

ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА РОССИИ И БЕЛАРУСИ В НАЧАЛЕ XXI в.

Ю. П. ПЕРЕВЕДЕНЦЕВ¹⁾, П. С. ЛОПУХ²⁾, Ю. А. ГЛЕДКО²⁾, Е. С. БЕРЕЖКОВА²⁾,
ВАН ХАО²⁾, Т. В. ШЛЕНДЕР^{2),3)}

¹⁾Казанский (Приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлевская, 18, 420008, г. Казань, Россия

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Представлена оценка изменений термического режима территории Беларуси и европейской части России. Исследованы региональные особенности трансформации климата, происходящие на фоне выявленных глобальных изменений. Отмечено, что в рассматриваемом регионе во все месяцы года температура воздуха повышается с различной скоростью. Более интенсивно потепление происходит в декабре – марте. Установлена зависимость термического режима от типа атмосферной циркуляции. Рассмотрена динамика пожароопасной обстановки на территории Беларуси, указывающая на рост показателя пожароопасности в последние годы в связи с дефицитом осадков и волнами тепла. Проведен анализ повторяемости опасных метеорологических явлений, выявлен рост числа случаев с грозой и градом, ливнями и гололедом, а также изучены колебания уровня стратосферного озона и случаев внезапных стратосферных потеплений, с которыми связаны температурные аномалии на территории Беларуси.

Ключевые слова: потепление; климат; температура; тренд; корреляция; опасные метеорологические явления; пожароопасность; озон.

Образец цитирования:

Переведенцев ЮП, Лопух ПС, Гледко ЮА, Бережкова ЕС, Ван Хао, Шлендер ТВ. Особенности климатических изменений на европейской территории Союзного государства России и Беларуси в начале XXI в. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2022; 2:69–87.

<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-2-69-87>

For citation:

Perevedentsev YuP, Lopuch PS, Hledko YA, Berezhkova KS, Van Khao, Schlender TV. Features of climate change in the European territory of the Union State of Russia and Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2022;2:69–87. Russian.

<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-2-69-87>

Авторы:

Юрий Петрович Переведенцев – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования.

Петр Степанович Лопух – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Юлия Александровна Гледко – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Екатерина Сергеевна Бережкова – старший преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Ван Хао – соискатель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Тимофей Викторович Шлендер – преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾, научный сотрудник лаборатории биофотоники³⁾.

Authors:

Yuri P. Perevedentsev, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of meteorology, climatology and atmospheric environment, Institute of environmental sciences. ypereved@kpfu.ru

Petr S. Lopuch, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of Earth science and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.

lopuch49@mail.ru

Yulia A. Hledko, PhD (geography), docent; head of the department of Earth science and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.

gledko74@mail.ru

Katsiaryna S. Berezhkova, senior lecturer at the department of general geography of the Earth and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.

katarina0704@tut.by

Van Khao, applicant at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics. vamkhao@gmail.com

Tsimafei V. Schlender, lecturer at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics²⁾, and researcher at the laboratory of biophotonics³⁾. timajaya@mail.ru

FEATURES OF CLIMATE CHANGE IN THE EUROPEAN TERRITORY OF THE UNION STATE OF RUSSIA AND BELARUS AT THE BEGINNING OF THE 21st CENTURY

*Yu. P. PEREVEDENTSEV^a, P. S. LOPUCH^b, Y. A. HLEDKO^b,
K. S. BEREZHKOVA^b, VAN KHAO^b, T. V. SCHLENDER^{b, c}*

^a*Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya Street, Kazan 420008, Russia*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

^c*National Research Centre for Ozonosphere Monitoring, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus*

Corresponding author: P. S. Lopuch (lopuch49@mail.ru)

The article is devoted to the assessment of changes in the thermal regime the Republic of Belarus and the European territory of Russia. The relevance of the topic is due to the need to study regional climatic changes in the context of modern global warming. As a result of the study, it was revealed that in the region in the period 1900–2019 in all months of the year the air temperature rises at different rates. Warming occurs more intensely during the December – March period. The dependence of the thermal regime on the type of circulation modes has been established. The fire hazard on the territory of Belarus, the dynamics of dangerous meteorological phenomena depending on the navigation period and the distribution of stratospheric ozone as one of the most important climatic factors are considered.

Keywords: warming; climate; temperature; trend; correlation; dangerous meteorological phenomena; fire hazard; ozone.

Введение

Рассмотрение проблемы современных глобальных и региональных изменений климата актуально в связи с необходимостью обеспечения безопасности государств от неблагоприятных последствий этих изменений. Согласно публикациям [1; 2] вследствие возрастания в атмосфере концентрации парниковых газов наблюдается непрерывный рост глобальной приповерхностной температуры, который продолжается и в XXI в. Известно, что потепление в разных регионах Земли происходит с различной скоростью. Наиболее интенсивно оно проявляется в Арктике (так называемое арктическое ускорение потепления) и высоких широтах Северного полушария. Анализ этих изменений – новое и главное научное направление в изучении современного климата.

В частности, в работах [3; 4] представлена динамика температурно-влажностного режима в Поволжье и Предуралье в XIX–XXI вв. В настоящей статье географические рамки исследования расширены благодаря сотрудничеству климатологов Казанского (Приволжского) федерального университета и Белорусского государственного университета в рамках совместного проекта «Многолетние и сезонные особенности изменения климата и их экстремальных проявлений на территории России и Беларуси». Результатом этих исследований должно стать решение проблемы адаптации к новым климатическим условиям.

Объектом изучения являются региональные особенности потепления климата, его влияние на различные секторы экономики. Основой исследований послужили данные инструментальных измерений гидрометеорологической сети наблюдений Белгидромета и Росгидромета, а также других профильных организаций.

Цель работы – оценить происходящие на территории Союзного государства России и Беларуси климатические изменения и их влияние на различные секторы экономики, а также выявить негативные последствия глобального потепления и социально-экономических явлений. В настоящей статье освещены первые итоги исследований в данной предметной области, позволяющие наметить пути дальнейших перспективных научных разработок.

Материалы и методы исследования

На основании данных длиннорядных метеорологических станций за 1900–2019 гг. (в некоторых случаях за 1900–2021 гг.) рассмотрена изменчивость температурного режима Беларуси и европейской части России. Построены карты пространственного распределения температуры воздуха для различных месяцев и сезонов, а также для года в целом. Дополнительно созданы карты пространственного распределения коэффициентов корреляции между средней температурой всего рассматриваемого региона и температурой отдельных станций для января и июля, а также зимнего и летнего сезонов.

В процессе исследования использовалась база фактических гидрометеорологических данных Белгидромета (42 метеостанции) за время инструментальных наблюдений с акцентом на период устойчивого климатического потепления (1989–2021).

Рассмотрены пространственно-временные тенденции изменения опасных метеорологических явлений за 1975–2021 гг. Исследована динамика пожароопасной обстановки за 1990–2019 гг. по 118 районам Беларуси. Динамика лесных пожаров проанализирована по десятилетним периодам.

Для изучения атмосферного озона использовались данные наблюдений (1980–2021) за атмосферным озоном в Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы БГУ на Минской озонометрической станции. На основе данных прибора «ПИОН-УФ» (Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Беларусь) и спутниковых измерений проводился ежегодный анализ состояния озонового слоя и особенностей динамики общего содержания озона, результаты которого публиковались в экологическом бюллетене «Состояние природной среды Беларуси».

Результаты и их обсуждение

Температура воздуха и атмосферная циркуляция. Для общей характеристики фона температурных изменений рассматриваемой территории приведены средние многолетние значения средневековой приземной температуры воздуха Беларуси и европейской части России (рис. 1).

Для оценки влияния циркуляционных колебаний рассчитывались коэффициенты корреляции между индексами AO, NAO, EAWR, SCAND и температурой воздуха всех станций в январе и июле в 1900–2019 гг. (рис. 2).

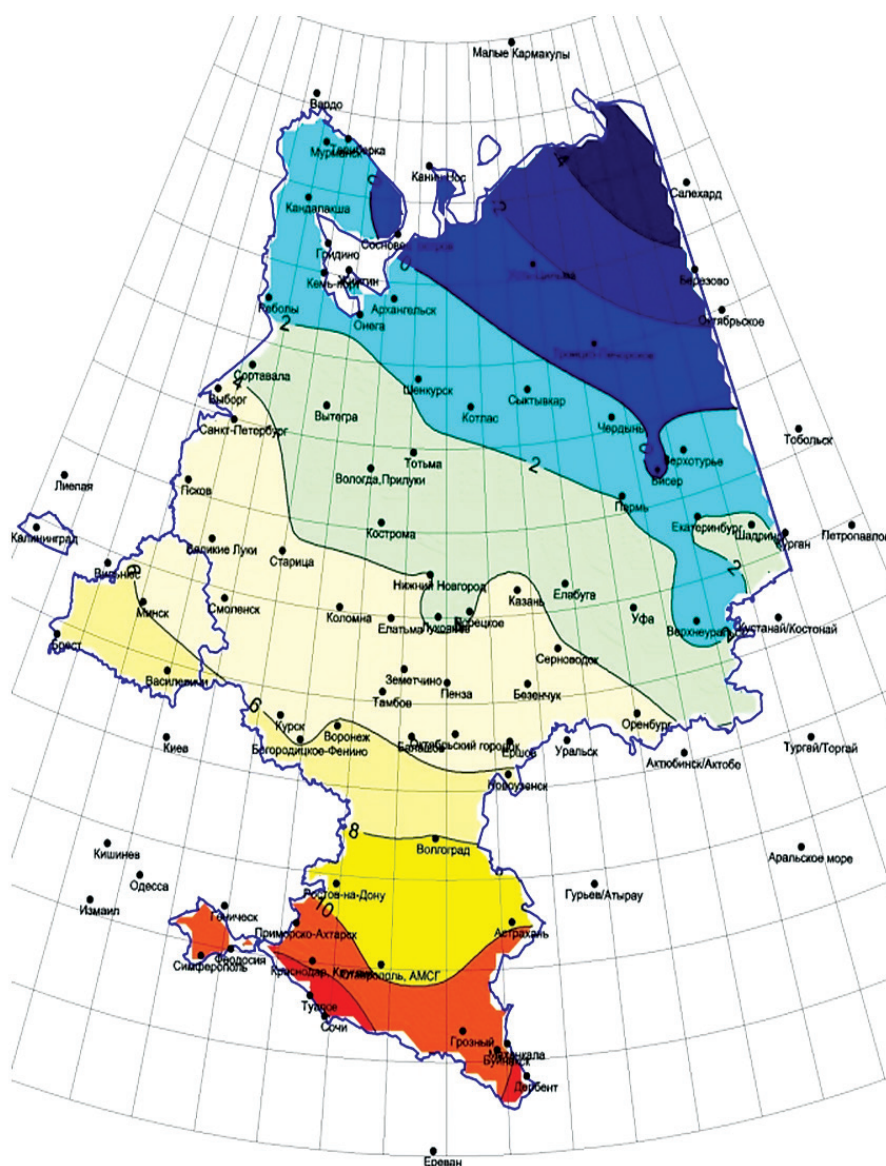


Рис. 1. Средние многолетние значения средневековой приземной температуры воздуха за 1900–2019 гг.
Fig. 1. Average long-term values of medieval surface air temperature for 1900–2019

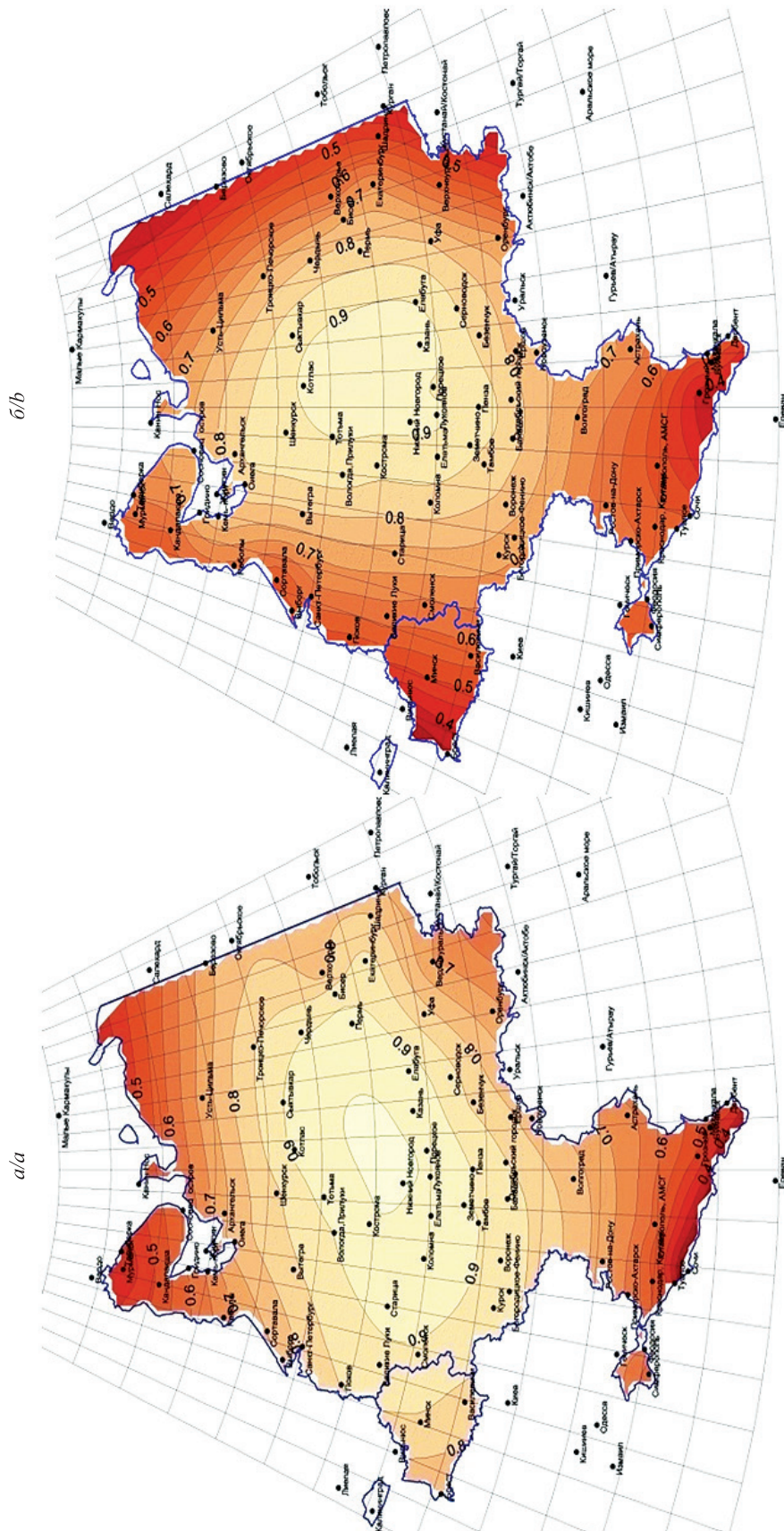


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между индексами атмосферной циркуляции и температурой воздуха всех станций в январе (а) и июле (б) за 1900–2019 гг.

Fig. 2. Correlation coefficients between indices of atmospheric circulation and air temperature of all stations in January (a) and July (b) for 1900–2019

Для смягчения негативных последствий изменения температуры приземного слоя атмосферы определены направления отдельных региональных научных исследований на примере Беларуси и России.

В целях выявления долговременных тенденций изменения термического режима построены линейные тренды температуры воздуха рассматриваемого региона для каждого месяца зимнего и летнего сезонов, а также для года в целом. Для выделения долговременных температурных колебаний в 1900–2019 гг. (частота наблюдений – около 20 лет) рассчитывались низкочастотные компоненты. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, на территории хорошо прослеживается годовой ход температуры воздуха с минимумами в январе ($-11,30\text{ }^{\circ}\text{C}$) и максимумами в июле ($+18,38\text{ }^{\circ}\text{C}$). Годовая амплитуда составила $29,68\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средние квадратические отклонения температуры воздуха менялись в пределах от $3,19\text{ }^{\circ}\text{C}$ (февраль) до $1,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (август). Наибольшее значение коэффициента наклонного линейного тренда выявлено в марте ($0,290\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), а наименьшее – в августе ($0,068\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет). В декабре значение данного коэффициента составило $0,226\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Таким образом, осредненные по территории данные показывают, что во все месяцы года наблюдалось потепление, но с различной интенсивностью. Осредненное за год значение коэффициента наклонного линейного тренда равно $0,147\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, при этом скорость потепления в зимний период ($0,190\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) в 2 раза превышает скорость потепления в летний период ($0,081\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет). В целом средняя годовая температура воздуха всей рассматриваемой территории составляет $3,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднее квадратическое отклонение – $0,96\text{ }^{\circ}\text{C}$, а скорость потепления – $0,147\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет.

Согласно кривой низкочастотных компонентов в зимний период с начала 1970-х гг. в регионе наблюдалось повышение температуры воздуха примерно на $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в летний период активное повышение температуры воздуха происходило с середины 1970-х гг., при этом его величина достигала лишь $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3). В целом за год потепление составило около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, с начала 1970-х гг. в регионе наблюдалось заметное потепление климата, отличающееся по своей интенсивности и характеру в различные месяцы года, что хорошо видно из поведения кривой низкочастотных компонентов температуры воздуха. Например, в ноябре четко прослеживалась периодичность изменения температуры (кривая низкочастотных компонентов имеет вид волны с продолжительностью около 40 лет).

Таблица 1

Характеристики изменения осредненной по территории Беларуси и европейской части России температуры воздуха за 1900–2019 гг.

Table 1

Characteristics of changes in air temperature averaged over the territory of the Belarus and European part of Russia for 1900–2019

Месяц или период	$\text{Av},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\text{RMS},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$A,\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет	$R^2L,\text{ }\%$	$R^2F,\text{ }\%$
Январь	$-11,30$	$3,02$	$0,165$	2	12
Февраль	$-10,54$	$3,19$	$0,195$	3	12
Март	$-4,95$	$2,50$	$0,290$	15	24
Апрель	$+3,68$	$1,95$	$0,161$	7	12
Май	$+10,68$	$1,75$	$0,171$	10	17
Июнь	$+15,89$	$1,33$	$0,081$	3	11
Июль	$+18,38$	$1,30$	$0,094$	5	15
Август	$+16,49$	$1,24$	$0,068$	2	23
Сентябрь	$+10,84$	$1,34$	$0,090$	4	15
Октябрь	$+3,83$	$1,78$	$0,127$	5	15
Ноябрь	$-3,12$	$2,20$	$0,094$	1	18
Декабрь	$-8,51$	$2,83$	$0,226$	6	12
Январь – декабрь	$+3,45$	$0,96$	$0,147$	27	38
Декабрь – февраль	$-9,60$	$2,07$	$0,190$	9	15
Июнь – август	$+16,92$	$0,90$	$0,081$	8	22

Примечание. Av – среднее значение; RMS – среднее квадратическое отклонение; A – коэффициент наклонного линейного тренда; R^2L – коэффициент детерминации линейного тренда; R^2F – коэффициент детерминации низкочастотной компоненты.

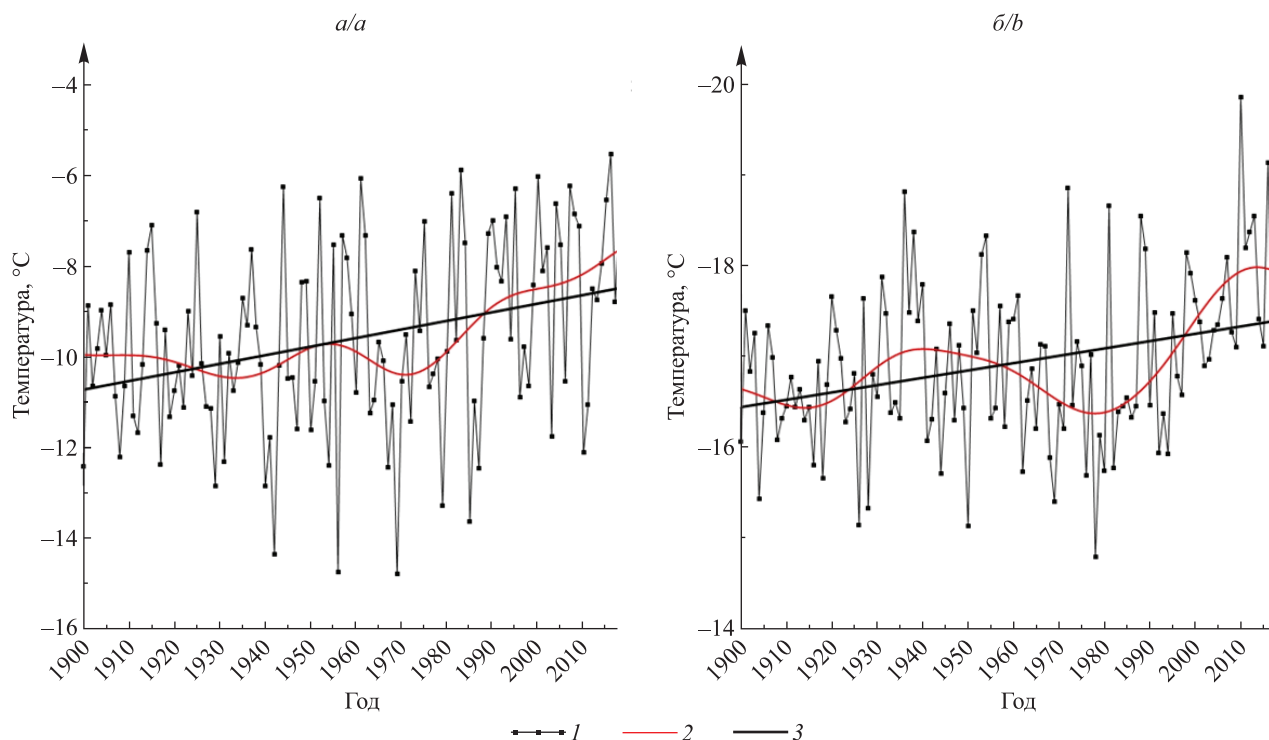


Рис. 3. Многолетняя динамика приземной температуры воздуха, осредненной по территории Беларуси и европейской части России, в декабре – феврале (а) и июне – августе (б) за 1900–2019 гг: 1 – исходный ряд; 2 – низкочастотные компоненты; 3 – коэффициент наклонного линейного тренда

Fig. 3. Long-term dynamics of surface air temperature average over the territory of Belarus and the European part of Russia in December – February (a) and June – August (b) for 1900–2019: 1 – original row; 2 – low-frequency components; 3 – oblique linear trend coefficient

Карты распределения температуры воздуха в январе и июле показывают, что температура воздуха понижается с юго-запада на северо-восток. Так, среднеянварская температура на территории Беларуси составляет приблизительно -6°C . На Северном Кавказе она является положительной (около $+4^{\circ}\text{C}$), а на северо-востоке европейской части России опускается до -22°C . В июле изотермы имеют квазизональный характер и температура воздуха возрастает с севера на юг от 10°C в северной части России до 24°C на Северном Кавказе. Среднеиюльская температура на территории Беларуси составляет около 18°C .

Зимой средняя температура воздуха в Беларуси достигает приблизительно -4°C , на северо-востоке европейской части России – около -20°C , а в районе побережья Черного моря – примерно $+4^{\circ}\text{C}$. Летом средняя температура воздуха на Северном Кавказе составляет 22°C , на арктическом побережье европейской части России она опускается до 8°C , на территории Беларуси равняется около 18°C . Изотермы зимней и летней температуры практически совпадают со среднеянварскими и среднеиюльскими.

Были рассчитаны коэффициенты корреляции (r) между температурой воздуха, осредненной по всему региону, и температурой, зафиксированной на 95 станциях. Поскольку среднерегionalное значение температуры характерно для центральной части регионов, то построенные карты изокоррелят позволяют оценить как форму, так и скорость затухания связей в поле температуры при увеличении расстояния от центра. Если в январе (и зимой в целом) изокорреляты образуют эллипс с большой осью, направленной с юго-запада на северо-восток (направление определяющего потока), то в июле (и летом в целом) овал вытянут в меридиональном направлении. При этом зимой статистические связи с удаленными районами более тесные, чем летом. Так, в январе коэффициент корреляции между температурами в Беларуси и центре европейской части России составил около 0,8, а в июле – 0,4. То же наблюдается в зимний и летний периоды.

Для оценки влияния циркуляции атмосферы на термический режим региона рассчитывались коэффициенты корреляции за 120-летний период между временными рядами индексов атмосферной циркуляции (AO, NAO, EAWR, SCAND) и температурой воздуха на отдельных станциях. Были построены карты корреляции для января и июля. Выявлено, что в январе на западе региона (в районе Пскова) связи

с индексом АО более тесные ($r = 0,6$). С запада на восток (в Предуралье) происходит их ослабление ($r = 0,4$). В июле связи незначимы. В январе корреляция с индексом NAO также более тесная в западной части региона ($r = 0,6$), в восточном направлении происходит заметное ослабление влияния индекса NAO, а на юго-востоке европейской части России (Оренбург) коэффициент корреляции снижается до 0,2 и меньших значений. В июле значения коэффициентов корреляции незначительны (около 0,2). Таким образом, индексы АО и NAO влияют на термический режим региона в зимний период, прежде всего в его западной части. Это воздействие положительное, т. е. атмосферная циркуляция способствует потеплению в регионе в зимний период. Циркуляционная мода EAWR наибольшее влияние оказывает в летний период на центр и особенно восток региона ($r = -0,6$), что свидетельствует об охлаждающем влиянии Северной Атлантики в этот период. Связь температуры воздуха с индексом SCAND в январе лучше выражена в центре и на востоке территории (Урал, Оренбуржье, Северный Кавказ) ($r = -0,6$). Так, формирование блокирующего скандинавского антициклона заметно влияет на зимний термический режим востока европейской части России и способствует понижению температуры воздуха. В июле связь между компонентами сильнее на северо-западе европейской части России ($r = 0,4$) и ослабевает в направлении юго-востока.

Выявлено, что по всей сети метеорологических станций Беларуси среднегодовая температура воздуха в 1988–2018 гг. на 1,3 °С выше в сравнении с аналогичными показателями в 1948–2018 гг. (рис. 4). Для адаптации к складывающимся климатическим изменениям на территории Беларуси наибольшее значение имеют средние температуры самого холодного и самого теплого месяцев (рис. 5). Изменение климата может оказывать положительное влияние, что выражается в увеличении продолжительности теплообеспеченности вегетационного периода, сокращении сроков созревания сельскохозяйственных культур, продолжительности отопительного периода и т. д. По данным В. Ф. Логинова, наиболее погодозависимыми отраслями экономики являются сельское и коммунальное хозяйство, энергетика и транспорт.

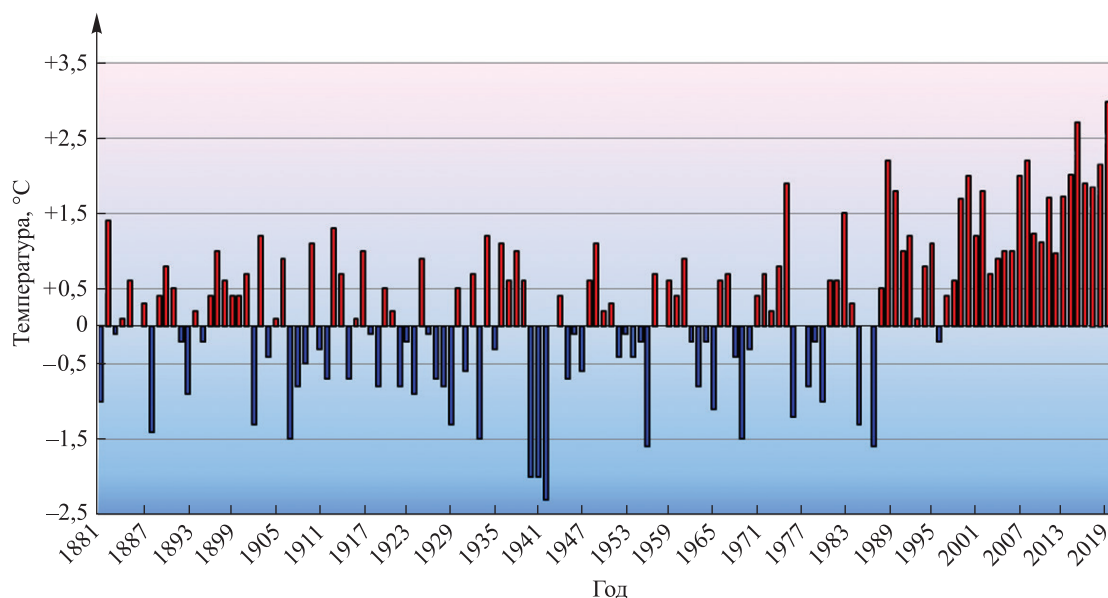


Рис. 4. Отклонение среднегодовой температуры воздуха от климатической нормы (+5,8 °С) по Беларуси за 1881–2019 гг.

Fig. 4. Deviation of the average annual air temperature from the climatic norm (+5.8 °C) in Belarus for 1881–2019

Согласно результатам исследования глобальный процесс изменения климата влияет на широкий ряд областей хозяйства [5]. Субъекты хозяйствования должны адаптироваться к новым неустойчивым климатическим условиям – повышению температуры воздуха, изменению тепловых условий и увеличению частоты опасных метеорологических условий [6; 7].

Максимальные показатели роста среднегодовых температур характерны для крупных промышленных центров страны – Витебска, Гомеля, Жлобина, Минска, Орши и Пинска.

Опасные и неблагоприятные явления погоды. Выполнен анализ повторяемости явлений погоды, которые прямо или косвенно могут привести к авиационным происшествиям, в осенне-зимний (низкая видимость, сильный ветер, ливень, осадки и гололед) и весенне-летний (низкая видимость, сильный ветер, ливень, осадки и грозы) периоды.

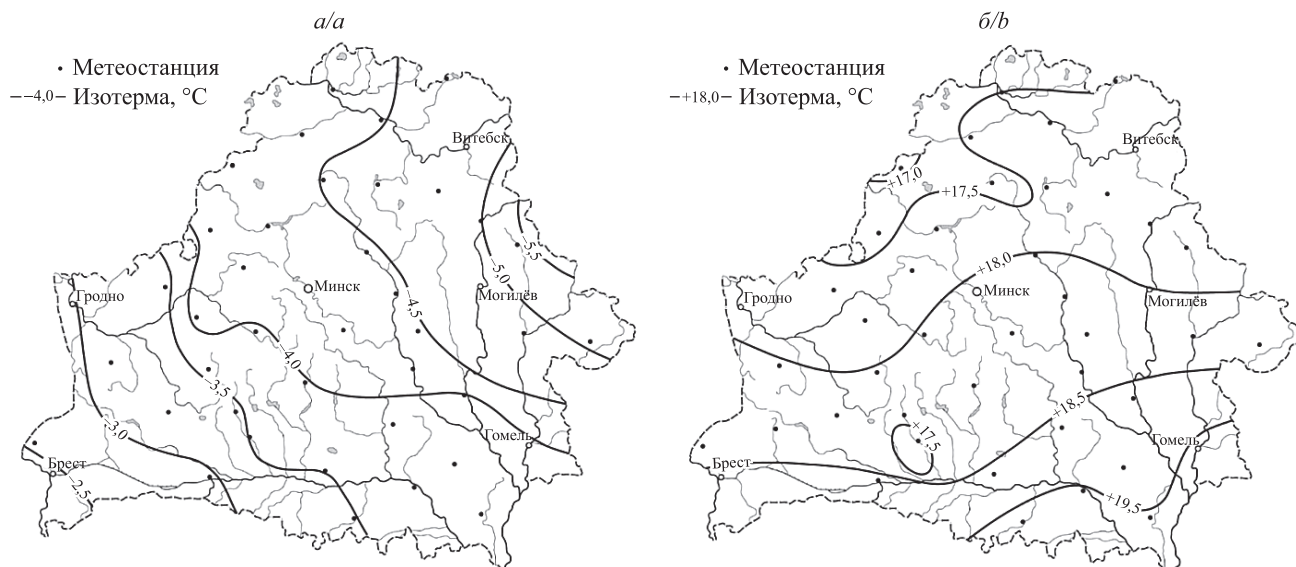


Рис. 5. Средняя температура воздуха в январе (а) и июле (б) за 1988–2018 гг. (период потепления)

Fig. 5. Average air temperature in January (a) and July (b) for 1988–2018 (warming period)

Важным критерием определения роста или снижения рисков, связанных с наступлением опасных метеорологических явлений, становятся значения трендов в исследуемый период (1975–2021) и особенно в период заметной трансформации климата (1989–2021).

Картосхема количества грозовых дней за 1975–2021 гг. на территории Беларуси представлена на рис. 6.

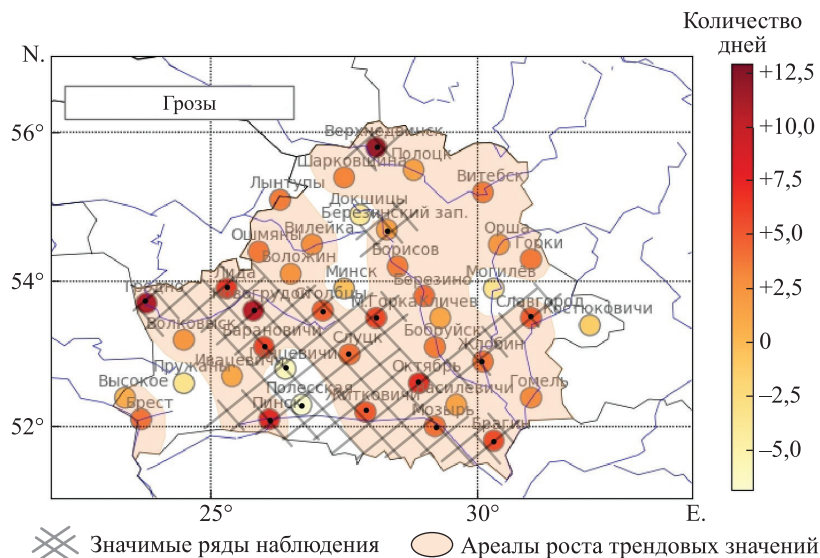


Рис. 6. Карта распределения числа дней с грозами на территории Беларуси за 1975–2021 гг.

Fig. 6. Distribution map of the number of days with thunderstorms on the territory of Belarus for 1975–2021

Отмечается увеличение количества грозовых дней на большинстве метеорологических метеостанций Белгидромета (83 % от общего количества) в 1975–2021 гг. Наибольший рост характерен для региона, простирающегося от северо-западной границы Гродненской области к югу Гомельской области. Максимальный уровень роста составил 12,0 дня с грозой. Увеличение количества грозовых дней отмечено в феврале, апреле, мае, июле, августе, октябре и ноябре. В период потепления рост данного показателя отмечается в апреле – августе.

На рис. 7 представлена карта распределения числа дней с гололедом за рассматриваемый период.

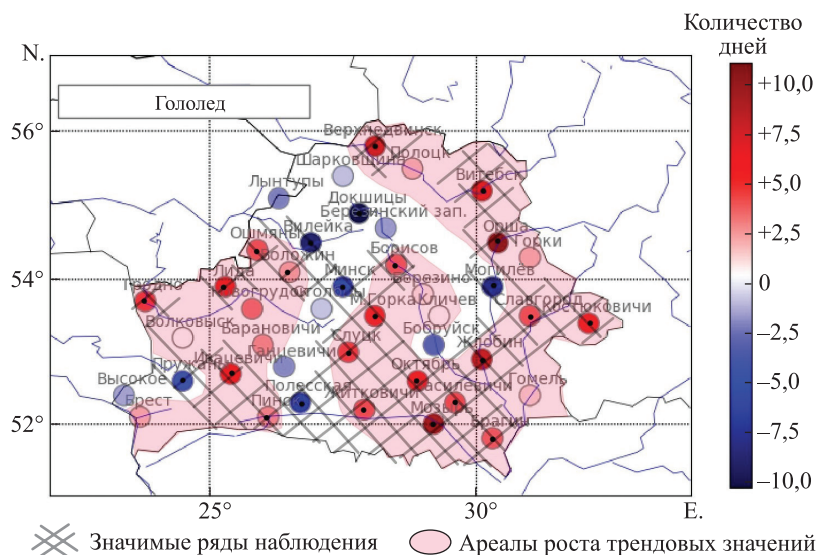


Рис. 7. Карта распределения числа дней с гололедом на территории Беларуси за 1975–2021 гг.

Fig. 7. Distribution map of the number of days with ice on the territory of Belarus for 1975–2021

Практически повсеместно отмечается увеличение количества дней с гололедом, кроме полосы, протянувшейся с северо-северо-запада на юг Беларуси. Максимальный рост числа дней с гололедом составил более 10,0 дня (абсолютный максимум (11,04 дня) отмечен на метеостанции Орша). Ареал с наибольшими показателями выявлен в Гомельской области. Рост количества дней с гололедом характерен для 62 % метеостанций Беларуси за исследуемый период и для 69 % метеостанций за период потепления климата.

За 1975–2021 гг. увеличение гололедных явлений отмечено в январе, октябре и ноябре, а за 1989–2021 гг. – в марте и сентябре – декабре.

Карта распределения числа дней с градом представлена на рис. 8.

Увеличение количества дней с градом установлено почти на всей территории Беларуси, кроме юго-востока Брестской области и ареала на стыке Витебской и Минской областей. Рост данного показателя характерен для 67 % метеостанций Беларуси за 1975–2021 гг. и для 76 % метеостанций за 1989–2021 гг. Наибольшее увеличение количества дней с градом за период исследования составило более 2,0 дня. Максимальный рост количества дней с градом (2,33 дня) выявлен на метеостанции Полоцк.

Увеличение повторяемости дней с градом фиксируется в феврале – июне, августе и ноябре – декабре. За 1989–2021 гг. рост данного показателя отмечен в марте – августе и октябре – ноябре.

На рис. 9 представлена карта распределения количества дней с метелью.

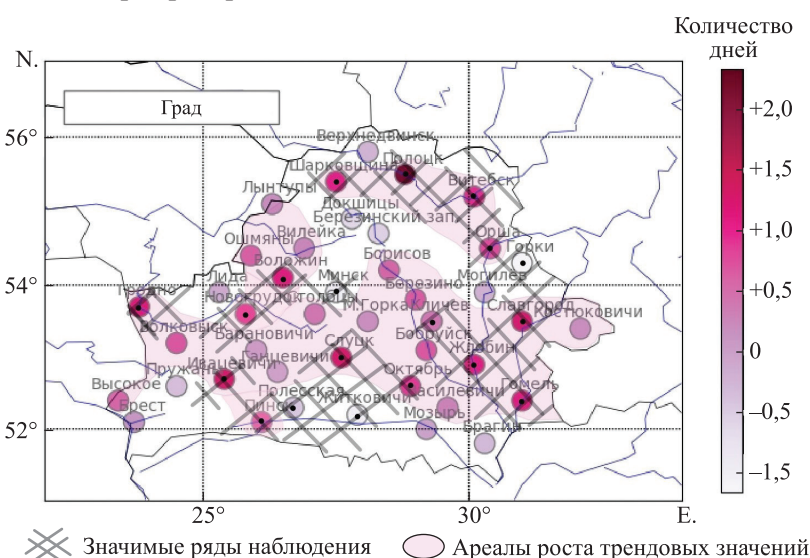


Рис. 8. Карта распределения числа дней с градом на территории Беларуси за 1975–2021 гг.

Fig. 8. Distribution map of the number of days with hail on the territory of Belarus for 1975–2021

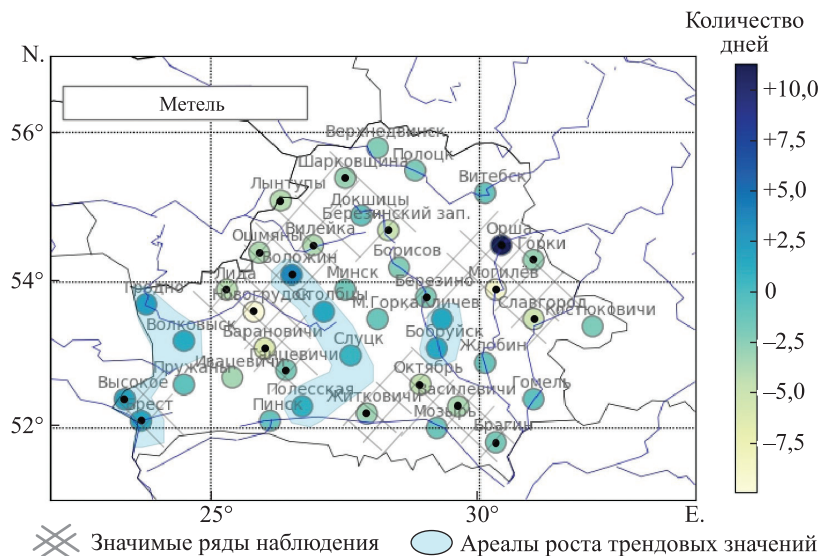


Рис. 9. Карта распределения числа дней с метелью на территории Беларуси за 1975–2021 гг.

Fig. 9. Distribution map of the number of days with blizzard on the territory of Belarus for 1975–2021

На большей площади Беларуси отмечается уменьшение количества дней с метелью. Районы, в которых наблюдается рост количества дней с метелью, представляют собой небольшие области, расположенные на западной окраине Беларуси, в пределах узкой полосы в восточной и центральной частях страны. За 1975–2021 гг. рост количества дней с метелью характерен для 26 % метеостанций Беларуси, а за 1989–2021 гг. – для 48 % метеостанций. Максимальный показатель роста числа дней с метелью за период исследования составил более 10,0 дня (наибольшее количество дней с метелью (11,26 дня) отмечено на метеостанции Орша). За 1975–2021 гг. уменьшение количества дней с метелью составило 0,07 дня в год (в течение года рост отмечался только в октябре), а за 1989–2021 гг. – 0,08 дня в год (в течение года рост фиксировался только в марте).

Карты распределения числа дней с осадками за 1975–2021 гг. в осенне-зимний и весенне-летний периоды представлены на рис. 10 и 11 соответственно.

Практически на всей территории Беларуси в осенне-зимний период отмечается рост количества осадков. Максимальные показатели выявлены в восточной и центральной части Беларуси. Увеличение количества осадков в осенне-зимний период за 1975–2021 гг. характерно для 83 % метеостанций Беларуси, а за 1989–2021 гг. – для 69 % метеостанций. Установлено замедление роста количества осадков.

В весенне-летний период отмечается рост количества осадков почти на всей территории Беларуси. Он характерен для 79 % метеостанций Беларуси за 1975–2021 гг. и для 45 % метеостанций за 1989–2021 гг. Установлено замедление роста количества осадков.

Среднегодовое увеличение количества осадков за период исследования составило 0,12 мм, а за период потепления климата – 0,48 мм, т. е. в 4 раза больше. За период исследования рост количества осадков выявлен в январе – марте, мае, июле – августе и октябре – ноябре, а за период потепления климата – в январе, мае, июле – августе, ноябре – декабре.

Карты распределения ливневых осадков на территории Беларуси в осенне-зимний и весенне-летний периоды за 1975–2021 гг. представлены на рис. 12 и 13.

Практически на всей территории Беларуси в осенне-зимний период отмечается рост количества случаев ливневых осадков. Максимальные показатели выявлены на западной окраине страны и в Гомельском регионе. Увеличение количества случаев ливней в осенне-зимний период за 1975–2021 гг. характерно для 98 % метеостанций Беларуси, а за 1989–2021 гг. – для 79 % метеостанций. В связи с этим ареалы роста случаев на карте не отмечены. Максимальный уровень увеличения количества случаев ливней за период исследования (0,85 случая в год) выявлен на метеостанции Вилейка (см. рис. 12). В осенне-зимний период за 1975–2021 гг. рост составил 0,06 случая в год, а за 1989–2021 гг. – 0,04 случая в год.

В весенне-летний период в Беларуси зафиксирован рост количества случаев ливневых осадков, за исключением территории, пролегающей по южной границе страны. Увеличение количества случаев ливней в этот период характерно для 74 % метеостанций Беларуси за 1975–2021 гг. и 67 % метеостанций за 1989–2021 гг. Максимальный уровень роста за период исследования (0,38 случая в год) зафиксирован на метеостанции Жлобин (см. рис. 13). В весенне-летний период за 1975–2021 гг. изменения составляли 0,04 случая, а за 1989–2021 гг. – 0,05 случая в год.

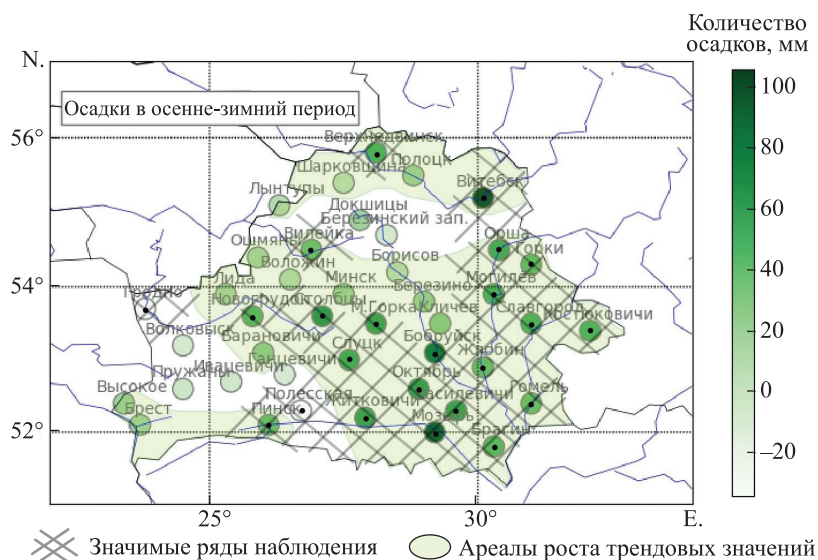


Рис. 10. Карта распределения количества осадков в осенне-зимний период на территории Беларуси за 1975–2021 гг.

Fig. 10. Distribution map of the number of rainfall in autumn – winter period on the territory of Belarus for 1975–2021

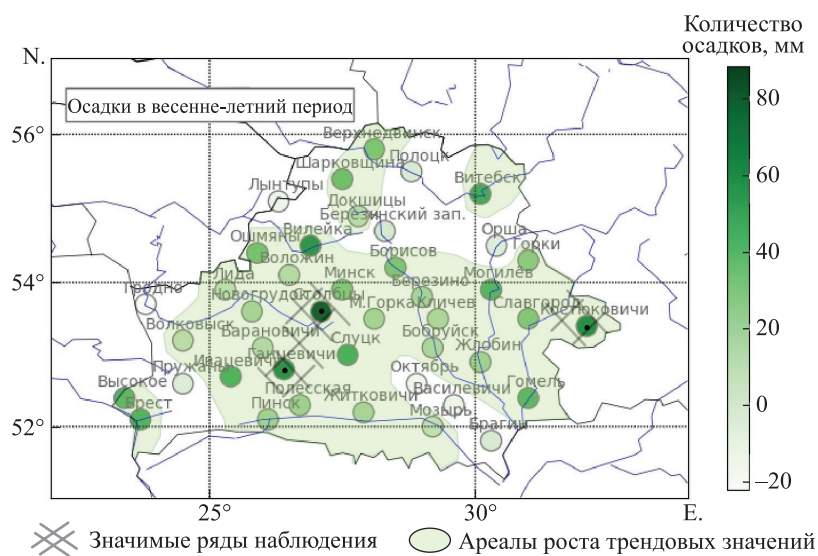


Рис. 11. Карта распределения количества осадков в весенне-летний период на территории Беларуси за 1975–2021 гг.

Fig. 11. Distribution map of the number of rainfall in spring – summer period on the territory of Belarus for 1975–2021

В среднем увеличение числа дней с ливнями составляет 1 случай за 2 года. Рост случаев ливневых осадков отмечается в течение всех месяцев года, кроме июня, а в период потепления климата – в феврале – июне, августе и октябре – декабре.

В 1975–2021 гг. наметилась отрицательная тенденция изменения количества случаев с видимостью 1 км и менее за 1975–2021 гг. на территории Беларуси в осенне-зимний и весенне-летний периоды представлены на рис. 14 и 15 соответственно.

Установлено, что рост количества случаев с видимостью 1 км и менее в осенне-зимний период распределен мелкими ареалами на юге, западе, востоке и в центре Беларуси. Увеличение числа случаев характерно для 10 % метеостанций за 1975–2021 гг. и для 12 % метеостанций за 1989–2021 гг. Максимальный рост за 1989–2021 гг. (0,79 случая в год) выявлен в Брестской области на метеостанции Полесская (см. рис. 14). В среднем за 1975–2021 гг. уменьшение количества случаев с видимостью 1 км и менее составило 0,3 случая, а за 1989–2021 гг. – 0,2 случая в год. Отмечено замедление сокращения количества случаев с видимостью 1 км и менее.

В весенне-летний период зафиксировано уменьшение количества случаев с видимостью 1 км и менее. Рост отмечается точечно на юге, востоке, западе и в центре Беларуси и характерен для 10 % метеостанций

за исследуемый период и для 24 % метеостанций за период потепления климата. Максимальный уровень роста (0,78 случая в год, или 35,22 случая за весь период исследования) выявлен на метеостанции Полесская (см. рис. 15). В среднем за 1975–2021 гг. уменьшение составило 0,14 случая, а за 1989–2021 гг. – 0,13 случая.

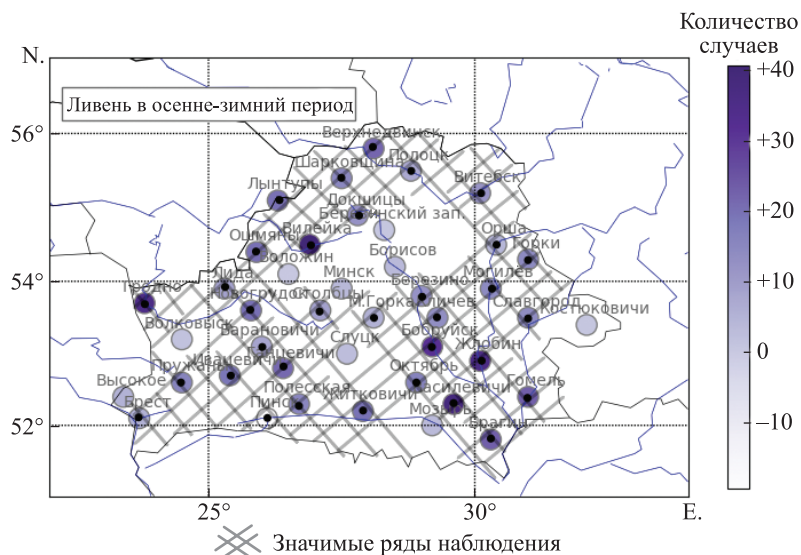


Рис. 12. Карта распределения числа случаев ливневых осадков на территории Беларуси в осенне-зимний период за 1975–2021 гг.

Fig. 12. Distribution map of the number of cases with rainfall events on the territory of Belarus in the autumn – winter period for 1975–2021

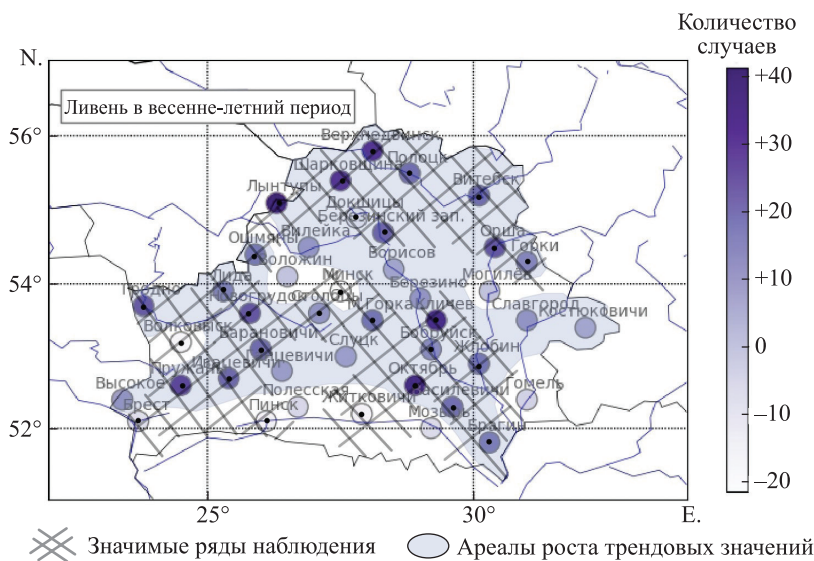


Рис. 13. Карта распределения числа случаев с ливневыми осадками на территории Беларуси в весенне-летний период за 1975–2021 гг.

Fig. 13. Distribution map of the number of cases with heavy rainfall on the territory of Belarus in the spring– summer period for 1975–2021

В 1975–2021 гг. выявлена отрицательная тенденция изменения количества случаев с видимостью 1 км и менее в течение года. За 1975–2021 гг. среднегодовое уменьшение составило 1,3 случая, а за 1989–2021 гг. – 0,06 случая. За период потепления климата рост выявлен в мае (0,12 случая). Отмечено замедление уменьшения количества случаев с видимостью 1 км и менее.

На рис. 16 и 17 представлены карты распределения числа дней с туманом в осенне-зимний и весенне-летний периоды соответственно.

На большей территории Беларуси отмечается уменьшение количества дней с туманом в осенне-зимний период. Увеличение количества дней характерно для 5 % метеостанций за исследуемый период и 33 % метеостанций за период потепления климата. Максимальный уровень роста за 1989–2021 гг. (0,52 дня

в год) выявлен на метеостанции Мозырь (см. рис. 16). В среднем по Беларуси за исследуемый период уменьшение количества дней с туманом составило 0,05 дня, за период потепления климата – 0,01 дня. Отмечено замедление уменьшения количества дней с туманом.

Рост количества дней с туманом в весенне-летний период фиксируется точно. Он характерен для 3 % метеостанций за исследуемый период и 17 % метеостанций за период потепления. Максимальный уровень роста (0,21 дня в год) выявлен на метеостанции Березино (см. рис. 17). В среднем в весенне-летний период уменьшение количества дней с туманом составило 0,04 дня за 1975–2021 гг. и 0,03 дня за 1989–2021 гг. Отмечено замедление уменьшения количества дней с туманом.

В целом за год выявлено снижение количества дней с туманом (0,6 дня за рассматриваемый период и 0,3 дня за период потепления климата). За 1989–2021 гг. рост количества дней зафиксирован в феврале и мае. Отмечено замедление уменьшения количества дней с туманом.

На рис. 18 и 19 представлены карты распределения числа дней со скоростью ветра 14 м/с и более в осенне-зимний и весенне-летний периоды.

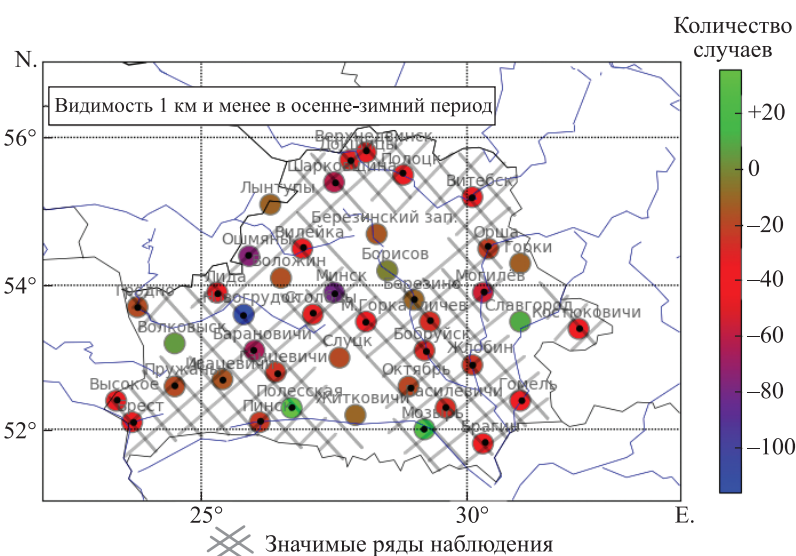


Рис. 14. Карта распределения числа случаев с видимостью 1 км и менее на территории Беларуси в осенне-зимний период за 1975–2021 гг.

Fig. 14. Distribution map of the number of cases with visibility of 1 km or less on the territory of Belarus in the autumn – winter period for 1975–2021

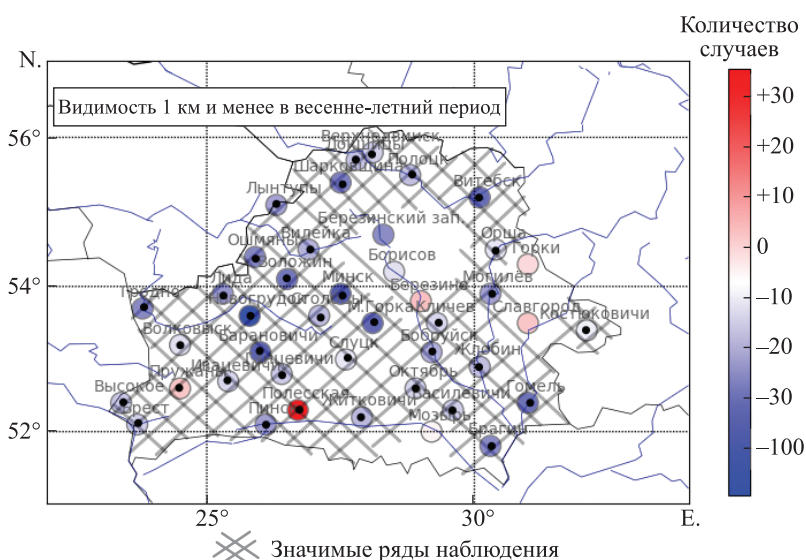


Рис. 15. Карта распределения числа случаев с видимостью 1 км и менее на территории Беларуси в весенне-летний период за 1975–2021 гг.

Fig. 15. Distribution map of the number of cases with visibility of 1 km or less on the territory of Belarus in the spring – summer period for 1975–2021

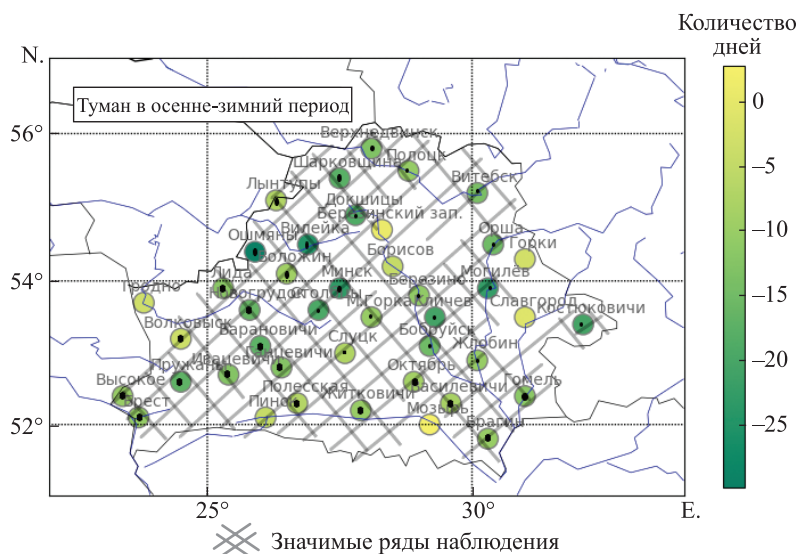


Рис. 16. Карта распределения числа дней с туманом на территории Беларуси в осенне-зимний период за 1975–2021 гг.

Fig. 16. Distribution map of the number of days with fog on the territory of Belarus in the autumn – winter period for 1975–2021

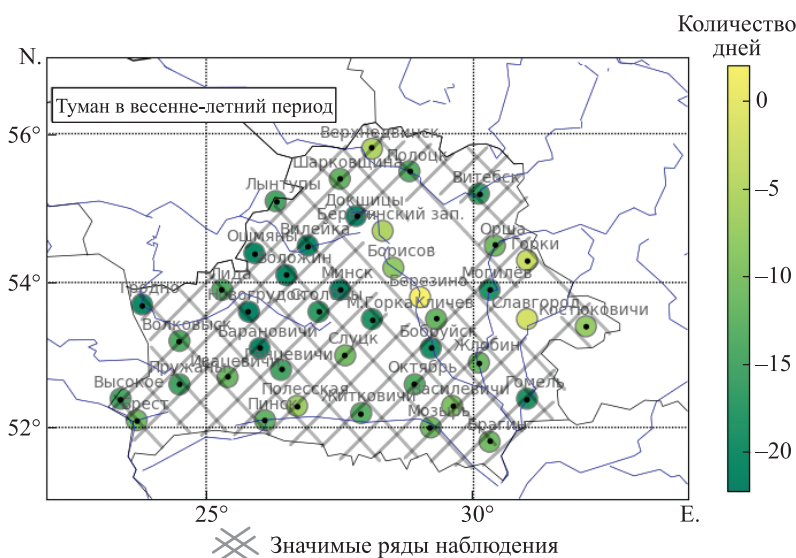


Рис. 17. Карта распределения числа дней с туманом на территории Беларуси в весенне-летний период за 1975–2021 гг.

Fig. 17. Distribution map of the number of days with fog on the territory of Belarus in the spring – summer period for 1975–2021

На большей части территории Беларуси отмечается уменьшение количества дней с ветром со скоростью 14 м/с и более. Точечно в осенне-зимний период зафиксировано увеличение количества дней за 1975–2021 гг. Рост характерен для 12 % метеостанций за исследуемый период и 14 % метеостанций за период потепления климата. Максимальные показатели установлены в Гомельском регионе. Наибольший уровень роста (1,63 дня в год) выявлен на метеостанции Борисов. В среднем за 1975–2021 гг. уменьшение составило 0,007 дня, за 1989–2021 гг. – 0,004 дня. Отмечено замедление уменьшения количества дней с ветром со скоростью 14 м/с и более.

В весенне-летний период увеличение количества дней с ветром со скоростью 14 м/с и более характерно для 21 % метеостанций за исследуемый период и 14 % метеостанций за период потепления. Максимальный уровень роста (0,59 дня) выявлен на метеостанции Слуцк (см. рис. 19). В среднем по Беларуси уменьшение количества дней с ветром со скоростью 14 м/с и более составило 0,001 дня (за оба периода).

За 1975–2021 гг. уменьшение составило 0,04 дня в год, за 1989–2021 гг. – 0,02 дня. Выявлено замедление уменьшения количества дней с ветром со скоростью 14 м/с и более за 1989–2021 гг. по отношению к уменьшению числа дней с ветром со скоростью 14 м/с и более за 1975–1988 гг. За период потепления климата рост количества дней со скоростью ветра 14 м/с и более выявлен в мае и октябре.

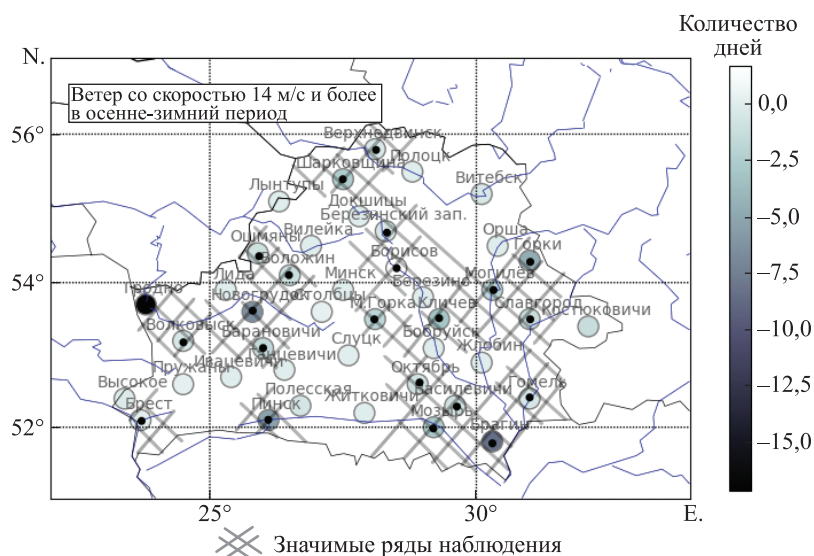


Рис. 18. Карта распределения числа дней с ветром со скоростью 14 м/с и более на территории Беларуси в осенне-зимний период за 1975–2021 гг.

Fig. 18. Distribution map of the number of days with a wind speed of 14 m/s or more on the territory of Belarus in the autumn – winter period for 1975–2021

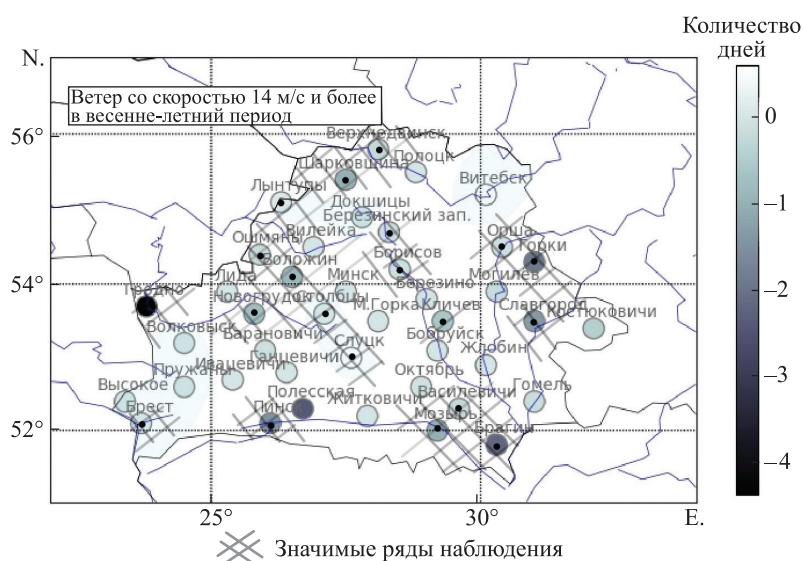


Рис. 19. Карта распределения числа дней с ветром со скоростью 14 м/с и более на территории Беларуси в весенне-летний период за 1975–2021 гг.

Fig. 19. Distribution map of the number of days with a wind speed of 14 m/s or more on the territory of Belarus in the spring – summer period for 1975–2021

Пожароопасная обстановка. Наиболее сложная пожароопасная обстановка в лесных массивах на территории Беларуси за 1990–2019 гг. отмечалась в летний период. Пожароопасные годы характеризуются небольшим количеством осадков и очень низкой относительной влажностью воздуха (20–30 %). При этом дневные максимумы температуры воздуха достигали 34 и 36 °С. Данные климатические условия стали причиной массовых лесных пожаров. Для минимизации и предотвращения негативных последствий от метеорологических условий ежегодно проводятся расчеты показателя пожароопасности в лесах в соответствии с условиями погоды и горимостью лесов.

При анализе динамики лесных пожаров за 1990–2019 гг. выявлен рост пожарной опасности в 2010, 2015 и 2019 гг. (рис. 20).

По результатам анализа наиболее пожароопасным стал 2015 г. Этому сопутствовал ряд метеорологических условий в течение года: малоснежная зима, раннее наступление весны (теплый и сухой март), уровень половодья ниже среднего многолетнего, низкое содержание влаги в почве. Весной 2015 г. на территории Беларуси были зафиксированы 1019 пожаров. Летний период 2015 г. характеризуется дефицитом осадков, повышенными температурами и порывистыми ветрами. Как следствие, в совокупности метеорологические условия привели к сложной обстановке в природных экосистемах (рис. 21).

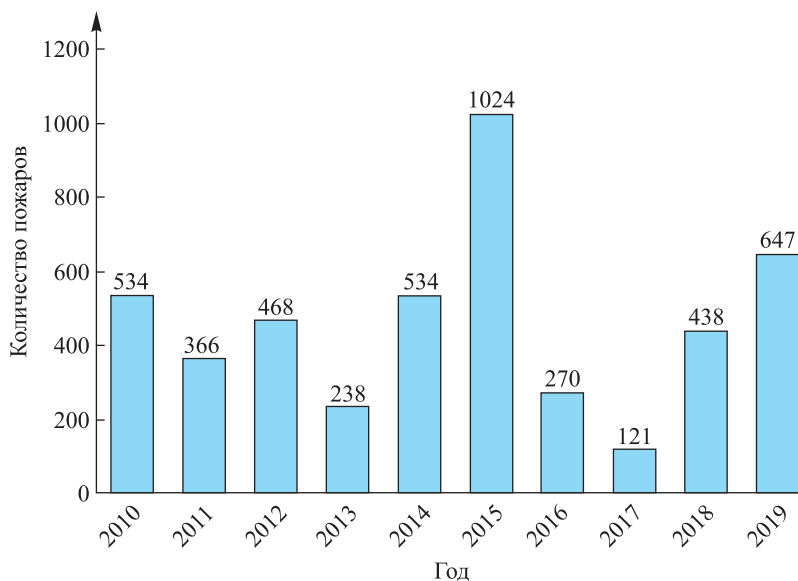


Рис. 20. Динамика лесных пожаров за 2010–2019 гг.
 (составлено по данным Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь)

Fig. 20. Dynamics of forest fires for 2010–2019
 (compiled according to the data of Ministry of Forestry of the Republic of Belarus)

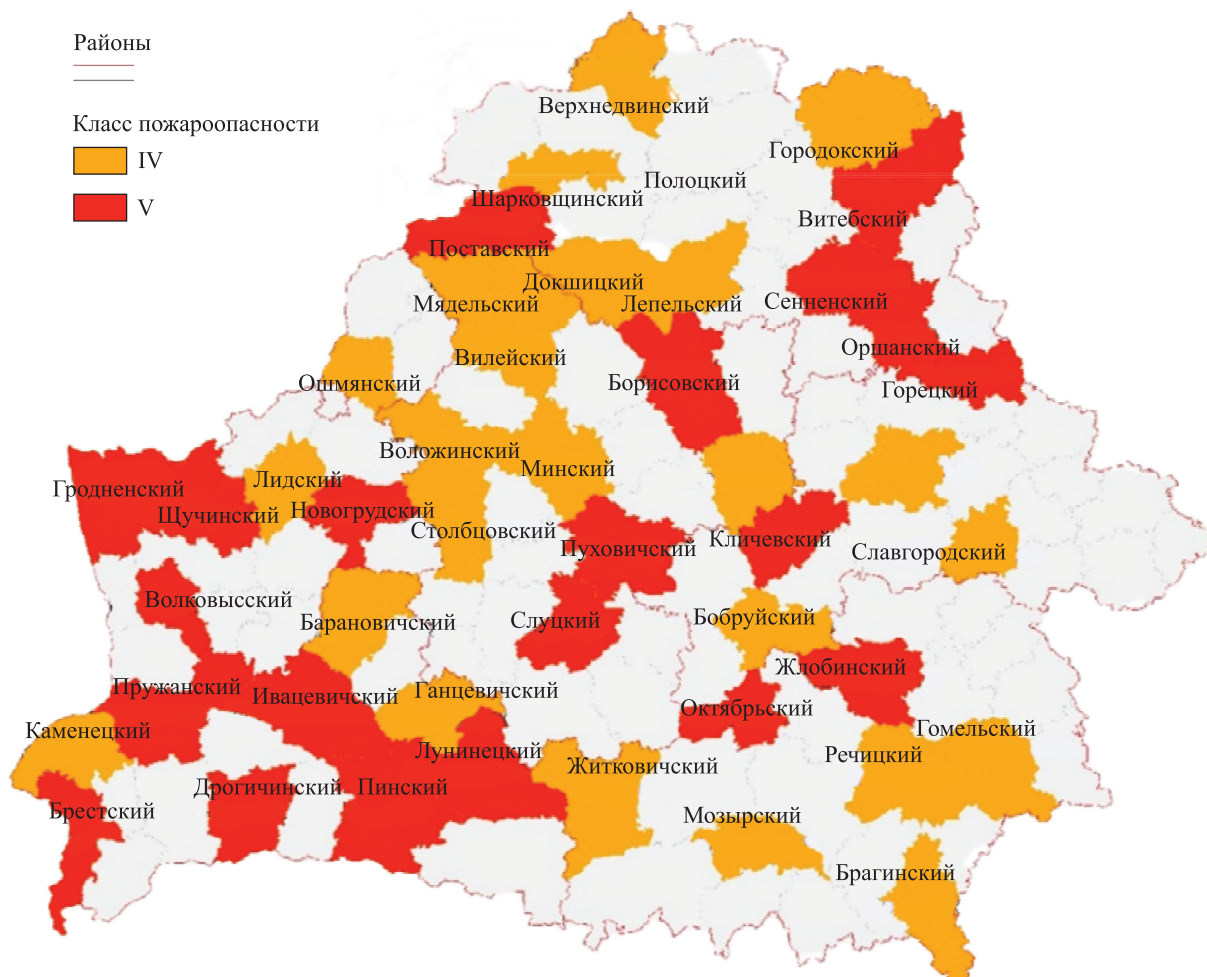


Рис. 21. Карта пожарной обстановки на 25.08.2015 (составлено на основе данных Белгидромета)

Fig. 21. Map of the fire situation on 25.08.2015 (compiled according to the data of Belhydromet)

Общее содержание озона. Влияние стратосферного озона на климат представляет собой сложный механизм, обусловленный различными процессами с обратными связями, определяющими теплообмен в атмосфере и зависящими от внешних и внутренних геофизических факторов. В настоящее время Всемирная метеорологическая организация рассматривает стратосферный озон как один из важнейших климатических факторов [8]. Его изменчивость определяется фотохимическими, динамическими, климатическими и циркуляционными факторами. Годовая динамика значений общего содержания озона над территорией Беларуси имеет типичное для средних европейских широт распределение (максимум весной и минимум осенью). Зафиксирована большая межсуточная и межгодовая изменчивость общего содержания озона. Однако в зимний период могут наблюдаться его значительные увеличения над территорией Беларуси и Восточной Европы. Подобные явления связывают с внезапными стратосферными потеплениями, которые резко увеличивают в течение 1–2 дней температуру воздуха и концентрацию озона, а также приводят к смене направления ветра в слое выше 25 км на противоположное [9]. Проведен анализ влияния всех крупных случаев внезапных стратосферных потеплений (высоких значений общего содержания озона), которые смещались на территорию Европы, на погодные условия в Европе (в частности, на территории Беларуси) за 1980–2021 гг.

При смещении внезапных стратосферных потеплений в сторону северо-восточной части Европы наблюдается значительное понижение приземной температуры воздуха. Для территории Беларуси диапазон минимальных приземных температур воздуха на юго-западе и северо-востоке колеблется от -13 до -21 °С. Общее содержание озона возрастает до 450 ед. Добсона и выше, а показатель высоты динамической тропопаузы, или потенциальной завихренности, – выше 4 ед., что соответствует высоте тропопаузы 300–340 ГПа (рис. 22). В большинстве случаев, когда внезапное стратосферное потепление смещается на Европу, фиксируются аномальные сильные морозы (до $-25...-30$ °С) в северо-восточной части Европы. По сравнению с периодами до внезапного стратосферного потепления и после его прохождения над Европой во время внезапного стратосферного потепления минимальная температура воздуха над территорией Беларуси уменьшается почти в 2 раза. Таким образом, подобные явления необходимо учитывать для своевременной адаптации к сильным морозам в зимний период.

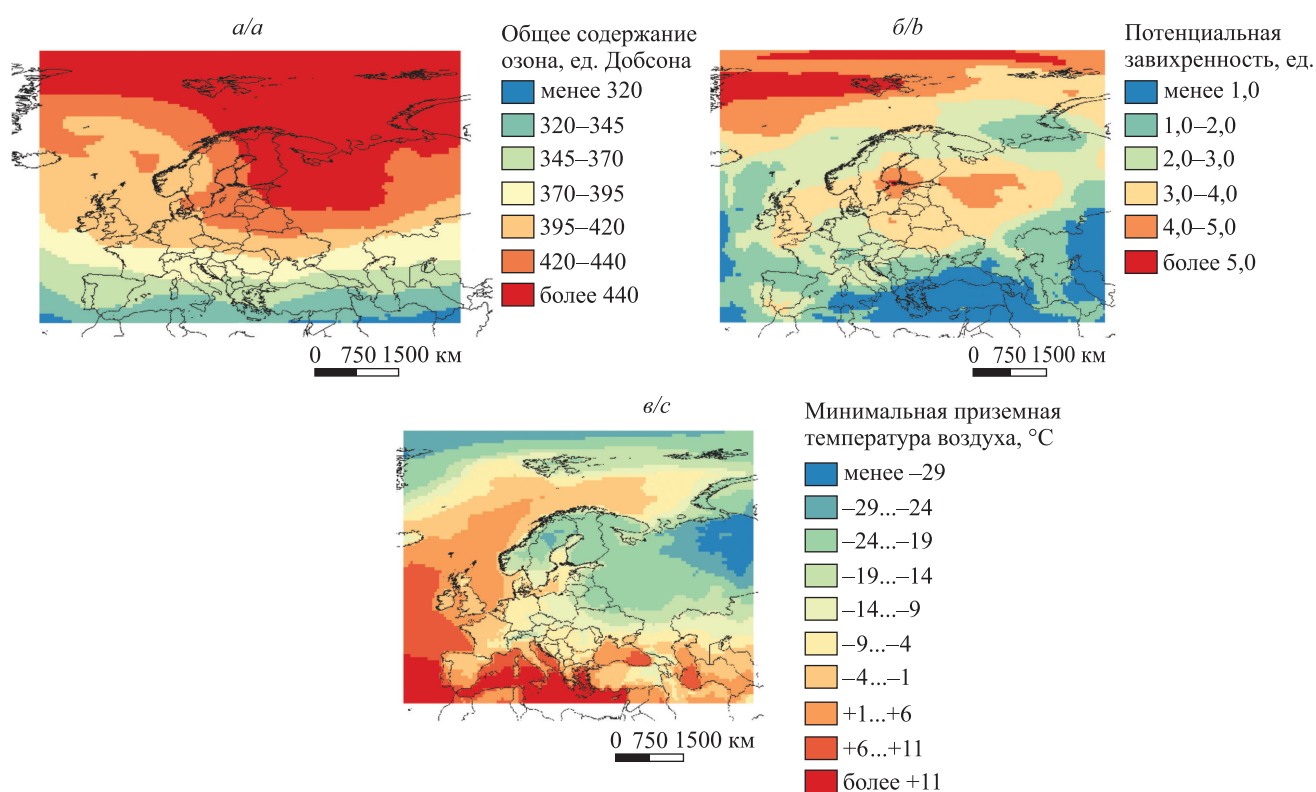


Рис. 22. Усредненные пространственные карты общего содержания озона (а), потенциальной завихренности (б) и минимальной приземной температуры воздуха (в) для всех крупных случаев внезапного стратосферного потепления, когда они смещаются на Европейский регион (по данным реанализа MERRA-2)

Fig. 22. Averaged spatial maps of total ozone (a), potential vorticity (b), and minimum surface air temperature (c) for all major sudden stratospheric warming events as they shift to the European region (according to MERRA-2 reanalysis)

Выводы

В ходе исследования выполнена оценка изменчивости температурного режима в Беларуси и европейской части России за 1900–2019 гг., а также оценка влияния циркуляционных колебаний путем расчета коэффициентов корреляции между индексами АО, NAO, EAWR, SCAND и температурой воздуха в январе и июле. Рассмотрена динамика опасных метеорологических явлений за 1975–2021 гг. на территории Беларуси за летний и зимний периоды, а также динамика пожароопасности на территории Беларуси и сопутствующие ей метеорологические условия за 1990–2019 гг. Изучено колебание общего содержания стратосферного озона, влияние стратосферных потеплений на высоту тропопаузы и погодные условия в приземном слое над территорией Беларуси и северо-восточной части Европы.

С помощью метода тренд-анализа выявлена неоднородная картина интенсивности потепления на территории Беларуси и европейской части России. Наибольшая скорость потепления отмечается в марте и декабре, где значения коэффициента наклонного линейного тренда равны 0,226 и 0,290 °C за 10 лет соответственно. Менее интенсивно происходит потепление в летний период (в августе коэффициент наклонного линейного тренда составил 0,068 °C за 10 лет).

В зимний период скорость потепления в 2 раза превышает скорость потепления в летний период (коэффициенты наклонного линейного тренда равны 0,190 и 0,081 °C за 10 лет соответственно). При этом во все сезоны и месяцы интенсивность потепления усилилась с 1970-х гг.

По данным корреляционного анализа в зимний период статистические связи между метеостанциями, расположенными в центре региона, и периферийными метеостанциями более тесные, чем в летний период. Если зимой главная ось овала корреляции направлена с юго-запада на северо-восток, то летом она вытянута с юга на север.

Важную роль в динамике термического режима играет циркуляционный фактор. Происходит заметное изменение характера статистических связей в зависимости от индекса циркуляции. Если индексы АО и NAO более эффективно влияют на термический режим западных районов зимой (положительные связи), то индекс SCAND в большей степени воздействует на термический режим восточного региона зимой (отрицательная связь). Колебание индекса EAWR также эффективнее влияет на термический режим восточного региона, но уже в летний период (отрицательная связь). Роль циркуляционных факторов на рассматриваемой территории неоднородная как по знаку, так и по интенсивности.

При анализе опасных метеорологических явлений выявлено, что за 1975–2021 гг. установлен рост количества дней с грозами (0,07 дня в год), градом (0,01 дня в год), гололедом (0,03 дня в год), числа случаев ливней (0,06 случая в зимний период, 0,04 случая в летний период, 0,53 случая в среднем в год), увеличение количества осадков (0,13 мм в зимний период, 0,06 мм в летний период, 0,12 мм в среднем в год) и уменьшение количества дней с метелью (0,07 дня в год), числа случаев с видимостью 1 км и менее (0,3 случая в зимний период, 0,14 случая в летний период, 1,3 случая в год), ветром со скоростью 14 м/с и более (0,007 дня в зимний период, 0,001 дня в летний период, 0,04 дня в среднем в год) и количества дней с туманом (0,05 дня в зимний период, 0,04 дня в летний период, 0,06 дня в среднем в год).

При анализе пожароопасности на территории Беларуси установлено, что за 1990–2019 гг. наиболее пожароопасным стал 2015 г., который характеризуется совокупностью неблагоприятных метеорологических условий в течение года – небольшим количеством осадков, относительной влажностью воздуха на уровне 20–30 %, летними максимальными температурами воздуха (34 и 36 °C), малоснежной зимой, ранним наступлением весны, уровнем половодья ниже среднего многолетнего и низким содержанием влаги в почве.

При анализе динамики уровня стратосферного озона над территорией Беларуси выявлено, что при смещении внезапных стратосферных потеплений в сторону северо-восточной части Европы наблюдается значительное понижение приземной температуры воздуха. Диапазон минимальных приземных температур воздуха в таких случаях колеблется от –13 до –21 °C, общее содержание озона возрастает до 450 ед. Добсона и выше, а высота динамической тропопаузы снижается.

В совокупности перечисленные результаты исследования могут использоваться при разработке мер адаптации к неблагоприятным последствиям изменения климата.

Библиографические ссылки

1. Ясюкевич ВВ, Говоркова ВА, Корнева ИА, Павлова ТВ, Попова ЕН, редакторы. *Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. Москва: Росгидромет; 2014. 1008 с.
2. Переведенцев ЮП, Гурьянов ВВ, Шанталинский КМ, Аухадеев ТР. *Динамика тропосферы и стратосферы в умеренных широтах Северного полушария и современные изменения климата в Приволжском федеральном округе*. Казань: Издательство Казанского университета; 2017. 186 с.

3. Переведенцев ЮП, Вильфанд РМ, Гурьянов ВВ, Шанталинский КМ, Николаев АА, Исмагилов НВ. *Мониторинг и прогнозирование климатической изменчивости на территории Приволжского федерального округа*. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019;371(1):67–94.

4. Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, et al., editors. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 1552 p.

5. Бедрицкий АИ, Коршунов АА, Хандожко ЛА, Шаймарданов МЗ. Показатели влияния погодных условий на экономику: чувствительность потребителя к воздействию гидрометеорологическому фактору. *Метеорология и гидрология*. 2000;2:5–9.

6. Логинов ВФ, Лысенко СА. *Современные изменения глобального и регионального климата*. Минск: Беларуская навука; 2019. 315 с.

7. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 218 с.

8. World Meteorological Organisation. *Scientific assessment of ozone depletion: 2014*. Geneva: World Meteorological Organisation; 2014. 416 p. (Global ozone research and monitoring project; report No. 55).

9. Schlender TV, Zhuchkevich VV, Krasouski AN, Umreika SD. Sudden Stratospheric Warming (SSW) climatic contribution to winter temperature in Belarus: case of SSW 2017/2018. In: *Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and management; 2019 November 26–28; Moscow, Russia* [Internet]. 2019 [cited 2022 February 6]. Available from: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/288761/1/Schlender_2020_IOP_Conf_Ser_Earth_Environ_Sci_606_012053.pdf (IOP conference series: Earth and environmental science; volume 606). DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012053.

References

1. Yasyukevich VV, Govorkova VA, Korneva IA, Pavlova TV, Popova EN, editors. *Vtoroi otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second assessment report on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet; 2014. 1008 p. Russian.

2. Perevedentsev YuP, Guryanov VV, Shantalinsky KM, Aukhadееv TR. *Dinamika troposfery i stratosfery v umerennykh shiro-takh Severnogo polushariya i sovremennye izmeneniya klimata v Privolzhskom federal'nom okruge* [Dynamics of the troposphere and stratosphere in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere and current climate changes in the Volga Federal District]. Kazan: Publishing House of Kazan University; 2017. 186 p. Russian.

3. Perevedentsev YuP, Vil'fand RM, Guryanov VV, Shantalinsky KM, Nikolaev AA, Ismagilov NV. Monitoring and prediction of climate variability in the Volga Region. *Hydrometeorological Research And Forecastsing*. 2019;371(1):67–94. Russian.

4. Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, et al., editors. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 1552 p.

5. Bedritsky AI, Korshunov AA, Khandozhko LA, Shaimardanov MZ. Indices of weather impact on the economy: user sensitivity to the influencing hydrometeorological factor. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2000;2:5–9. Russian.

6. Loginov VF, Lysenko SA. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2019. 315 p. Russian.

7. Loginov VF, Lysenko SA, Melnik VI. *Izmeneniya klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate changes in Belarus: causes, consequences, possibilities of regulation]. Minsk: Entsyklopediks; 2020. 218 p. Russian.

8. World Meteorological Organisation. *Scientific assessment of ozone depletion: 2014*. Geneva: World Meteorological Organisation; 2014. 416 p. (Global ozone research and monitoring project; report No. 55).

9. Schlender TV, Zhuchkevich VV, Krasouski AN, Umreika SD. Sudden Stratospheric Warming (SSW) climatic contribution to winter temperature in Belarus: case of SSW 2017/2018. In: *Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and management; 2019 November 26–28; Moscow, Russia* [Internet]. 2019 [cited 2022 February 6]. Available from: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/288761/1/Schlender_2020_IOP_Conf_Ser_Earth_Environ_Sci_606_012053.pdf (IOP conference series: Earth and environmental science; volume 606). DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012053.

Получена 17.05.2022 / исправлена 28.06.2022 / принята 05.07.2022.

Received 17.05.2022 / revised 28.06.2022 / accepted 05.07.2022.