

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

ISSN 1810-9810 (Print)

УДК 551.583 (476)

**Ю. А. Бровка**

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

**ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО УВЛАЖНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ  
В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПРИ СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА**

**Аннотация.** В связи с использованием новых климатических норм, рассчитанных за последний 30-летний период и наиболее полно отражающих современное потепление климата, выполнена оценка атмосферного увлажнения на территории Беларуси в летние месяцы за 1991–2020 гг. с использованием гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), индекса засушливости Педя (S) и стандартизованного индекса осадков (SPI). По результатам исследования в летний период 1991–2020 гг. на большей части Беларуси отмечено достаточное увлажнение по ГТК, слабозасушливые условия по SPI, на половине территории – слабая засуха по S. По всем рассмотренным индексам атмосферного увлажнения слабозасушливые условия сформировались в августе в южной и центральной широтных зонах Беларуси. Определена повторяемость засушливых и избыточно влажных условий по гидротермическому коэффициенту в летние месяцы в период потепления климата. Наибольшей засушливостью отличается август: на половине территории страны повторяемость атмосферной засухи составляет 30–50 %. Избыточное увлажнение чаще всего отмечается в июле, когда на большей части территории повторяемость избыточного увлажнения составляет 40–70 %. По сравнению с периодом 1961–1990 гг. повторяемость атмосферных засух максимально увеличивается в августе в Брестской и Гродненской обл. (на 16–17 %). Повторяемость избыточного атмосферного увлажнения значительно снижается в июне в Гродненской, Минской и Могилевской обл. (на 14–19%), в августе – во всех (на 12–17%), кроме Витебской. Выполнены прогнозные оценки изменения гидротермического коэффициента в областях Беларуси в последующий 30-летний период при различных сценариях выбросов парниковых газов. Увлажнение уменьшится от оптимальных до слабозасушливых условий в июле; в августе сохранятся слабозасушливые условия или сформируются засушливые условия в южных областях; в июне условия увлажнения не изменятся и будут оптимальными.

**Ключевые слова:** изменение климата, индексы атмосферного увлажнения, засуха, избыточное увлажнение

**Yu. A. Brovka**

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

**FEATURES OF ATMOSPHERIC HUMIDIFICATION ON THE TERRITORY OF BELARUS  
IN SUMMER UNDER MODERN CLIMATE CHANGE**

**Abstract.** Due to implementation of new climatic norms calculated for the last 30-year period, that most fully reflect the present-day climate warming, an assessment of atmospheric humidification in the territory of Belarus in the summer months for 1991–2020 has been carried out using the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC), the Ped' aridity index (S) and the standardized precipitation index (SPI). According to the results of the study, in the summer period 1991–2020 most of the territory of Belarus was characterized by sufficient humidity levels according to HTC, slightly dry conditions according to SPI, and in half of the territory there was a slight drought according to S. All considered indices of atmospheric humidity indicate the formation of slightly arid conditions formed in August in the southern and central latitudinal zones of Belarus. The recurrence of dry and excessively humid conditions by the hydrothermal coefficient during summer months in the period of climate warming was determined. August is characterised by the most significant aridity: in half of the country's territory the recurrence of atmospheric drought is 30–50 %. Excessive humidity is most often observed in July, when in most parts of the territory the recurrence of excessive humidity is 40–70 %. Compared to the period 1961–1990, the recurrence of atmospheric droughts is maximally increases in August in Brest and Grodno regions (by 16–17 %). The recurrence of excessive atmospheric moisture significantly decreases in June in Grodno, Minsk and Mogilev regions (by 14–19 %), in August – in all regions but Vitebsk (by 12–17 %). Forecast estimations of changes in the hydrothermal coefficient in the regions of Belarus in the subsequent 30-year period under different scenarios of greenhouse gas emissions have been carried out. Humidification will decrease from optimal to slightly dry conditions in July, slightly dry conditions will persist in August or dry conditions will form in southern regions, in June humidification conditions will not change and will be optimal.

**Keywords:** climate change, atmospheric moisture indices, drought, excess humidity

Ю. А. Броўка

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

### АСАБЛІВАСЦІ АТМАСФЕРНАГА ЎВІЛЬГАТНЕННЯ НА ТЭРЫТОРЫІ БЕЛАРУСІ Ў ЛЕТНІ ПЕРЫЯД ПРЫ СУЧАСНЫМ ЗМЯНЕННІ КЛІМАТУ

**Анацыя.** У сувязі з выкарыстаннем новых кліматычных норм, якія разлічаны за апошні 30-гадовы перыяд і найбольш поўна адлюстроўваюць сучаснае пацяпленне клімату, выканана ацэнка атмасфернага ўвільгатнення на тэрыторыі Беларусі ў летнія месяцы за 1991–2020 гг. з выкарыстаннем гідратэрмічнага каэфіцыента Селянінава (ГТК), індэкса засушлівасці Педзя (S) і стандартызаванага індэкса ападкаў (SPI). Па выніках даследавання ў летні перыяд 1991–2020 гг. на большай частцы Беларусі адзначана дастатковае ўвільгатненне па ГТК, слабазасушлівыя ўмовы па SPI, на палове тэрыторыі – слабая засуха па S. Па ўсіх разгледжаных індэксах атмасфернага ўвільгатнення слабазасушлівыя ўмовы сфарміраваліся ў жніўні ў паўднёвай і цэнтральнай шыротных зонах Беларусі. Вызначана паўтаральнасць засушлівых і залішне вільготных умоў па гідратэрмічным каэфіцыенте ў летнія месяцы ў перыяд пацяплення клімату. Найбольшай засушлівасцю адрозніваецца жнівень: на палове тэрыторыі краіны паўтаральнасць атмасфернай засухі складае 30–50 %. Залішняе ўвільгатненне часцей за ўсё адзначаецца ў ліпені, калі на большай частцы тэрыторыі паўтаральнасць залішняга ўвільгатнення складае 40–70 %. У параўнанні з перыядам 1961–1990 гг. паўтаральнасць атмасферных засух максімальна павялічваецца ў жніўні ў Брэсцкай і Гродзенскай абл. (на 16–17 %). Паўтаральнасць залішняга атмасфернага ўвільгатнення значна зніжаецца ў чэрвені ў Гродзенскай, Мінскай і Магілёўскай абл. (на 14–19 %), у жніўні – ва ўсіх (на 12–17 %), акрамя Віцебскай. Выкананы прагнозы ацэнкі змянення ГТК у абласцях Беларусі ў наступны 30-гадовы перыяд пры розных сцэнарыях выкідаў парніковых газаў. Увільгатненне паменшыцца ад аптымальных да слабазасушлівых умоў у ліпені; у жніўні захаваецца слабазасушлівыя ўмовы або сфармуецца засушлівыя ўмовы ў паўднёвых абласцях; у чэрвені ўмовы ўвільгатнення не змяняцца і будуць аптымальнымі.

**Ключавыя словы:** змяненне клімату, індэкс атмасфернага ўвільгатнення, засуха, залішняе ўвільгатненне

**Ввядзенне.** На фоне глабальнага росту среднегодовой температуры воздуха для территории Беларуси с конца 1980-х гг. отмечается потепление климата, которое продолжается и до настоящего времени. По утверждению некоторых ученых [1], до 1990 г. отмечался быстрый рост зимней температуры, в последующие 30 лет скорость летнего потепления в 1,7 раза превышает скорость потепления зимой. С начала текущего столетия по сравнению с 1980–1999 гг. значительно увеличилась вероятность высоких среднесуточных температур летом и частоты возникновения волн тепла, их продолжительности и интенсивности. Оценка условий влагообеспеченности территории Беларуси [1] показала отрицательный баланс между среднегодовым количеством осадков и испаряемостью в южных областях в период 2000–2019 гг., тогда как в предыдущие 20 лет годовое количество осадков превышало испаряемость на всей территории страны. Это свидетельствует об увеличении засушливости климата на юге Беларуси.

Исследование изменений в режиме увлажнения на территории Беларуси [2] показало, что в 1989–2019 гг. по сравнению с уровнем 1948–1988 гг. в летний сезон отмечалось сокращение продолжительности выпадения осадков на 10–20 % (за исключением севера страны) и увеличение максимальных сумм осадков на 20–30 %, особенно на юге страны.

Увеличение засушливости в период потепления климата Беларуси подтверждается анализом повторяемости атмосферных засух с использованием стандартизированного индекса осадков [2, 3]. Выявлен рост повторяемости атмосферных засух различных градаций (экстремальная, сильная, умеренная, слабая засуха) от 2 до 26 % в апреле – октябре. На большинстве анализируемых станций увеличивается повторяемость засухи хотя бы одной из градаций. Анализ динамики стандартизированного индекса осадков в летние месяцы за период 1971–2020 гг. показал статистически значимое увеличение засушливости на западе, юго-востоке и локально в северном регионе [3]. Наибольшее снижение стандартизированного индекса осадков за отдельные месяцы отмечено в июне на большей части страны, в августе наблюдается рост засушливости на отдельных станциях юга Беларуси.

В период потепления по сравнению с 1960–1988 гг. отмечено уменьшение увлажнения по гидро-термическому коэффициенту до слабозасушливых и засушливых условий в августе на большей части территории (южнее 54° с. ш.), в июне на юго-востоке и юго-западе страны [4]. В июле наблюдалось увеличение увлажнения (избыточное увлажнение на юге и западе Беларуси).

По результатам исследований [5, 6] на территории Беларуси за период потепления 1989–2021 гг. просматривается тенденция к снижению влагозапасов в верхнем слое почвы, наиболее выраженное в Гомельской обл. Наибольшая повторяемость почвенных засух во всех областях (максимальная в Белорусском Полесье [6]) отмечена в летние месяцы. Выявлена цикличность (9–12 лет) динамики территориального охвата почвенной засухи и максимальной повторяемости засух, включая сильные [5, 6]. Результаты оценки уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к почвенным засухам представлены в работах [7, 8].

В условиях современного изменения климата как на глобальном, так и региональном уровне и с учетом рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) рассчитывать климатические нормы за последний 30-летний период в практику национальных гидрометеорологических служб, в том числе и Республики Беларусь, внедрены климатические нормы 1991–2020 гг., характеризующие период потепления климата.

В связи с этим актуальной является оценка атмосферного увлажнения и повторяемости аномальных его значений на территории Беларуси за указанный период в летние месяцы, когда наиболее выражено потепление [1].

Существует ряд показателей для оценки условий увлажнения, в том числе засух. Для европейской части России и территории бывшего Советского Союза [9] разработаны индекс засушливости Г. Н. Высоцкого, показатель засушливости П. И. Колоскова, баланс увлажнения Р. Э. Давида, гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, показатель засушливости Н. В. Бова, коэффициент увлажнения Н. Н. Иванова, показатель сухости климата В. П. Попова, радиационный индекс сухости М. И. Будыко, показатель увлажнения С. И. Костина, коэффициент увлажнения С. А. Сапожниковой, показатель влагообеспеченности А. В. Процера, показатель атмосферного увлажнения Д. И. Шашко, индекс засушливости Д. А. Педя, коэффициент увлажнения Е. С. Улановой и др. В последние три десятилетия наиболее используемыми показателями для оценки засух на сопредельных с Беларусью территориях стран СНГ являются показатели изменения температуры и осадков: ГТК Г. Т. Селянинова, индекс Д. А. Педя [10–12]. Кроме того широкое распространение получили наиболее известные за рубежом количественные показатели засухи – индекс суровости засухи Палмера (PDSI, Palmer Drought Severity Index), стандартизованный индекс осадков (SPI, Standardized Precipitation Index) и стандартизованный индекс осадков, испаряемости (SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) [10, 13–16].

В работе выполнена оценка атмосферного увлажнения на территории Беларуси в июне – августе за период новых климатических норм (1991–2020 гг.) с использованием гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (ГТК), индекса засушливости Д. А. Педя (S), стандартизованного индекса осадков SPI. Проведена пространственная оценка повторяемости аномально засушливых и влажных условий по ГТК в летние месяцы в период потепления климата, оценка изменений по сравнению с предыдущим 30-летним периодом средней для областей Беларуси повторяемости аномального атмосферного увлажнения. Сделаны прогнозные оценки изменения ГТК в областях Беларуси в последующий 30-летний период при различных сценариях выбросов парниковых газов.

**Материалы и методика исследований.** Для оценки атмосферного увлажнения в Беларуси, расчета повторяемости аномальных условий увлажнения (атмосферная засуха, избыточное увлажнение) на основании многолетних данных наблюдений в работе используются различные количественные показатели и критерии.

ГТК представляет собой отношение суммы осадков за определенное время к сумме активных температур выше 10 °С, уменьшенной в 10 раз за тот же промежуток (уравнение 1):

$$\text{ГТК} = \frac{R}{0,1 \sum T \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}}, \quad (1)$$

где  $R$  – сумма осадков;  $0,1 \sum T \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}$  – сумма активных температур воздуха выше 10 °С.

При пространственно-временном анализе ГТК в работе использована градация и соответствующие характеристики условий увлажнения территории, принятые в Белгидромете [17]: более 1,6 – избыточно 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. В литературе приведены различные классификации интенсивности засух по значениям ГТК [13, 15, 18, 19]. В данной работе использованы следующие категории степени засухи, соответствующие указанным в [17] градациям ГТК: экстремальная засуха (ГТК 0,2 и менее); сильная (менее 0,4); средняя (0,4...0,7); слабая атмосферная засуха (ГТК 0,71...1,0).

Показатель засушливости Д. А. Педя (уравнение 2) учитывает аномалии (отклонение от нормы 1961–1990 гг.) температуры воздуха и осадков и их среднеквадратическое отклонение за весь исследуемый период:

$$S = \frac{\Delta T}{\sigma(T)} - \frac{\Delta R}{\sigma(R)}, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  – аномалия температуры воздуха;  $\Delta R$  – аномалия суммы осадков;  $\sigma(T)$  – среднеквадратическое отклонение температуры воздуха,  $\sigma(R)$  – среднеквадратическое отклонение суммы осадков.

Использованы следующие градации условий увлажнения и степени засухи [10, 20, 21]:  $S > 2$  – засуха;  $1 < S \leq 2$  – засушливые условия;  $-1 \leq S \leq 1$  – нормальные условия увлажнения;  $-2 \leq S < -1$  – влажные условия;  $S < -2$  – избыточное увлажнение.

Значения  $1,0 < S \leq 2,0$  рассматриваются как слабая засуха;  $S > 2,0$  – средняя засуха;  $S > 3,0$  – сильная засуха;  $S > 4,0$  – экстремальная засуха.

В 2009 г. ВМО рекомендовала использовать SPI странам в качестве основного метеорологического индекса засушливости для мониторинга и отслеживания условий засушливости [22], который рассчитывается с помощью программы SPIGenerator Национального центра по смягчению последствий засухи США (<https://drought.unl.edu/monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>). Расчет включает преобразование временных рядов месячных сумм осадков с использованием гамма-распределения и последующее нормирование полученных вероятностей.

Классификация атмосферного увлажнения по SPI [23]:  $-2$  и менее – экстремальная,  $-1,99 \dots -1,5$  – сильная,  $-1,49 \dots -1$  – умеренная засуха,  $-0,99 \dots 0$  – слабая засуха,  $0 \dots 0,99$  – нормальное увлажнение,  $1 \dots 1,49$  – умеренное увлажнение,  $1,5 \dots 1,99$  – избыточное увлажнение,  $2,0$  и более – экстремальное увлажнение.

В качестве исходных данных использованы результаты наблюдений за температурой воздуха и количеством осадков на 48 метеостанциях Беларуси, указанных далее на рисунках. Для построения карт пространственного распределения исследуемых индексов увлажнения использовался программный пакет ArcGis.

**Результаты и их обсуждение.** Выполнен анализ пространственного распределения индексов атмосферного увлажнения с июня по август и за весь летний период в соответствии с новыми климатическими нормами ВМО (1991–2020 гг.).

В летний период на большей части территории Беларуси отмечаются оптимальные условия атмосферного увлажнения по ГТК (рис. 1, а). Слабозасушливые условия сформировались в западной части Гродненской, Брестской обл., восточной половине Гомельской обл. (наименьшие значения ГТК).

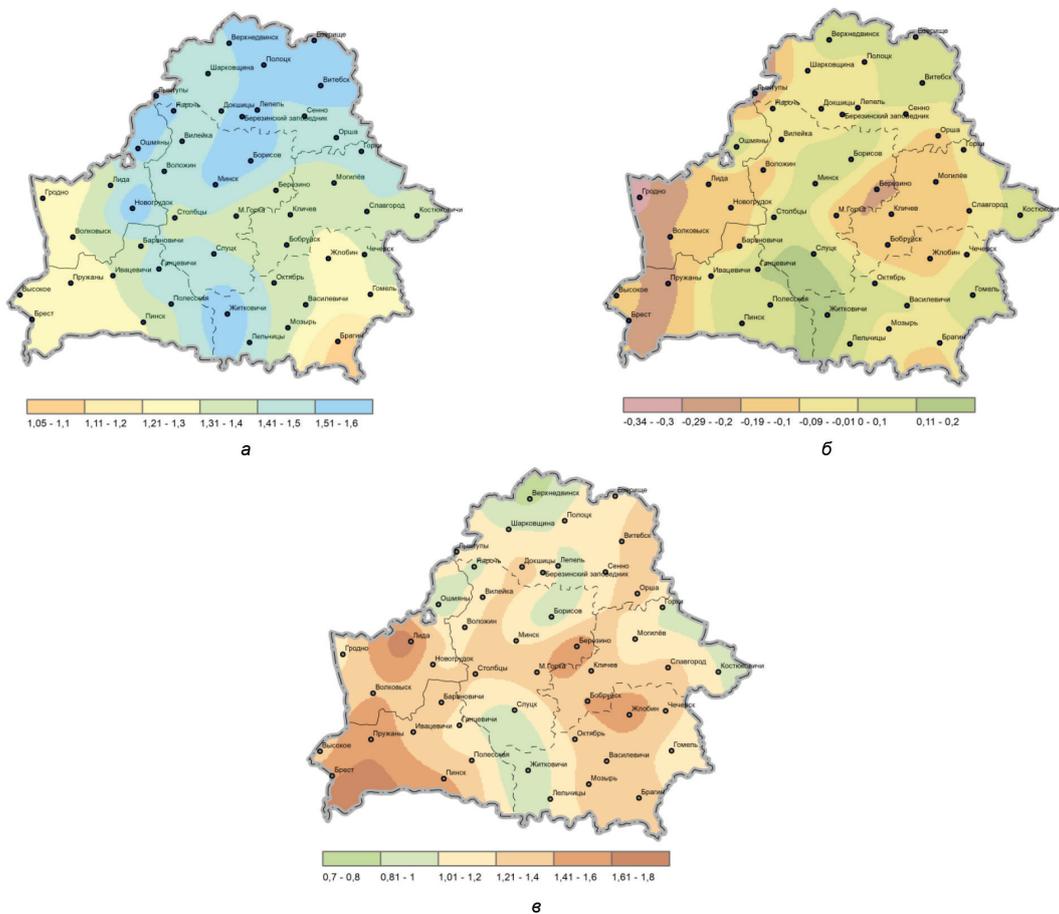


Рис. 1. Пространственное изменение средних показателей атмосферного увлажнения на территории Беларуси в июне – августе 1991–2020 гг.: а – гидротермического коэффициента Селянинова; б – стандартизированного индекса осадков, в – индекса Педя (желтым, оранжевым и коричневым цветами показаны засушливые условия)

В летний период достаточное атмосферное увлажнение по SPI сформировалось локально в разных регионах страны и наиболее распространено на юге (рис. 1, б). Для большей части территории характерна слабая засуха, наиболее выраженная (SPI от  $-0,1$  до  $-0,3$ ) в Гродненской обл., западных частях Брестской и Могилевской обл. По индексу Педя в летний период 1991–2020 гг. в сравнении с нормой 1961–1990 гг. для половины территории Беларуси отмечены засушливые условия (слабая засуха) (рис. 1, в). Индекс Педя увеличивается на юго-западе и западе.

Если рассматривать пространственное распределение ГТК в отдельные месяцы периода потепления климата, то в июне (рис. 2, а) более половины территории Беларуси характеризуется достаточным увлажнением, слабозасушливые условия занимают значительную площадь на юго-востоке, юго-западе и западе, переувлажнение отмечается преимущественно на севере Витебской обл. и локально на западе и юге страны.

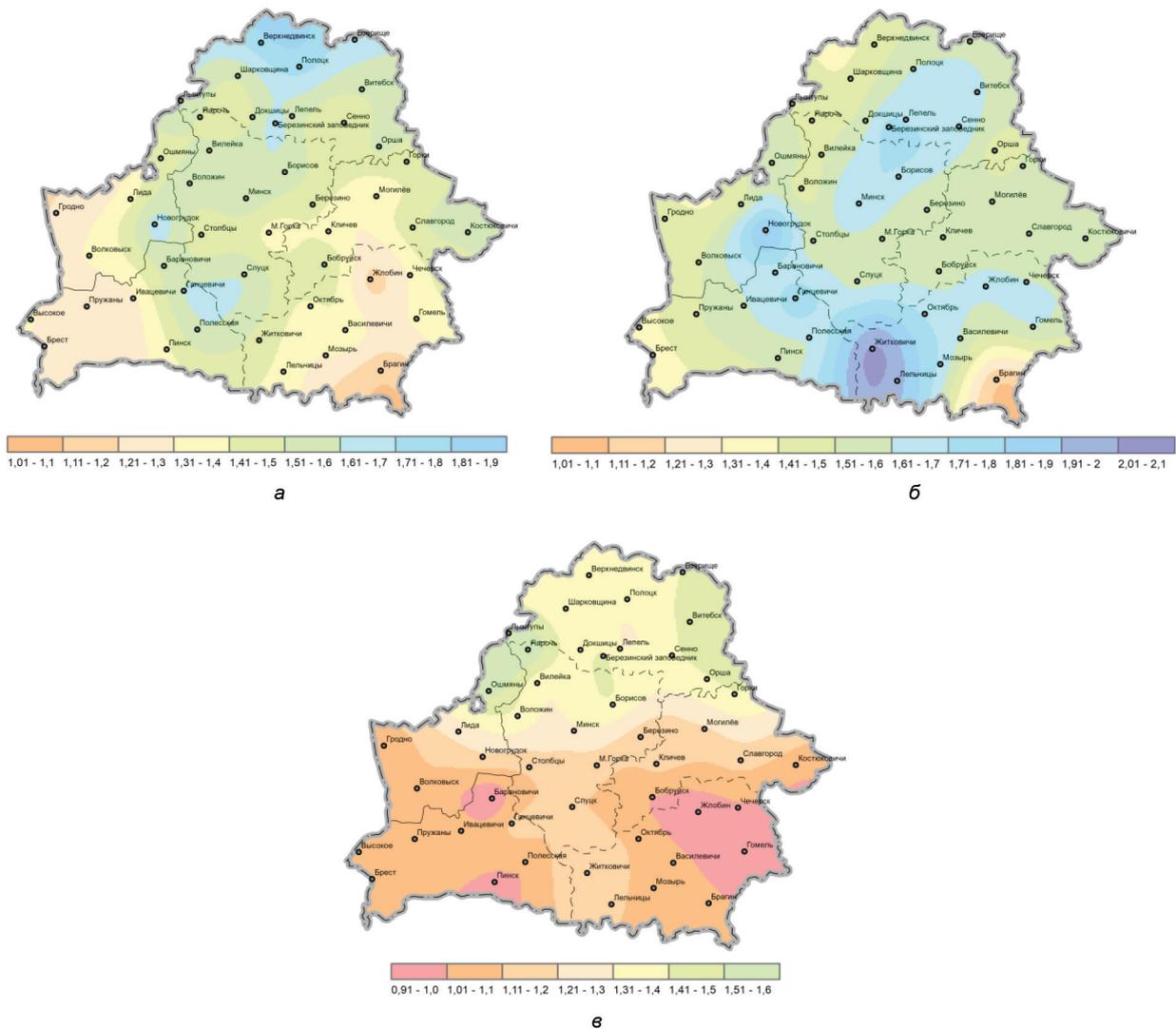


Рис. 2. Пространственное изменение гидротермического коэффициента Селянинова на территории Беларуси в летние месяцы 1991–2020 гг.

В июле (рис. 2, б) также преобладают оптимальные условия увлажнения территории, увеличивается площадь распространения избыточного увлажнения: главным образом южная часть Беларуси (на метеостанции «Житковичи» ГТК до 2,0), восток Гродненской, часть Витебской и Минской обл. На крайнем юго-востоке страны сохраняются слабозасушливые условия. Для августа (рис. 2, в) отмечаются слабозасушливые условия на большей части территории (южная и центральная широтные зоны Беларуси), на востоке и локально в Брестской обл. – слабая засуха (ГТК около 1,0). Северная часть страны характеризуется увлажнением в пределах нормы (на северо-западе ГТК до 1,6).

Пространственное изменение SPI в летние месяцы представлено на рис. 3. В июне на большей части территории Беларуси наблюдаются слабозасушливые условия, наиболее выраженные в западной и юго-западной ее частях (SPI до  $-0,35$ ), локально на востоке, юге и севере Беларуси отмечается нормальное атмосферное увлажнение (см. рис. 3, а). В июле территориально преобладает достаточное увлажнение, только на северо-востоке, северо-западе и западе сформировалась слабая засуха по SPI (см. рис. 3, б). В августе она охватывает всю территорию Беларуси, наименьшие значения SPI ( $-0,2...-0,4$ ) отмечаются в южной и центральной ее полосе (см. рис. 3, в).

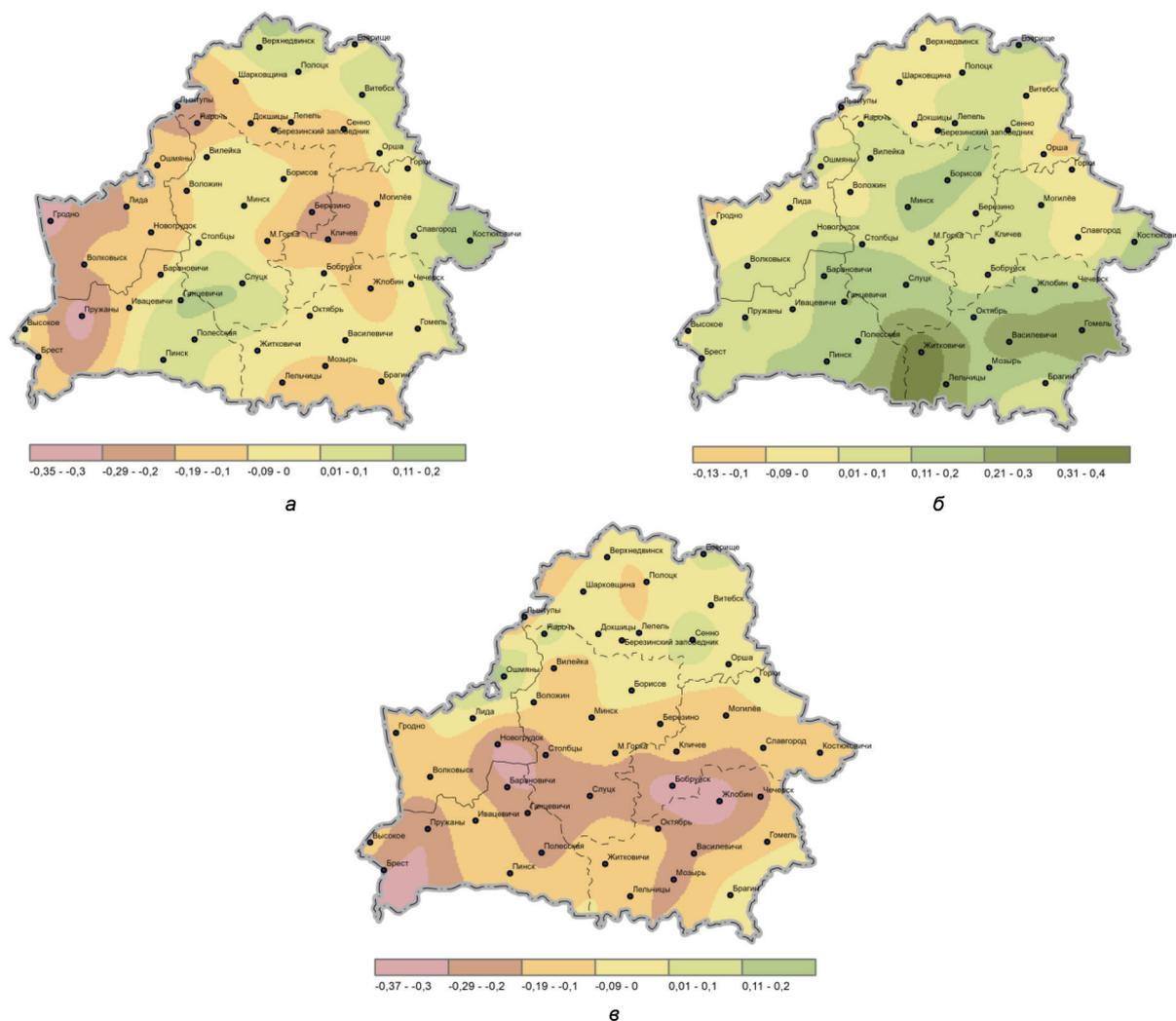


Рис. 3. Пространственное изменение стандартизированного индекса осадков на территории Беларуси в летние месяцы 1991–2020 гг. (зеленым цветом показано нормальное увлажнение, желтым и коричневым – слабая засуха)

По индексу Педя в июне (рис. 4, а) и июле (рис. 4, б) почти на всей территории наблюдаются нормальные условия увлажнения с положительными значениями  $S$ , локально на юге, а в июле и на северо-востоке сформировались засушливые условия. На большей части территории Беларуси, главным образом в южной и центральной широтных областях, засушливые условия получили распространение в августе (рис. 4, в).

Следует отметить, что приведенные выше результаты дают осредненную за 1991–2020 гг. оценку атмосферного увлажнения в летний период на территории Беларуси, хотя в отдельные годы на большей части территории страны в один или несколько летних месяцев отмечалось избыточное увлажнение (1993, 1997, 1998, 2000, 2006, 2007 (июль), 2009, 2012, 2018 (июль) гг.) или атмосферная засуха (1992, 1994, 1995, 1996, 1999, 2002, 2007 (август), 2010, 2013, 2015, 2018 (август), 2019 гг.).

В летние месяцы, особенно в августе, отмечаются статистически значимые коэффициенты пространственной корреляции между индексами (таблица).

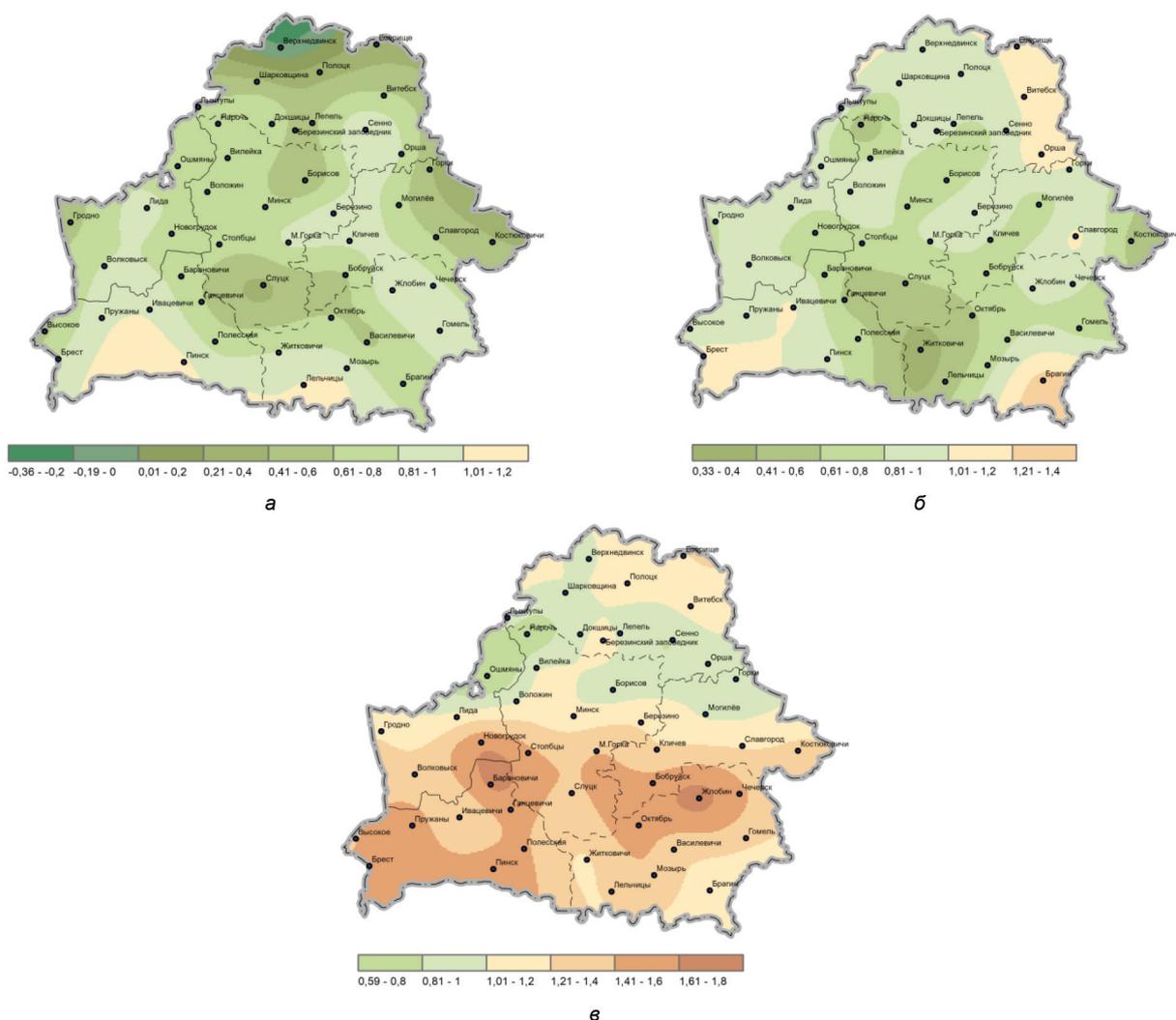


Рис. 4. Пространственное изменение индекса засушливости Педя на территории Беларуси в летние месяцы 1991–2020 гг. (зеленым цветом показаны нормальные условия увлажнения, коричневым – засушливые)

**Коэффициенты пространственной корреляции (*r*) индексов атмосферного увлажнения в летние месяцы 1991–2020 гг.**

Индексы	Месяц		
	июнь	июль	август
ГТК–S	<b>-0,61</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,85</b>
ГТК–SPI	<b>0,47</b>	<b>0,54</b>	<b>0,72</b>
S–SPI	<b>-0,41</b>	<b>-0,61</b>	<b>-0,86</b>

Примечание. Шрифтом показаны статистически значимые коэффициенты парной корреляции ( $r \geq 0,35$  при уровне значимости  $\alpha = 0,01$ ).

Оценка изменения повторяемости атмосферной засухи по ГТК (0,7 и менее) и избыточного увлажнения (более 1,6) с июня по август за период 1991–2020 гг. показала следующие результаты (рис. 5, а, б).

В период современного потепления климата (1991–2020 гг.) повторяемость июньских засух увеличивается на юго-востоке страны до максимальных значений (28–42 %), а также на локальных территориях на западе, северо-западе, юге Беларуси (21–28 %). В июле частота засух возрастает в западной половине страны, локально на северо-востоке и юго-востоке и составляет от 21 до 28–33 %. В августе, самом засушливом месяце, примерно для половины территории Беларуси (южная и центральная широтные зоны и северо-восток страны) повторяемость атмосферной засухи составляет 30–50 %, максимальные значения отмечаются преимущественно на юго-востоке, западе Беларуси.

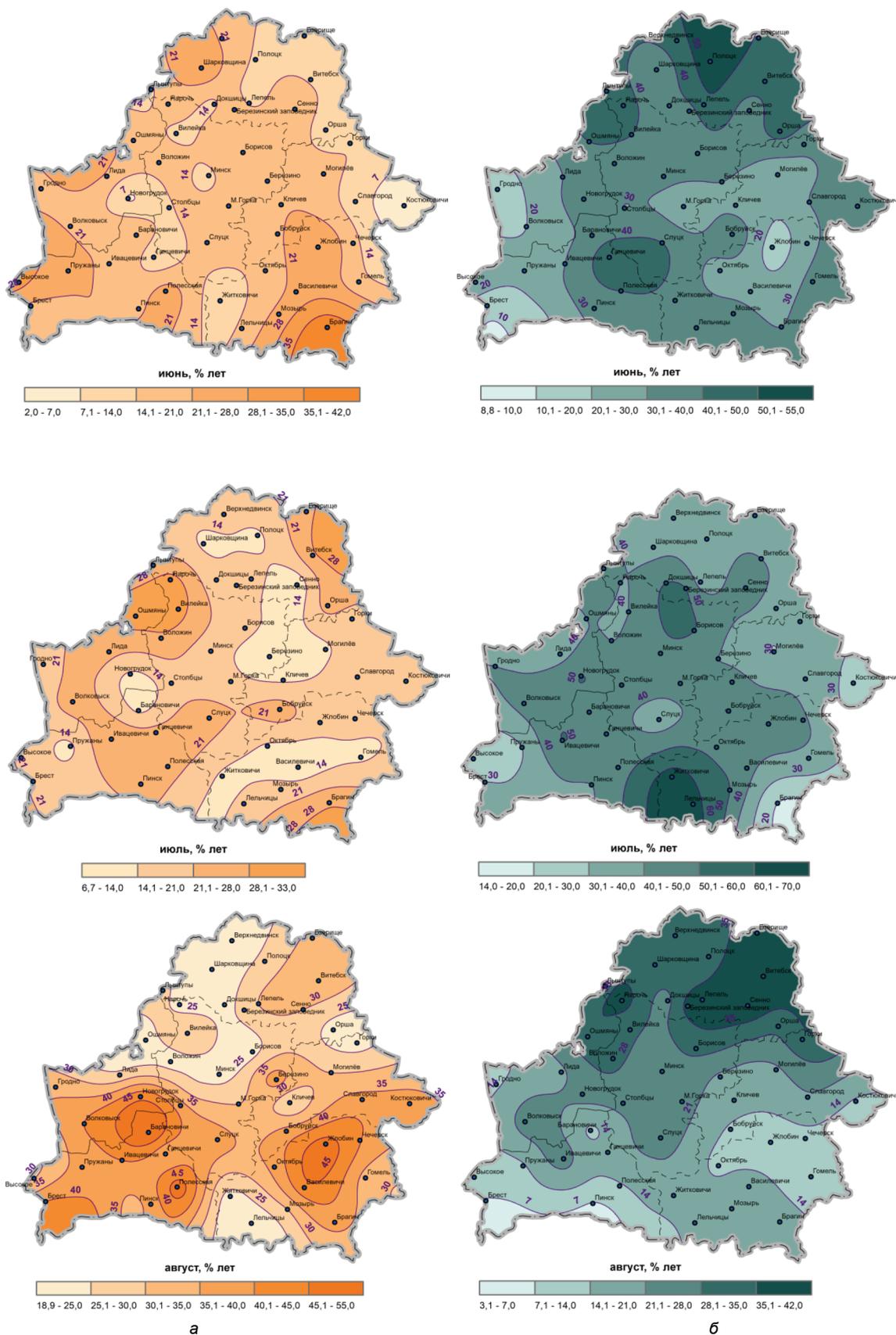


Рис. 5. Пространственное изменение повторяемости атмосферных засух (а) и избыточного атмосферного увлажнения (б) в период потепления климата 1991–2020 гг.

Избыточное атмосферное увлажнение в период потепления климата чаще отмечается в июле (см. рис. 5, б). На большей части территории повторяемость избыточного увлажнения в июле составляет 40–70 %, максимальные ее значения наблюдаются на юге Беларуси (метеостанция «Житковичи»). Избыточное увлажнение в июне и особенно в августе на большей части Беларуси отмечается реже. Наибольшая его повторяемость выявлена на севере и локально на Полесье в июне (40–55 %) и на северо-востоке страны в августе (35–42 %).

Выполнена оценка изменений средней для областей Беларуси повторяемости аномального атмосферного увлажнения в июне – августе в 1991–2020 гг. по сравнению с предыдущим 30-летним периодом (рис. 6).

Увеличение повторяемости атмосферных засух во всех областях выявлено в августе (наибольшее в Брестской и Гродненской обл. – на 16–17 %) и июне (максимальное на юге страны – на 9–10 %). Повторяемость атмосферных засух в июле увеличилась на 6–7 % в большинстве областей и почти не изменилась в Гомельской и Гродненской обл. Повторяемость избыточного атмосферного увлажнения возросла в июле во многих областях (максимально в Брестской обл. – на 10 %), несколько уменьшился показатель в Могилевской обл. Снижение повторяемости высокого увлажнения отмечено в июне на всей территории страны, наиболее значительное – в Могилевской обл. (на 19 %), в Минской и Гродненской обл. (на 15–16 %). Существенно уменьшается повторяемость (на 12–17 %) избыточного атмосферного увлажнения в августе во всех регионах, кроме Витебской обл.

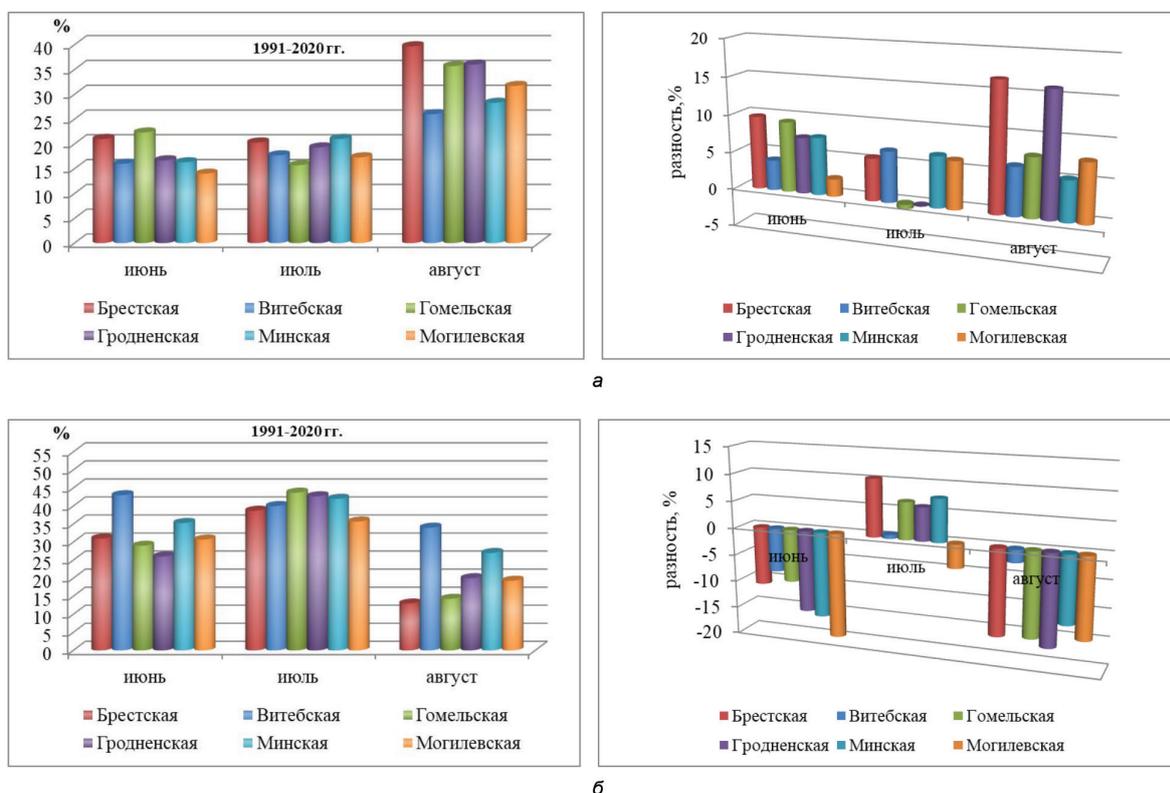


Рис. 6. Средняя для областей повторяемость и разность повторяемости по сравнению с 1961–1990 гг.: а – атмосферной засухи (% лет с ГТК 0,7 и менее); б – избыточного увлажнения (% лет с ГТК более 1,6) в июне–августе 1991–2020 гг.

В лаборатории климатических исследований Института природопользования НАН Беларуси с использованием глобальных климатических моделей CMIP6 для четырех сценариев антропогенного радиационного воздействия рассчитаны регионально адаптированные проекции изменения месячных и сезонных значений температуры воздуха, осадков в областях Беларуси на конец текущего столетия [24].

Рассмотрены сценарии с высокими (SSP3-7.0) и очень высокими (SSP5-8.5) выбросами парниковых газов и выбросами CO<sub>2</sub>, которые увеличатся в 2 раза к 2100 и 2050 гг. соответственно; сценарий с промежуточным уровнем (SSP2-4.5) выбросов парниковых газов и выбросами CO<sub>2</sub>, которые сохранятся примерно на текущем уровне до середины века; сценарий с низкими уровнями (SSP1-2.6) выбросов парниковых газов и выбросами CO<sub>2</sub>, снижающимися до нуля после 2050 г. [25].

С использованием полученных проекций изменения климатических параметров на территории Беларуси выполнена оценка изменений температуры воздуха и суммарного количества осадков в летние месяцы в областях Беларуси в 2021–2050 гг. по сравнению с показателями предыдущего тридцатилетия (1991–2020 гг.), принятыми в качестве климатической нормы.

На основании прогнозных значений средней температуры воздуха и количества осадков в 2021–2050 гг. рассчитаны средние значения гидротермического коэффициента с июня по август, в целом летний период для областей Беларуси (рис. 7). Выявлены изменения ГТК по сравнению с климатической нормой 1991–2020 гг.

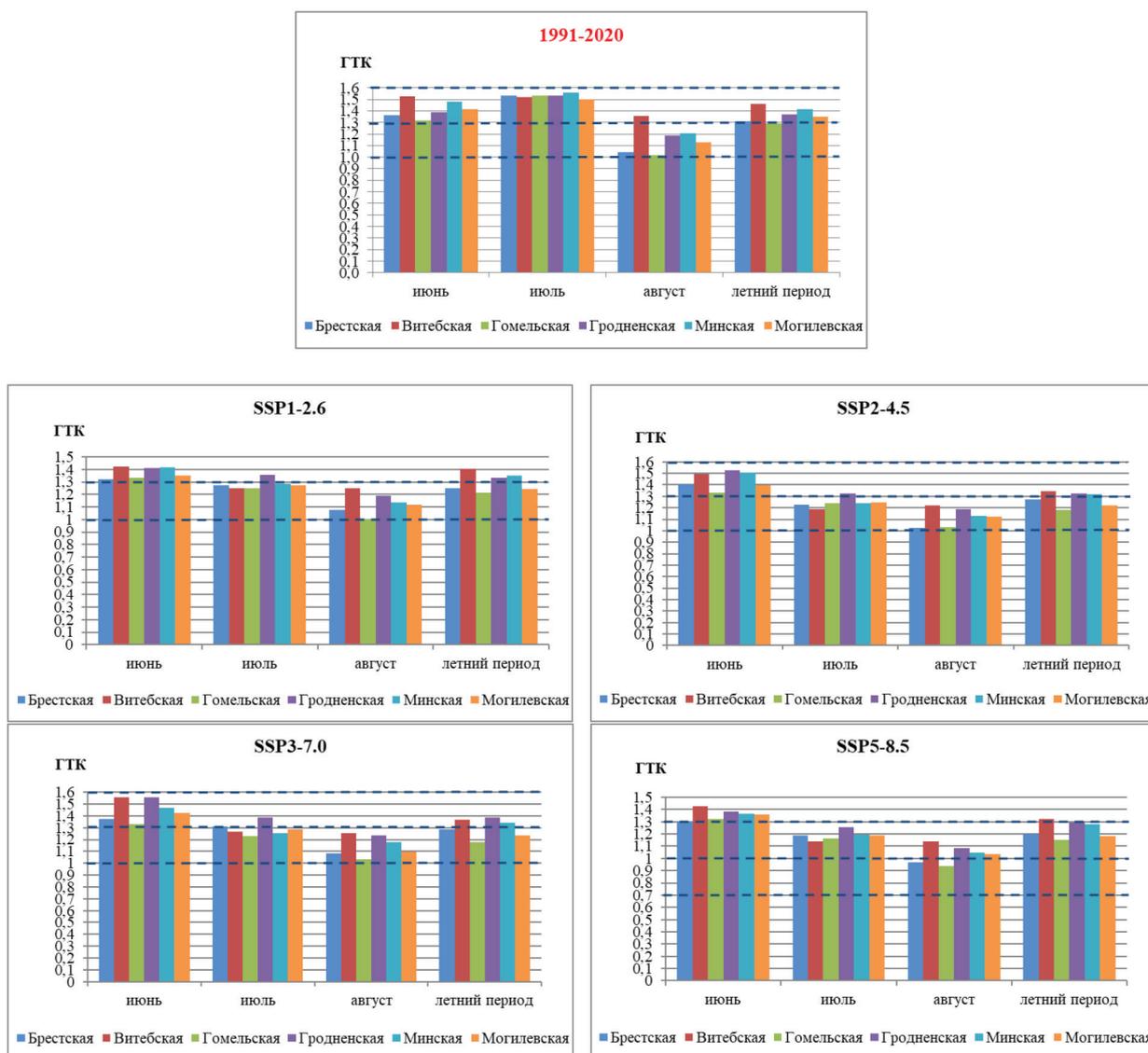


Рис. 7. Прогнозные значения гидротермического коэффициента в 2021–2050 гг. для различных сценариев выбросов парниковых газов по сравнению с климатической нормой (1991–2020 гг.)

По климатической норме 1991–2020 гг. оптимальные условия увлажнения отмечаются в июне – июле во всех регионах, в августе – только в Витебской обл. Для большей части территории Беларуси характерны слабозасушливые условия в августе. Летний период в целом характеризуется достаточным увлажнением, причем для южных областей оно соответствует нижней границе оптимума.

По сценариям SSP1-2.6 и SSP2-4.5 слабозасушливые условия (ГТК 1,0–1,3) прогнозируются в августе на всей территории Беларуси, а также в июле во всех областях, кроме Гродненской. Для сценария SSP3-7.0 отмечаются слабозасушливые условия в августе на всей территории, в июне – в четырех областях, за исключением Брестской и Гродненской. По сценарию SSP5-8.5 прогнозируются слабо-

засушливые условия в июле во всех регионах Беларуси, в августе – в большинстве областей. Будут также наблюдаться засушливые условия (ГТК менее 1,0) в августе в южных областях. В июне будут сохраняться оптимальные условия увлажнения по ГТК для всех сценариев и регионов.

**Заключение.** В соответствии с новыми нормами ВМО выполнена оценка атмосферного увлажнения в июне – августе за период потепления климата (1991–2020 гг.). Установлено распространение в это время на большей части территории Беларуси оптимальных условий увлажнения по ГТК, засушливых условий (на юго-востоке, северо-востоке и в центральной части страны) по индексу Педя. По стандартизированному индексу осадков территория Беларуси характеризуется как нормальным увлажнением (почти весь юг, северо-восток, крайний восток страны), так и слабозасушливыми условиями в вегетационный период.

При рассмотрении аномалий увлажнения в отдельные летние месяцы по всем трем индексам отмечаются засушливые условия в августе на большей или почти всей территории страны. В июле локально наблюдаются засушливые условия по всем показателям, избыточное увлажнение – по ГТК. В июне слабая засуха выражена на большей части территории по SPI (особенно на западе страны), в западной и юго-восточной частях Беларуси – по ГТК.

Оценка числа лет с аномальным атмосферным увлажнением в летние месяцы за период 1991–2020 гг. показала наибольшую повторяемость атмосферной засухи по ГТК (0,7 и менее) в августе. Примерно для половины территории Беларуси засуха отмечается в 30–50 %, ее повторяемость увеличивается на юго-востоке и западе страны. Избыточное увлажнение (ГТК более 1,6) в период потепления чаще всего наблюдается в июле; его повторяемость в этот месяц на большей части территории Беларуси составляет от 40 до 70 % (метеостанция «Житковичи»). По сравнению с 1961–1990 гг. наибольшее увеличение средней для областей повторяемости атмосферных засух отмечено в августе в Брестской и Гродненской обл. (на 16–17 %). Значительно снижается повторяемость избыточного атмосферного увлажнения в июне в Гродненской, Минской (на 14–15%) и Могилевской обл. (на 19 %), в августе – во всех областях (на 12–17 %), кроме Витебской.

Прогнозная оценка ГТК в 2021–2050 гг. для различных сценариев выбросов парниковых газов показала, что по сравнению с 1991–2020 гг. увлажнение уменьшится от оптимальных до слабозасушливых условий на территории Беларуси в июле, в августе сохранятся слабозасушливые условия или сформируются засушливые условия в южных областях. В июне условия увлажнения не изменятся и будут оптимальными. В целом для летнего периода в половине областей, а по сценарию SSP5-8.5 только в Витебской обл. сохранится достаточное увлажнение. В Могилевской и южных областях или на большей части территории страны (по сценарию SSP5-8.5) будут наблюдаться слабозасушливые условия.

### Список использованных источников

1. *Логинов, В. Ф.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск: УП «Энциклопедикс», 2020. – 264 с.
2. *Данилович, И. С.* Экстремальные проявления в режиме увлажнения на территории Беларуси в условиях трансформации климата / И. С. Данилович, Н. Г. Пискунович // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. – 2021. – № 2. – С. 32–44.
3. *Данилович, И. С.* Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе / И. С. Данилович, Ю. А. Гледко, И. В. Тарасевич // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 9. – С. 61–71. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-61-71>.
4. *Бровка, Ю. А.* Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата / Ю. А. Бровка, И. В. Бужков // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 5–18.
5. Почвенные засухи на территории Беларуси в условиях изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2023. – № 2. – С. 12–21.
6. Пространственно-временные изменения почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 15–21.
7. *Червань, А. Н.* Оценка и внутрирегиональные различия уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к засухам в условиях потепления климата / А. Н. Червань, В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 444–453.
8. *Мееровский, А. С.* Уязвимость почв сельскохозяйственных земель к засухам в условиях потепления климата Белорусского Полесья / А. С. Мееровский, В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Мелиорация. – 2021. – № 2 (96). – С. 29–36.
9. *Грингоф, И. Г.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия / И. Г. Грингоф, А. Д. Клещенко. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. – 808 с.
10. *Черенкова, Е. А.* Количественные оценки атмосферных засух в федеральных округах европейской территории России / Е. А. Черенкова // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2013. – № 6. – С. 76–85.
11. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов / Д. Ю. Васильев [и др.] // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 494, № 1. – С. 91–96.

12. Галимова, Р. Г. Агроклиматические ресурсы Республики Башкортостан / Р. Г. Галимова, Ю. П. Переведенцев, Г. А. Яманаев // Вестн. ВГУ. Сер. География. Геоэкология. – 2019. – № 3. – С. 29–39.
13. Черенкова, Е. А. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи / Е. А. Черенкова, А. Н. Золотокрылин // Фундам. и приклад. климатология. – 2016. – № 2. – С. 79–94. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-2-79-94>.
14. Задорнова, О. И. Сравнительная характеристика зарубежных индексов оценки засух по основным зерносеющим субъектам европейской территории России / О. И. Задорнова // Тр. ГГО имени А. И. Воейкова. – 2015. – Вып. 578. – С. 126–139.
15. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур / А. И. Страшная [и др.] // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра Рос. Федерации. – 2015. – Вып. 357. – С. 81–97.
16. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов / Д. Ю. Васильев [и др.] // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 494, № 1. – С. 91–96.
17. Агроклиматические ресурсы Белорусской ССР. Материалы гидрометеорологических наблюдений / под ред. М. А. Гольберга, В. И. Мельника. – Минск, 1985. – 451 с.
18. Зоидзе, Е. К. О 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.
19. Декадный бюллетень / ВНИИСХМ – Центр мониторинга засух. – 2020. – № 15 (21–30 сент.). – 33 с.
20. Изменения климатических условий и ресурсов Среднего Поволжья: учеб. пособие по регион. климатологии / Ю. П. Переведенцев [и др.]; науч. ред. Э. П. Наумов. – Казань: Центр инновац. технологий, 2011. – 296 с.
21. Галимова, Р. Г. Агроклиматические ресурсы Республики Башкортостан / Р. Г. Галимова, Ю. П. Переведенцев, Г. А. Яманаев // Вестн. ВГУ. Сер. География. Геоэкология. – 2019. – № 3. – С. 29–39.
22. Справочник по показателям и индексам засушливости [Электронный ресурс]. – 2016. – URL:[https://www.drought-management.info/literature/WMO-GWP-Drought-Indices\\_ru\\_2016.pdf](https://www.drought-management.info/literature/WMO-GWP-Drought-Indices_ru_2016.pdf) (дата обращения 22.02.2023)
23. Всемирная метеорологическая организация: руководство для пользователей стандартизированного индекса осадков / М. Свобода, М. Хайес и Д. Вуд. (ВМО-№ 1090), Женева [Электронный ресурс]. – 2012. – URL:[https://www.drought-management.info/literature/WMO\\_standardized\\_precipitation\\_index\\_user\\_guide\\_ru\\_2012.pdf](https://www.drought-management.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_ru_2012.pdf) (дата обращения 05.06.2023).
24. Лысенко, С. А. Квазипериодические компоненты температуры воздуха в Беларуси, механизмы формирования и учет в климатических проекциях на основе глобальных численных моделей СМIP6 / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Брест, 26–28 окт. 2023 г. – 2023. – Ч. 1. – С. 3–6.
25. МГЭИК, 2021: Резюме для политиков. В: Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы Iв Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Массон-Дельмонтт, М.П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, С. Бергер, Н. Кауд, Ю. Чэнь, Л. Голдфарб, М.И. Гомис, М. Хуан, К. Лейтцелл, Э. Лонной, Дж. Б.Р. Мэтьюз, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, О. Йелекчи, Р.Ю. и Б. Чжоу (ред.)]. Кембридж юниверсити пресс. – URL:[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Russian.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Russian.pdf) (дата обращения: 05.06.2023).

Поступила 13.04.2024