

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВТОРЯЕМОСТИ ОЧЕНЬ СИЛЬНОГО ВЕТРА В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

М. В. Лукша, А. А. Новик

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе проведен анализ очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года на территории Беларуси. Построены карты пространственного распределения случаев очень сильного ветра. Представлены повторяемость и тенденции развития опасного гидрометеорологического явления в условиях изменяющегося климата. Результаты проведенных исследований показали, что наиболее часто очень сильный порывистый ветер фиксируется в северо-западных и восточных регионах страны, особенно в последнее десятилетие. Помимо физико-географических условий, оказывающих влияние на пространственно-временное распределение исследуемого явления, определены приземные синоптические, высотные аэрологические факторы, способствующие усилению ветра до очень сильного. Полученные результаты могут быть использованы для разработки природоохранных мероприятий с целью снижения негативных последствий от опасных явлений погоды.

Ключевые слова: очень сильный (шквалистый) ветер; холодный период года; приземные синоптические условия; высотные аэрологические условия.

Для цитирования: Лукша М. В., Новик А. А. Пространственно-временное распределение повторяемости очень сильного ветра в холодный период года на территории Беларуси // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 22–32.

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF VERY STRONG WIND FREQUENCY OF OCCURRENCE IN THE COLD SEASON OF THE YEAR IN THE TERRITORY OF BELARUS

M. V. Luksha, A. A. Novik

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The study analyzes very strong (including squally) winds during the cold season in the territory of Belarus. The main meteorological conditions for the development of a hazardous hydrometeorological phenomenon from November to March have been determined based on the processing of data from the network of hydrometeorological observations of Belarus for the period 1989–2022, when the country has a steady increase in air temperature, especially during the cold season. Maps of the spatial distribution of cases of very strong wind have been constructed. The recurrence and development trends of a hazardous hydrometeorological phenomenon in a changing climate are presented. The results of the conducted studies have shown that very strong gusty winds are most often recorded in the northwestern and eastern regions of the country, and there has also been an increase in the number of hazardous hydrometeorological phenomena in the last decade. In addition to the physical and geographical conditions of weather stations that affect the spatial and temporal distribution of the phenomenon under study, surface synoptic, high-altitude aerological factors contributing to the strengthening of the wind to the criteria of very strong are determined. The revealed patterns of spatial and temporal distribution can be used to develop environmental protection measures in order to reduce the negative consequences of hazardous weather phenomena, and the established links between the considered hazardous hydrometeorological phenomenon and the aerosynoptic conditions of its formation can be used to replenish the methodological base on forecasting very strong (including squally) winds in the cold season.

Keywords: very strong (squally) wind; cold season; surface synoptic conditions; high-altitude aerological conditions.

For citation: Luksha M. V., Novik A. A. Spatial and temporal distribution of very strong wind frequency of occurrence in the cold period of the year in the territory of Belarus. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 22–32.

Введение. Случаи возникновения очень сильного ветра (мгновенная скорость ветра (порывы) 25 м/с и более) относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям (ОЯ) [1].

Поскольку данная работа является продолжением исследований, связанных с анализом конвективных явлений холодного периода года, в статье рассматриваются случаи не только градиентного, но и шквалистого ветра [2–5]. Шквалом называется резкое в течение короткого времени увеличение скорости ветра на 8 м/с и более, сопровождающееся изменением его направления в результате развития кучево-дождевой облачности.

Прогнозирование очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, имеющего тенденцию к увеличению числа случаев в условиях изменяющегося климата, является важной проблемой в сфере оперативного обеспечения метеорологической безопасности страны.

Проблемами изучения процессов формирования очень сильного порывистого ветра и шквалов в холодный период года занимался ряд белорусских (В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока, Е. Н. Сумак, И. С. Данилович и др.) и зарубежных ученых (Ю. И. Юсупов, А. А. Алексеева и др.).

Исследования В. Ф. Логинова, А. А. Волчека, И. Н. Шпока позволили установить, что с октября по февраль шквалы на территории Беларуси регистрируются редко (1–2 случая в 15–20 лет). Так, за 30-летний период (1975–2005 гг.) шквалы регистрировались 2 раза (1975, 1993 г.) в январе, 3 раза (1974, 1983, 1995 г.) – в декабре, 4 раза (1974, 1979, 1993, 1997 г.) – в феврале. С марта по сентябрь повторяемость шквалов возрастает в среднем до 4–6 случаев в год [6–9]. Низкая повторяемость шквалов, в особенности очень сильных шквалов, в холодный период года подтверждается результатами данного исследования.

В. Ф. Логиновым установлено, что уменьшение среднегодовой скорости ветра с 1970-х гг. составило от 3,6 до 2,9 м/с [10]. Исследованиями И. С. Данилович и И. В. Костюченко выявлено, что среднегодовая скорость ветра в период с 1989 по 2020 г. продолжает снижаться на 0,9–1,0 м/с. При этом уменьшение сезонных показателей средней скорости ветра составляет 0,6–1,2 м/с, максимальной – 2,5–3,5 м/с. Вместе с тем максимальный порыв ветра снизился в зимний период на 1–5 м/с, но увеличился летом на 1–3 м/с [11].

Согласно исследованию изменения климата (1903–2012 гг.), экстремальных погодных и климатических явлений и их связи с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому, проведенному В. Ф. Логиновым, Ю. А. Бровкой, В. С. Микуцким, в ближайшее время должно снижаться количество ОЯ, так как происходит тенденция уменьшения числа дней с меридиональной южной циркуляцией [12].

Е. Н. Сумак и И. Г. Семёнова осуществили исследование циклонической активности и повторяемости ОЯ над территорией Беларуси (1995–2015 гг.). Ими установлено, что неблагоприятные и опасные гидрометеорологические явления вызывали лишь циклонические вихри южных и западных траекторий, которые выходили интенсивными и активными, как правило, достигая максимальной стадии своего развития на территории Беларуси и вызывая неблагоприятные и опасные гидрометеорологические явления, в том числе грозы, сильные ливни, снегопады, шквалистый ветер [13].

На территории Российской Федерации современные исследования по данной проблеме проводились Ю. И. Юсуповым. Им разработан прогноз шквалов и интенсивных осадков, в том числе и для холодного периода, с использованием векторной фронтогенетической функции и изэнтропического потенциального вихря Эртеля в состоянии насыщения с использованием расчетов по выходной информации мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW [14]. Ученые А. Н. Неижмак и И. П. Растворгувеев участвовали в разработке методики прогноза конвективных ОЯ по комплексу спутниковых и аэрометрических данных [15]. А. А. Алексеева занималась вопросами разработки прогноза сильных шквалов на европейской территории России и их идентификации доплеровскими радиолокаторами [16].

Также российскими учеными С. О. Дементьевой, Н. В. Ильиной, М. В. Шаталиной предложен метод прогноза опасных конвективных явлений, основанный на анализе расчетных пространственно-временных распределений радиолокационной отражаемости явлений и сравнении их с характерными параметрами мощных конвективных явлений с заблаговременностью 24 ч на основе мезомасштабной негидростатической численной модели WRF-ARW. Авторы исследования пришли к выводу, что данный метод позволяет добиться лучшей успешности прогноза, чем при использовании индексов неустойчивости атмосферы [17].

Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции над Европейской территорией России (ЕТР) с помощью модели WRF-ARW, проведенные Н. Ф. Вельтищевым и В. Д. Жупановым, показали, что расчеты на более мелких сетках позволяют воспроизводить обильные ливневые осадки и зоны сильных ветров в районах интенсивной конвекции. При этом наиболее слабым местом является прогноз положения очагов конвекции [18, 19].

В настоящее время в оперативной практике метеорологических подразделений Беларуси не существует разработанных методик прогнозирования порывистого ветра [20], а лишь применяются результаты расчетов численных моделей (GFS, COSMO, UKMO, WRF и ICON).

Отсутствие разработанных алгоритмов и методик прогноза таких опасных гидрометеорологических явлений, как очень сильный (в том числе шквалистый) ветер, связанных преимущественно с фронтальной деятельностью (в том числе с кучево-дождевой облачностью) и имеющих тенденцию к увеличению их количества в условиях изменяющегося климата, подтверждает актуальность выбранной проблемы исследования, в частности, в области качественного метеорологического обеспечения страны своевременными прогнозами погоды и штормовыми предупреждениями. Решение данных вопросов играет важную роль в предотвращении возможных ущербов в различных отраслях экономики и безопасности жизни населения страны.

Анализ изученности рассматриваемой проблемы показал, что имеющиеся на территории Республики Беларусь работы по пространственно-временному исследованию опасных гидрометеорологических явлений требуют уточнений на современном этапе изменения климата. Вместе с тем повторяемость ОЯ холодного периода года определяется не только синоптической ситуацией, но и свойствами подстилающей поверхности. В связи с этим целью данного исследования стал анализ особенностей пространственно-временного распределения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года на территории Республики Беларусь и аэросиноптических условий его формирования.

Отсутствие сформированных методик прогноза очень сильного порывистого (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года в Беларуси и недостаточная освещенность рассматриваемого вопроса для условий изменяющегося климата на территории республики свидетельствуют о его теоретической значимости, а именно о необходимости пополнения методической базы по вопросам прогнозирования ОЯ в холодный период года.

Материалы и методы исследования. На основании анализа архивных метеорологических данных Белгидромета проведена статистическая обработка данных числа случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март за период с 1989 по 2022 г. в виде таблиц метеорологических наблюдений на станциях и постах – ТМС за холодный период с 1989 по 2022 г. [21]. При анализе определены приземные метеорологические условия (температура воздуха, барические тенденции, скорость и направление ветра, облачность и явления погоды, в том числе количество выпавших осадков и ухудшение видимости в них), при которых отмечался очень сильный порывистый (в том числе шквалистый) ветер.

В качестве начала выборки был взят 1989 г., так как именно с этого года на территории Беларуси регистрируется самый продолжительный период потепления за весь период инструментальных наблюдений на протяжении последних 130 лет (среднегодовая температура в стране выросла на 1,2 °C за последние 30 лет) [22, 23]. При этом отмечается особенно резкое повышение зимних температур. Так, например, согласно данным Белгидромета, средняя температура воздуха в период декабрь 2021 г. – февраль 2022 г. составила –1,8 °C, что на 1,6 °C выше климатической нормы [24].

Далее по результатам анализа исходной информации было осуществлено картирование особенностей пространственного распределения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра по территории Республики Беларусь, определены физико-географические условия возникновения ОЯ, а также временные тенденции ОЯ в условиях изменяющегося климата.

На следующем этапе проведен анализ приземных карт погоды на базе бумажных и электронных архивных данных Белгидромета [21], отобранных за ту же дату и синоптический срок, когда были отмечены случаи возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года с целью определения синоптических условий формирования ОЯ с ноября по март (барические образования и их стадии развития, атмосферные фронты).

Посредством использования аэрологических диаграмм, полученных по данным реанализа ERA5 с помощью бесплатной интернет-платформы ThundeR [25], выявлены высотные аэрологические факторы (высота верхней и нижней границы облачности, температура воздуха и дефицит точки росы на уровне изобарической поверхности AT-850, скорость и направление ветра на уровнях AT-700, AT-500 и AT-300, индексы неустойчивости атмосферы), которые способствовали возникновению очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март.

При выполнении работы были использованы следующие методы:

- статистический метод для обработки многолетних рядов метеорологических данных;
- метод синтеза и анализа исходной аэросиноптической информации;
- картографический метод для определения пространственного распределения ОЯ по территории Республики Беларусь;
- метод наблюдений и личного опыта работы в сфере синоптической метеорологии;
- метод моделирования синоптических ситуаций для прогноза опасных гидрометеорологических явлений холодного периода года.

Результаты и их обсуждение. Анализ повторяемости очень сильного (в том числе шквалистого) ветра показал, что за холодный период 1989–2022 гг. на территории Республики Беларусь было зафиксировано 66 случаев ОЯ. При этом 50 % случаев пришлось на усиление ветров западного, 36 % – северо-западного и 14 % – юго-западного направления. Порывы ветра достигали 25–32 м/с. Стоит отметить, что шквалистое усиление ветра до критериев очень сильного порывистого было зафиксировано единожды (14 января 2022 г. на метеостанции Воложин).

При этом в разрезе областей 16 случаев очень сильного ветра было зафиксировано в Могилёвской области, 15 случаев – в Витебской, 15 случаев – в Гродненской, 10 случаев – в Минской, 6 случаев – в Брестской и 4 случая – в Гомельской области (рис. 1).

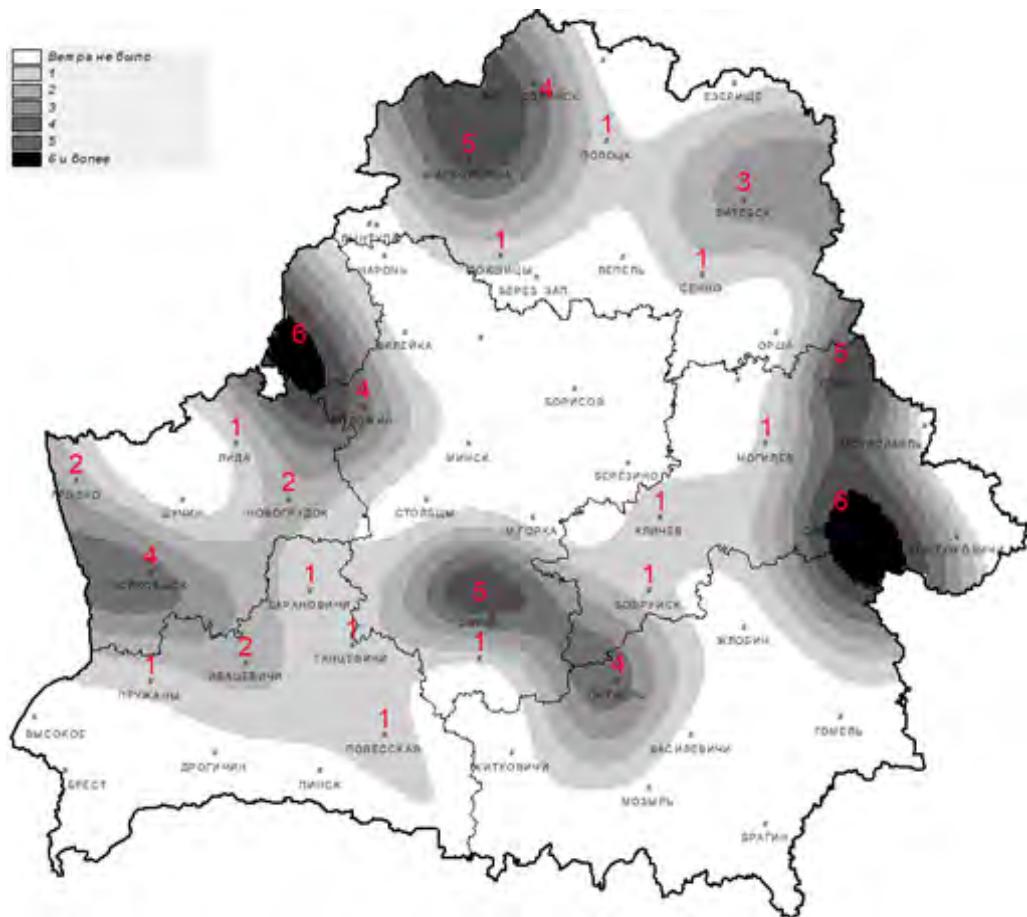


Рис. 1. Территориальное распределение количества случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, наблюдавшихся в Беларуси за холодный период 1989–2022 гг.

Fig. 1. Territorial distribution of the number of cases of very strong (including squally) winds observed in Belarus during the cold season 1989–2022

В территориальном распределении наибольшее число случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра приходится на северо-западные и восточные регионы страны, что видно из рис. 1. Также отмечается увеличение числа случаев данного ОЯ в центральных регионах. Распределение очень сильного ветра по территории страны определяется не только синоптическими, но и местными физико-географическими условиями метеорологических станций. Так, северо-запад республики первый подвергается влиянию активных западных и ныряющих циклонов, при движении которых возникают значительные барические градиенты, усиливающиеся конвективной деятельностью на атмосферных фронтах [26]. Местные особенности рельефа и растительного покрова некоторых метеостанций (метеостанции Ошмяны и Воложин располагаются в пределах Ошмянской возвышенности, Славгород и Горки – на возвышенном и открытом со всех сторон рельефе, а Слуцк – на открытой незалесенной местности) также способствуют усилению ветра до критериев очень сильного.

Наибольшее число случаев (28 зарегистрированных фактов) очень сильного (в том числе шквалистого) ветра пришлось на период с ноября по март 1989–2000 гг. В следующем десятилетии (2001–2010 гг.) наблюдалась тенденция уменьшения количества ОЯ до 17 случаев, а в последнем десятилетии (2011–2022 гг.) отмечается увеличение числа случаев очень сильного (в том числе шквалистого) порывистого ветра (21 случай). При этом стоит отметить, что 7 случаев приходится на 14 января 1993 г. и 8 случаев на 14 января 2022 г., связанных с выходом активных циклонов западных траекторий.

Вместе с тем в ближайшее десятилетие должно отмечаться увеличение числа случаев очень сильного ветра, что подтверждается линией тренда, представленной на рис. 2.

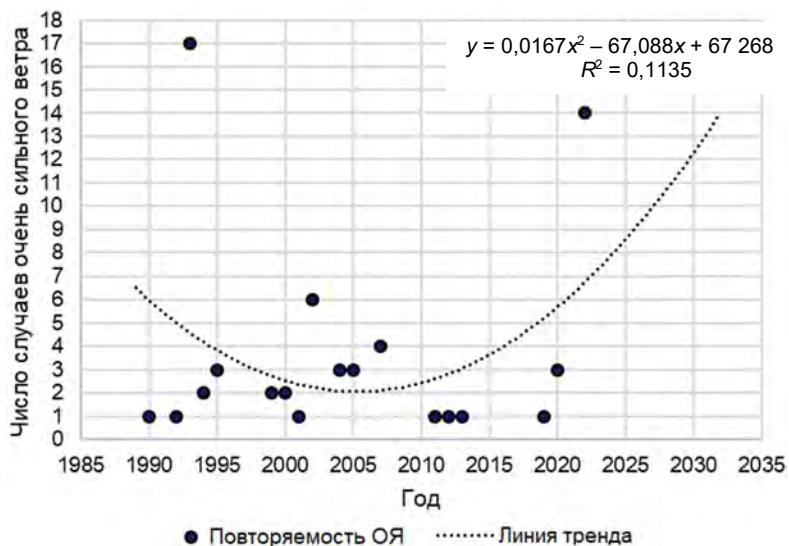


Рис. 2. Повторяемость случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, наблюдавшихся в Беларусь за холодный период 1989–2022 гг., и временные тенденции

Fig. 2. The frequency of cases of very strong (including squally) winds observed in Belarus during the cold season 1989–2022 and temporary trends

В разрезе областей за последнее десятилетие заметное увеличение числа случаев возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра наблюдалось на территории Гродненской области (47 % случаев). Для Витебской области, наоборот, была характерна тенденция уменьшения количества исследуемого ОЯ (79 % случаев зафиксировано в холодный период 1989–2000 гг.). Для остальных областей Республики Беларусь было характерно равномерное распределение фактов возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в течение рассматриваемого промежутка времени.

Во временном разрезе холодного периода года 38 случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было отмечено в январе, 12 случаев – в феврале, 9 случаев – в марте, 6 случаев – в ноябре и 1 случай – в декабре. Такое распределение усиления ветра до критериев очень сильного порывистого (в том числе шквалистого) объясняется особенностями атмосферной циркуляции над территорией нашей страны.

Что касается приземных синоптических условий формирования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март 1989–2022 гг., то они определялись не только плотным барическим градиентом, но и развитием кучево-дождевой облачности, усилением динамического фактора при прохождении фронтальных разделов, а именно основного холодного фронта (37 случаев), холодного фронта с волнами (5), вторичных холодных фронтов (17) и фронтов окклюзий (7 случаев).

Вместе с тем анализ приземных метеорологических условий показал, что до прохождения атмосферных фронтов отмечалось падение атмосферного давления, которое после их прохождения сменялось активным ростом, что свидетельствовало о наличии барических градиентов в атмосфере, усугубляющихся динамическим фактором в результате смещения фронтальных разделов.

Усиление ветра до критериев очень сильного порывистого отмечалось в основном в диапазоне слабоположительных температур (0... +6 °C), поэтому в 65 % случаев сопровождалось ливневым дождем. При температурах близких к 0°C осадки выпадали в смешанном (15 %) или твердом (8 %) виде. При активном развитии атмосферных процессов дожди сопровождались грозами и выпадением снежной крупы. В 12 % случаев усиление ветра до критериев очень сильного порывистого осадками не сопровождалось.

Атмосферные фронты были связаны с ложбинами активных глубоких циклонов, в основном западных траекторий (59 случаев). 7 случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было зафиксировано при прохождении фронтальных разделов от ныряющих циклонов. Циклоны смещались, как правило, в стадии максимального развития. При этом давление в центре циклонов колебалось от 954 до 995 гПа (исключение: случай 17–18 ноября 2000 г. в Славгороде – 1007 гПа).

На рис. 3 в качестве типичной синоптической ситуации, характерной для возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, представлен случай 14 января 2022 г., когда в результате прохождения холодного фронта от западного циклона FAMKE произошло усиление ветра порывами 26–32 м/с на метеостанциях Воложин, Ошмяны, Новогрудок, Полесская, Горки, Могилёв, Славгород и Октябрь.

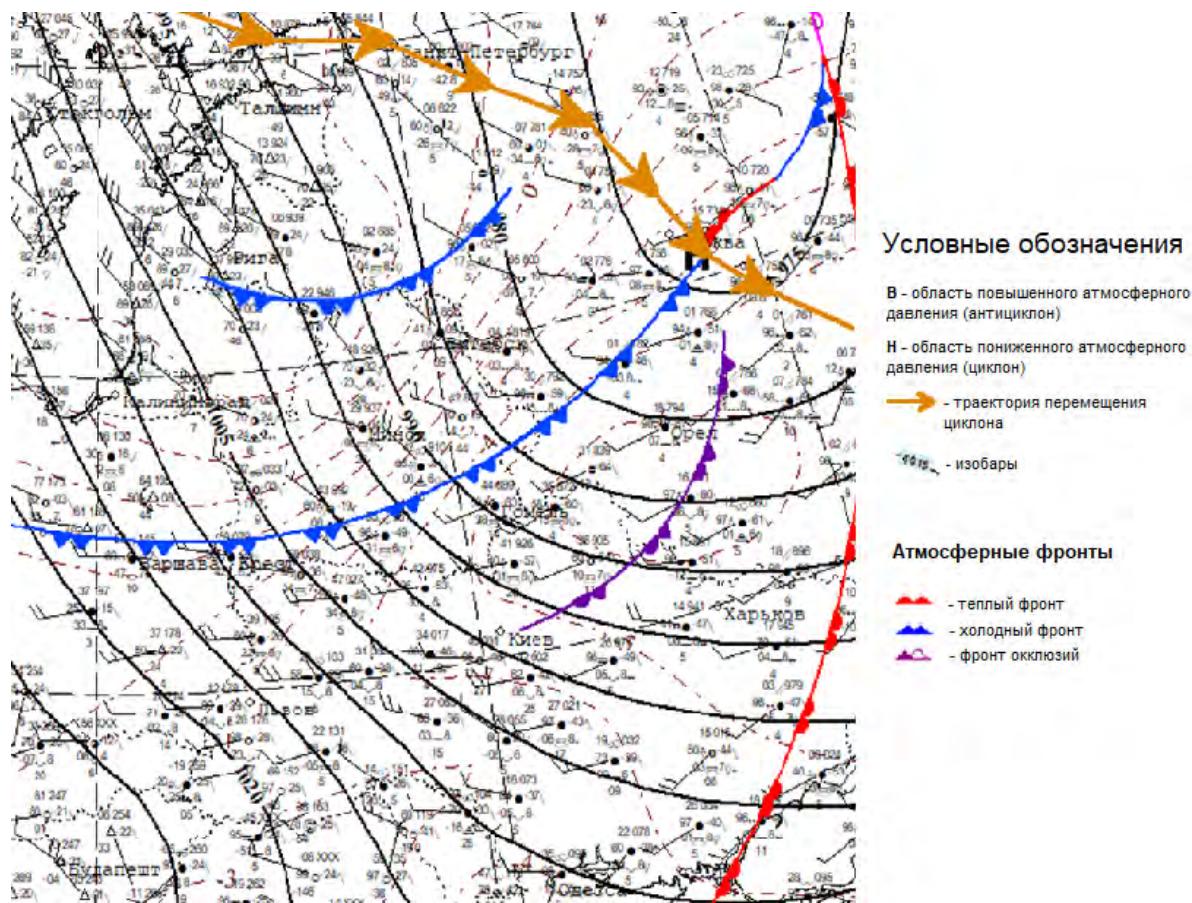


Рис. 3. Приземная карта погоды за 12 UTC 14 января 2022 г. и траектория перемещения циклона FAMKE

Fig. 3. Surface weather map for 12 UTC on January 14, 2022 and the trajectory of Cyclone 'FAMKE'

Циклон FAMKE сформировался 13 января 2022 г. на волновом возмущении холодного атмосферного фронта от обширного североатлантического циклона с центром над Белым морем. Двигаясь с западными воздушными потоками, на утро 14 января 2022 г. он достиг районов Санкт-Петербурга. Далее, углубляясь, циклон смещался в московском направлении.

При этом погодные условия Беларуси определялись влиянием активных атмосферных фронтов от циклона FAMKE, которые привели к формированию неустойчивой ветреной погоды в республике. В утренние часы территория Беларуси находилась под влиянием фронта окклюзий, а в первую половину дня отмечалось прохождение основного холодного фронта и вторичных холодных фронтов при плотном барическом градиенте.

В результате днем на большей части территории страны прошли осадки (дождь, переходящий в мокрый снег, снег), местами по республике отмечалось налипание мокрого снега, в отдельных районах прогремели грозы. Во многих районах страны произошло усиление ветра порывами 15–24 м/с, которые местами достигали 26–32 м/с (рис. 4).

В ночные часы 15 января 2022 г. республика оказалась в холодной тыловой части циклона, поэтому в осадках начал преобладать снег, сохранялся порывистый ветер и метели. Днем, по мере смещения циклона вглубь России, снегопады, порывы ветра и метели в Беларуси ослабели.

Высотные аэрологические условия формирования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра порывами 25 м/с и более, как правило, были связаны с развитием кучево-дождевой облачности, которая имела нижнюю и верхнюю границу около 500 и 3000 м соответственно.

Температуры воздуха на уровне изобарической поверхности AT-850 колебались от +1,4 до –11,3 °C, дефициты точки росы – от 0 до 10 °C. При этом гребень теплого воздуха быстро сменялся ложбиной холода. В сложившейся тенденции исключением являлся случай 17–18 ноября 2000 г. в Славгороде, где фиксировалась температура +6,2 °C.

По высотам преобладали ветры северо-западного направления. При этом на уровне AT-700 наблюдалась ветры со скоростями 50–170 км/ч, на уровне AT-500 – 50–230, на уровне AT-300 – 50–300 км/ч. Данный факт свидетельствует о наличии струйных течений на уровнях AT-700, AT-500 и AT-300, способствующих быстрому смещению барических образований и усиливающих конвективные процессы.

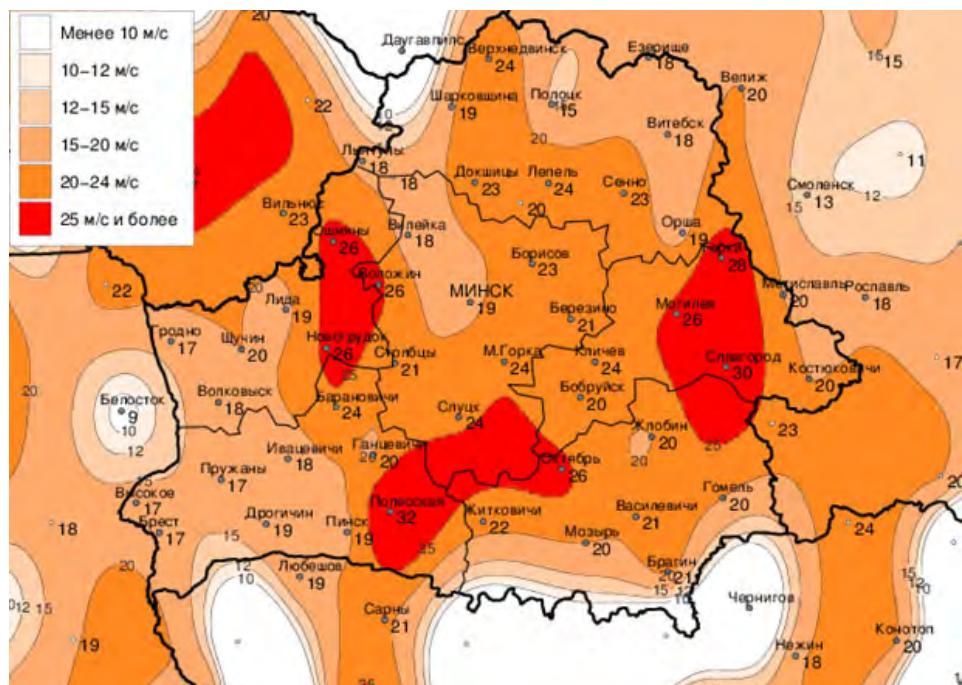


Рис. 4. Распределение максимальной скорости ветра (м/с) по территории Беларуси с 9 часов 14 января до 9 часов 15 января 2022 г.

Fig. 4. Distribution of the maximum wind speed (m/s) on the territory of Belarus from 9 a. m. on January 14 to 9 a. m. on January 15, 2022

На рис. 5 представлена аэрологическая диаграмма за 14 января 2022 г. по метеостанции Полесская, где в период с 12 ч 18 мин до 12 ч 30 мин усиливался ветер порывами до 32 м/с. Так, согласно аэрологическим данным, на уровне изобарической поверхности АТ-850 наблюдался гребень теплого и относительно сухого воздуха, поэтому усиление ветра в результате прохождения холодного фронта осадками не сопровождалось. При этом в приземном слое наблюдался порывистый северо-западный ветер со скоростями до 130 км/ч, а в средней и верхней тропосфере преобладали сильные ветры северо-западного направления со скоростями до 260 км/ч.

Индексы неустойчивости атмосферы, как правило, имели следующие значения: CAPE – 0...81 Дж/кг (небольшая неустойчивость), CIN – 0...–30 Дж/кг (конвекция), Li – 0...24 (устойчивое состояние атмосферы). Эти значения говорят о том, что при прогнозе очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в холодный период года следует использовать значения индекса неустойчивости CIN, который указывает на вероятность развития конвективных процессов в атмосфере [27].

Заключение. В холодный период с 1989 по 2022 г. на территории Республики Беларусь было зафиксировано 66 случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра порывами 25–32 м/с.

В пространственном разрезе наибольшее число случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра пришлось на северо-западные, восточные и центральные регионы страны, что обусловлено не только синоптическими условиями (северо-запад Республики первый подвергается влиянию активных западных и ныряющих циклонов), но и местными физико-географическими условиями метеорологических станций (возвышенный рельеф, открытая незалесенная местность и др.).

Для случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра характерен сложный временной ход. Так, наибольшее количество зафиксированных фактов ОЯ пришлось на период с ноября по март 1989–2000 гг., а с 2001 по 2010 г. наблюдалась тенденция уменьшения количества ОЯ, которая сменилась новым ростом в последнем десятилетии (2011–2022 гг.). Вместе с тем линия тренда указывает на возможное дальнейшее увеличение количества рассматриваемого ОЯ.

В разрезе областей заметное увеличение числа случаев возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра за последнее десятилетие было зафиксировано на территории Гродненской области, в то время как для Витебской области, наоборот, отмечалась тенденция уменьшения количества исследуемого ОЯ. Для остальных областей Республики Беларусь было характерно равномерное распределение числа случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра в течение рассматриваемого промежутка времени. В разрезе холодного периода года 57 % случаев очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было отмечено в январе.

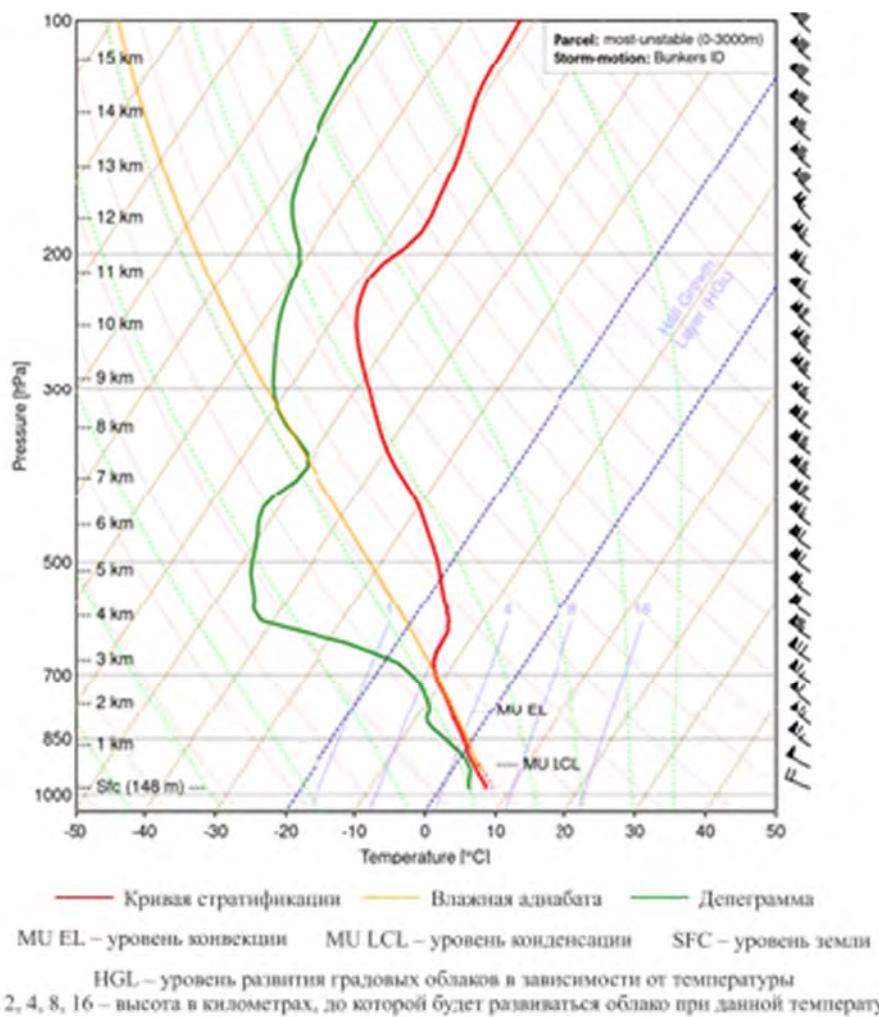


Рис. 5. Аэробологические условия возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра на метеостанции Полесская (14 января 2022 г. 9 UTC)

Fig. 5. Aerological conditions for the occurrence of very strong (including squally) winds at the Polesskaya weather station (January 14, 2022, 9 UTC)

Анализ приземных метеорологических и синоптических условий показал, что возникновение очень сильного (в том числе шквалистого) ветра с ноября по март носит преимущественно фронтальный характер. Приземные синоптические факторы формирования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра определялись не только плотным барическим градиентом, но и развитием кучево-дождевой облачности, усилением динамического фактора при прохождении фронтальных разделов: основного холодного фронта (37 случаев), холодного фронта с волнами (5), вторичных холодных фронтов (17) и фронтов окклюзий (7 случаев).

Усиление ветра до критериев очень сильного порывистого наблюдалось при выходе активных глубоких циклонов западных траекторий (59 случаев) и ныряющих (7 случаев).

Анализ высотных аэробологических условий показал, что возникновение очень сильного (в том числе шквалистого) ветра было связано с развитием кучево-дождевой облачности, которая имела уровень конденсации и конвекции на высотах около 500 и 3000 м соответственно. Температуры воздуха на уровне изобарической поверхности AT-850 преимущественно колебались от $+1,4^{\circ}\text{C}$ до $-11,3^{\circ}\text{C}$, дефициты точки росы составляли 0–10 $^{\circ}\text{C}$. При этом гребень теплого воздуха быстро сменялся ложбиной холода. По высотам преобладали сильные ветры северо-западного направления, достигающие критериев струйного течения. Среди исследуемых индексов неустойчивости при прогнозе конвективных явлений погоды в холодный период года наилучшие показатели имеет индекс CIN, который указывает на вероятность развития конвективных процессов в атмосфере, сопровождающихся усилением ветра до критериев очень сильного порывистого.

Вышеперечисленные закономерности возникновения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра территории Республики Беларусь с ноября по март 1989–2022 гг. позволили сформировать следующие синоптические ситуации, благоприятные к прогнозу ОЯ в холодный период года:

- прохождение основных и вторичных холодных фронтов, холодных фронтов с волнами, фронтов окклюзий, связанных с выходом глубоких западных и ныряющих циклонов в стадии максимального развития;
- наличие теплой и относительно влажной массы у земли и на уровне AT-850; наличие струйных течений северо-западного направления на уровнях AT-700, AT-500 и AT-300;
- существование слоя конвективной неустойчивости в атмосфере (значения индекса неустойчивости CIN 0...–30 Дж/кг).

Выявленные закономерности могут быть использованы в качестве синоптических рекомендаций. На начальном этапе с помощью анализа карт приземного анализа, карт барической топографии, аэрометрологических диаграмм они помогут определить наличие приземных метеорологических и высотных аэрологических условий, способствующих формированию очень сильного (в том числе шквалистого) ветра, что в сочетании с результатами расчетов численных моделей и оперативными радиолокационными данными в дальнейшем позволит составить прогноз опасных гидрометеорологических явлений для определенной территории или пункта.

Полученные результаты особенностей пространственно-временного распределения очень сильного (в том числе шквалистого) ветра холодного периода года на территории Беларуси могут быть использованы при разработке природоохранных мероприятий с целью снижения негативных последствий от ОЯ в Беларуси и уменьшению рисков влияния этого явления на экономику и население страны. Установленные аэросиноптические условия образования очень сильного (в том числе шквалистого) ветра могут рассматриваться в качестве синоптических рекомендаций для пополнения методической базы по вопросам прогнозирования ОЯ.

Список использованных источников

1. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения : ТКП 17.10-06-2008 (02120). – Минск : Минприроды, 2008. – 30 с.
2. Лукша, М. В. Аэросиноптические условия образования зимних гроз на примере аэродрома Минск-2 / М. В. Лукша, А. А. Новик // Журнал БГУ. География. Геология. – 2022. – № 1. – С. 42–56.
3. Лукша, М. В. Научное обоснование прогноза конвективных явлений холодного периода на примере аэродрома Минск-2 : дис. маг. / М. В. Лукша. – Минск, 2022. – 60 с.
4. Лукша, М. В. Прогноз конвективных явлений холодного периода на территории Беларуси / М. В. Лукша / XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : материалы докладов Всерос. конф., Томск, 17–20 окт. 2023 г. ; Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН ; редкол.: Е. А. Головацкая. – Томск : Ин-т мон-га клим. и эколог. с-м СО РАН, 2023. – С. 68–71.
5. Luksha, M. V. Features of synoptic processes of winter thunderstorms on the territory of the Minsk Region in a changing climate / M. V. Luksha, A. A. Novik // Śląskie prace geograficzne. – 2022. – № 18. – Р. 75–87.
6. Логинов, В. Ф. Географические особенности распределения гроз и шквалов на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока // Природопользование. – Минск, 2009. – Вып. 16. – С. 42–49.
7. Логинов, В. Ф. Опасные метеорологические явления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока. – Минск : Беларусская наука, 2010. – 128 с.
8. Логинов, В. Ф. Сравнение пространственно-временных особенностей изменений опасных метеорологических явлений в характерное и не характерное для них время года / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока // Природопользование. – Минск, 2011. – Вып. 19. – С. 5–22.
9. Шпока, И. Н. Пространственно-временное распределение опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.30 / И. Н. Шпока. – Минск, 2012. – 23 с.
10. Логинов, В. Ф. Климат Беларуси / В. Ф. Логинов. – Минск : Ин-т геол. наук АН Беларуси, 1996. – 235 с.
11. Данилович, И. С. Трансформация ветрового режима на территории Беларуси в условиях изменяющегося климата / И. С Данилович, И. В. Костюченко // География. – 2023. – № 2. – С. 8–16.
12. Логинов, В. Ф. Изменение климата, экстремальных погодных и климатических явлений и их связь с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка, В. С. Микуцкий // Природопользование. – Минск, 2013. – Вып. 24. – С. 5–11.
13. Сумак, Е. Н. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси / Е. Н. Сумак, И. Г. Семёнова // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2019. – № 2. – С. 79–93.
14. Юсупов, Ю. И. Прогноз шквалов и интенсивности осадков с применением термодинамических параметров и потенциального вихря Эртелья : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29 / Ю. И. Юсупов. – М., 2021. – 129 с.
15. Неижмак, А. Н. Методика прогноза конвективных опасных метеорологических явлений по комплексу спутниковых и аэрологических данных / А. Н. Неижмак, И. П. Растворгувев // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 6. – С. 100–104.
16. Алексеева, А. А. Прогноз сильных шквалов на европейской территории России и их идентификация дополнительными радиолокаторами / А. А. Алексеева, Е. В. Васильев, В. М. Бухаров. – М. : Гидромет. науч.-исслед. центр, 2017. – 18 с.
17. Дементьева, С. О. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества / С. О. Дементьева, Н. В. Ильина, М. В. Шатаплина // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 150–157.

18. Вельтищев, Н. Ф. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF / Н. Ф. Вельтищев, В. Д. Жупанов, Ю. Б. Павлюков // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 1. – С. 5–18.
19. Вельтищев, Н. Ф. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции / Н. Ф. Вельтищев, В. Д. Жупанов // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 9. – С. 30–44.
20. Руководство по использованию автоматизированных расчетных методов явлений погоды на аэродромах Республики Беларусь. – Минск : Белгидромет, 2021. – 82 с.
21. Архив карт Белгидромета за 1989–2022 гг. – Ф. 1. Оп. 1. Д. : Подлинник.
22. Мельник, В. И. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия / В. И. Мельник, Е. В. Комаровская // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 23–25 апр. 2014 г. : в 4 ч. – Брест : БГТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 153–162.
23. Подгорная, Е. В. Особенности изменения климата Республики Беларусь за последние десятилетия / Е. В. Подгорная, В. И. Мельник, Е. В. Комаровская. – Минск : Белгидромет, 2015. – 120 с.
24. Государственное учреждение «Белгидромет» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-2020-goda-3666-2021>. – Дата доступа: 01.10.2022.
25. ThunderR – ERA5 sigma levels browser [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe. – Date of access: 29.05.2024.
26. Хандожко, Л. А. Региональные синоптические процессы / Л. А. Хандожко. – Л. : ЛГМИ, 1988. – 103 с.
27. Индексы неустойчивости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.flymeteo.org/stat/indexneust.php>. – Дата доступа: 10.05.2024.

References

1. *Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrometeorologiya. Pravila sostavleniya kratkosrochnykh prognozov pogody obshchego naznacheniya. TCP 17.10-06-2008 (02120)* [Environmental protection and environmental management. Hydrometeorology. Rules for making short-term general-purpose weather forecasts. TCP 17.10-06-2008 (02120)]. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2008, 30 p. (in Russian)
2. Luksha M. V., Novik A. A. *Aerosinopticheskie usloviya obrazovaniya zimnih groz na primere aerodroma Minsk-2* [Aerosynoptic conditions for the formation of winter thunderstorms on the example of the Minsk-2 airfield]. *J. of BSU. Geography. Geology*, 2022, no. 1, pp. 42–56. (in Russian)
3. Luksha M. V. *Nauchnoe obosnovanie prognoza konvektivnyh yavlenij holodnogo perioda na primere aerodroma Minsk-2. Diss. mag.* [Scientific substantiation of the forecast of convective phenomena of the cold season on the example of the airfield Minsk-2. Master's thesis]. Minsk, 2022, 60 p. (in Russian)
4. Luksha M. V. *Prognoz konvektivnyh yavlenij holodnogo perioda na territorii Belarusi* [Forecast of convective phenomena of the cold season in the territory of Belarus]. *Materialy dokladov vserossiyskoi konferencii "XV Sibirskoe soveshchanie i shkola molodyh uchenykh po klimato-ekologicheskому monitoring"* [Proc. of the All-Russian Conf. "XV Siberian Meeting and School of Young Scientists on climate and Environmental Monitoring"]. Tomsk, 2023, pp. 68–71. (in Russian)
5. Luksha M. V., Novik A. A. Features of synoptic processes of winter thunderstorms on the territory of the Minsk Region in a changing climate. *Slupskie Prace Geograficzne*, 2022, no. 18, pp. 75–87.
6. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Geograficheskie osobennosti raspredeleniya groz i shkvalov na territorii Belarusi* [Geographical features of the distribution of thunderstorms and squalls on the territory of Belarus]. *Nature Management*, 2009, iss. 16, pp. 42–49. (in Russian)
7. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya na territorii Belarusi* [Hazardous meteorological phenomena on the territory of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2010, 128 p. (in Russian)
8. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Sravnenie prostranstvenno-vremenennyh osobennostej izmenenij opasnyh meteorologicheskikh yavlenij v harakternoe i ne harakternoe dlya nih vremya goda* [Comparison of spatiotemporal features of changes in hazardous meteorological phenomena in characteristic and non-characteristic seasons]. *Nature Management*, Minsk, 2011, iss. 9, pp. 5–22. (in Russian)
9. Shpoka I. N. *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie opasnyh meteorologicheskikh yavlenij na territorii Belarusi*. [Spatial and temporal distribution of hazardous meteorological phenomena in the territory of Belarus]. *Avtoref. diss. kand. geogr. nauk* [PhD of geogr. sci. diss. abstr.]. Minsk, 2012, 23 p. (in Russian)
10. Loginov V. F. *Klimat Belarusi* [The climate of Belarus]. Minsk, Inst. of Geo. Sci. of the Acad. of Sci. of Belarus, 1996, 235 p. (in Russian)
11. Danilovich I. S., Kostyuchenko I. V. *Transformaciya vetrovogo rezhima na territorii Belarusi v usloviyah izmenyayushchegosya klimata* [Transformation of the wind regime on the territory of Belarus in a changing climate]. *Geography*, 2023, no. 2, pp. 8–16. (in Russian)
12. Loginov V. F., Brovka Yu. A., Mikutsky V. S. *Izmenenie klimata, ekstremal'nyh pogodnyh i klimaticeskikh yavlenij i ih svyaz' s tipami cirkulyacii atmosfery Severnogo polushariya po B. L. Dzerdzevskomu* [Climate change, extreme weather and climatic phenomena and their relationship with the types of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere according to B. L. Dzerdzevsky]. *Nature Management*, Minsk, 2013, iss. 24, pp. 5–11. (in Russian)
13. Sumak E. N., Semenova I. G. *Ciklonicheskaya aktivnost' i povtoryaemos' opasnyh yavlenij pogody nad territoriej Belarusi* [Cyclonic activity and recurrence of hazardous weather phenomena over the territory of Belarus]. *J. of the Belarusian State University. Geography. Geology*, 2019, no. 2, pp. 79–93. (in Russian)
14. Yusupov Yu. I. *Prognoz shkvalov i intensivnosti osadkov s primeneniem termodinamicheskikh parametrov i potencial'nogo vihrya Ertelya* [Forecast of squalls and precipitation intensity using thermodynamic parameters and a potential Ertel vortex]. *Dis. kand. fiz.-mat. nauk* [PhD phys. and math. sci. dis.]. Moscow, 2021, 129 p. (in Russian)

15. Neizhmak A. N., Rastorguev I. P. *Metodika prognoza konvektivnyh opasnyh meteorologicheskikh yavlenij po kompleksu sputnikovyh i aerologicheskikh dannyh* [Methodology for forecasting convective hazardous meteorological phenomena based on a complex of satellite and aerological data]. *Successes of Modern Natural Science*, 2019, no. 6, pp. 100–104. (in Russian)
16. Alekseeva A. A., Vasiliev E. V., Bukharov V. M. *Prognoz sil'nyh shkvalov na evropejskoj territorii Rossii i ih identifikaciya doplerovskimi radiolokatorami* [Forecast of strong squalls on the European territory of Russia and their identification by Doppler radars]. Moscow, Hydromet. scientific research. center, 2017, 18 p. (in Russian)
17. Dement'eva S. O., Ilyina N. V., Shatalina M. V. *Prognoz konvektivnyh yavlenij i ego verifikaciya po dannym nablyudenij atmosfernogo elektrichestva* [Forecast of convective phenomena and its verification based on observations of atmospheric electricity]. *Izvestiya Ras. Physics of the Atmosphere and Ocean*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 150–157. (in Russian)
18. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D., Pavlyukov Yu. B. *Kratkosrochnyj prognoz sil'nyh osadkov i vетра s pomoshch'yu razreshayushchih konvekciyu modelej WRF* [Short-term forecast of heavy precipitation and wind using convection-permitting WRF models]. *Meteorology and Hydrology*, 2011, no. 1, pp. 5–18. (in Russian)
19. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D. *Eksperimenty po chislennomu modelirovaniyu intensivnoj konvekcii* [Experiments on numerical modeling of intense convection]. *Meteorology and Hydrology*, 2008, no. 9, pp. 30–44. (in Russian)
20. *Rukovodstvo po ispol'zovaniyu avtomatizirovannyh raschetnyh metodov yavlenij pogody na aerodromah Respubliki Belarus* [Guidelines for the use of automated calculation methods of weather phenomena at airfields of the Republic of Belarus]. Minsk, Belgidromet Publ., 2021, 82 p. (in Russian)
21. *Arhiv kart Belgidrometa za 1989–2022 gody* [Archive of Belgidromet maps for 1989–2022]. Fund 1. Inventory 1. Case : Original (in Russian)
22. Mel'nik V. I., Komarovskaya E. V. *Osobennosti izmeneniya klimata na territorii Respubliki Belarus' za poslednie desyatilietya* [Features of climate change in the territory of the Republic of Belarus over the past decades]. *Sbornik nauchnyh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii "Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya"* [Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. 'Actual sci., tech. and environmental problems of habitat conservation']. Brest, 2014, part 1, pp. 153–162. (in Russian)
23. Podgornaya E. V., Melnik V. I., Komarovskaya E. V. *Osobennosti izmeneniya klimata Respubliki Belarus' za poslednie desyatilietya* [Features of climate change in the Republic of Belarus in recent decades]. Minsk, Belgidromet Publ., 2015, 120 p. (in Russian)
24. *Gosudarstvennoe uchrezhdenie "Belgidromet"* [The State institution "Belgidromet"]. Available at: <http://www.belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-2020-goda-3666-2021> (accessed 1 November 2022). (in Russian)
25. ThundeR – ERA5 sigma levels browser. Available at: http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe (accessed 29 May 2024).
26. Handozhko L. A. *Regional'nye sinopticheskie processy* [Regional synoptic processes]. Leningrad, 1988, 103 p. (in Russian)
27. *Indeksy neustojchivosti* [Instability indices]. Available at: <http://www.flymeteo.org/stat/indexneust.php> (accessed 10 May 2024). (in Russian)

Информация об авторах

Лукша Марина Вячеславовна – аспирант Белорусского государственного университета, начальник отдела краткосрочных прогнозов погоды, неблагоприятных и опасных явлений службы метеорологических прогнозов, Белгидромет (пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: maril2010@mail.ru

Новик Алексей Александрович – кандидат географических наук, доцент, докторант, кафедра общего землеведения и гидрометеорологии, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: aliaksei_novik@yahoo.com

Information about authors

Marina V. Luksha – Post-Graduate student of the Belarusian State University, Head of the Department of Short-term Weather Forecasts, Adverse and Hazardous Phenomena of the Meteorological Forecasting Service, Belhydromet (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: maril2010@mail.ru

Aliaksei A. Novik – Ph. D. (Geography), Assistant Professor, Doctoral Candidate, Department of General Earth Science and Hydrometeorology, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: aliaksei_novik@yahoo.com