха отмечается почти на всей территории Беларуси, в мае и июле – на большей ее части. В июне засуха распространяется в основном на юго-востоке и севере страны. Наибольшая площадь распространения атмосферной засухи, в том числе и более низких значений ГТК, отмечена в августе.

Благодарности. Автор выражает благодарность В. Д. Чернышеву за написание программы для интерполяции значений ГТК на территории Беларуси с учетом данных метеостанций на приграничных территориях.

Список использованных источников

1. *Логинов, В. Ф.* Модельные и эмпирические оценки современных изменений климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 315 с.
2. *Логинов, В. Ф.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
3. *Логинов, В. Ф.* Экстремальные климатические явления: пространственно-временные закономерности их изменений и предпосылки прогнозирования / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка. – Минск: Бел НИЦ «Экология», 2012. – 133 с.
4. *Кононова, Н. К.* Характеристика экстремальных засух конца XX века / Н. К. Кононова // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2017. – Т. 3(13), вып. 1. – С. 35–65.
5. Засухи и динамика синоптических процессов на юге Восточно-Европейской равнины в начале XXI века / Е. А. Черенкова [и др.] // Аридные экосистемы. – 2015. – Т. 21, № 2 (63). – С. 5–15.
6. *Кононова, Н. К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзержевскому / Н. К. Кононова. – М.: Изд-во РАН, Ин-т географии, 2009. – 370 с.
7. *Кононова, Н. К.* Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. / Н. К. Кононова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 3. – С. 108–123.
8. *Кононова, Н. К.* Повторяемость элементарных циркуляционных механизмов в атмосфере Северного полушария / Н. К. Кононова, Е. А. Черенкова // Изв. РАН. Сер. географ. – 2018. – № 6. – С. 17–25.
9. *Кононова, Н. К.* Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в 2019 году / Н. К. Кононова // Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века; материалы VII Междунар. науч.-практич. конф. – Нур-Султан, 2020. – С. 22–26.
10. *Логинов, В. Ф.* Особенности изменения осадков в Белорусском Полесье в современный период / В. Ф. Логинов, В. И. Мельник // Природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С. 108–116.
11. *Черенкова, Е. А.* Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России / Е. А. Черенкова, Н. К. Кононова // Труды ГГО. – 2012. – Вып. 565. – С. 165–187.
12. *Черенкова, Е. А.* Опасная атмосферная засуха на Европейской части России в условиях современного летнего потепления / Е. А. Черенкова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 2. – С. 130–143. – Doi: 10.21513/2410-8758-2017-2-130-143
13. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины / Е. А. Черенкова [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 12. – С. 5–19.
14. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–начале XXI века [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmospheric-circulation.ru>
15. Агроклиматические ресурсы Белорусской ССР. Материалы гидрометеорологических наблюдений / под ред. М. А. Гольберга, В. И. Мельника. – Минск, 1985. – 451 с.
16. *Черенкова, Е. А.* О сравнимости некоторых количественных показателей засухи / Е. А. Черенкова, А. Н. Золотокрылин // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – № 2. – С. 79–94. – DOI 10.21513/2410-8758-2016-2-79-94
17. *Зоидзе, Е. К.* Об одном подходе к исследованию неблагоприятных агроклиматических явлений в условиях изменения климата в Российской Федерации / Е. К. Зоидзе // Метеорология и гидрология. – 2004. – Вып. 1. – С. 96–105.
18. Декадный бюллетень / ВНИИСХМ – Центр мониторинга засух. – 2021. – № 15 (21–30 сентября). – 31 с.

Поступила 01.06.2022