

АЭРОСИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗИМНИХ ГРОЗ НА ПРИМЕРЕ АЭРОДРОМА МИНСК-2

М. В. ЛУКША^{1), 2)}, А. А. НОВИК¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Белгидромет, пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

В условиях современного потепления климата наблюдается рост числа опасных явлений погоды, в том числе грозовой деятельности не только в теплое, но и в холодное время года. Проведен анализ возникновения зимних гроз (октябрь – март) и выявлены их связи с аэросиноптическими условиями на примере аэродрома Минск-2 за период с 1989 по 2020 г. Определение этих связей необходимо для составления качественного прогноза гроз как одного из опасных явлений погоды для авиации. Установлено, что для образования зимних гроз требуются поступление теплой (с температурой воздуха выше 0 °С) и влажной воздушной массы с юга либо юго-запада, связанное со смещением интенсивно углубляющихся североатлантических или южных циклонов в стадии молодого циклона; прохождение основных и вторичных активных холодных фронтов со скоростями более 30 км/ч, холодных фронтов с волнами и фронтов окклюзии, которые обеспечивают подъем теплого и влажного воздуха нижней тропосферы; существование конвективной неустойчивости в атмосфере; наличие гребня теплого и влажного воздуха, который сменяется ложбиной холода, на уровне АТ-850; наличие низкоструйных течений и положительной завихренности на уровнях АТ-700 и АТ-500, указывающих на подъем частицы воздуха; наличие мощных струйных течений западной четверти на уровне АТ-300, усиливающих конвективные процессы. Полученные результаты могут быть использованы для пополнения методической базы по вопросам прогнозирования опасных конвективных явлений на территории Беларуси, а также в качестве рекомендаций по прогнозу гроз в холодный период года в оперативной работе инженеров-синоптиков.

Ключевые слова: опасные конвективные явления; зимние грозы; синоптические условия; аэрологические условия; авиационные прогнозы; аэродром Минск-2.

Образец цитирования:

Лукша МВ, Новик АА. Аэросиноптические условия образования зимних гроз на примере аэродрома Минск-2. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2022;1:42–56.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-1-42-56>

For citation:

Luksha MV, Novik AA. Aerosynoptic conditions for the formation of winter thunderstorms on the example of the Minsk-2 airfield. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2022;1:42–56. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-1-42-56>

Авторы:

Марина Вячеславовна Лукша – магистрант кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики¹⁾, начальник отдела метеорологического слежения службы авиационно-метеорологического обеспечения²⁾. Научный руководитель – А. А. Новик.
Алексей Александрович Новик – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Marina V. Luksha, master's degree student at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^a, and chief of the department of meteorological tracking, service for aviation meteorological supply^b.
maril2010@mail.ru
Aliaksei A. Novik, PhD (geography), docent; associate professor at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.
novika@bsu.by

AEROSYNOPTIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF WINTER THUNDERSTORMS ON THE EXAMPLE OF THE MINSK-2 AIRFIELD

M. V. LUKSHA^{a, b}, A. A. NOVIK^a

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

^b*Belgidromet, 110 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus*

Corresponding author: M. V. Luksha (maril2010@mail.ru)

In the conditions of modern climate warming, there is an increase in the number of hazardous weather phenomena, including thunderstorm activity, not only in the warm, but also in the cold season. The article analyses the occurrence of winter thunderstorms (October – March) and their connections with aerosynoptic conditions are revealed on the example of the Minsk-2 airfield for the period from 1989 to 2020. The determination of these relationships is necessary to make a qualitative forecast of thunderstorms as one of the hazardous weather phenomena for aviation. It was found that for the formation of winter thunderstorms requires the arrival of warm (with an air temperature above 0 °C) and moist air mass from the south or southwest, associated with the displacement of intensively deepening North Atlantic or southern cyclones in the stage of a young cyclone; the passage of primary and secondary active cold fronts with speeds of more than 30 km/h, cold fronts with waves and occlusion fronts, which provide the rise of warm and moist air of the lower troposphere; the existence of convective instability in the atmosphere; the presence tongue of warm and humid air, which is replaced by a trough of cold, at the level of 850 mb; the presence of low-jet currents and positive vorticity at the level of 700 mb and level of 500 mb, indicating the rise of an air particle; the presence of powerful jet currents of the western quarter at the level of 300 mb, enhancing convective processes. The obtained results can be used to replenish the methodological base on the forecasting of hazardous convective phenomena in Belarus, and also as recommendations for the forecast of thunderstorms in the cold season in the operational work of weather forecasters.

Keywords: hazardous convective phenomena; winter thunderstorms; synoptic conditions; aerological conditions; aviation forecasts; Minsk-2 airfield.

Введение

Прогноз конвективных явлений холодного периода года (октябрь – март) – актуальная и важная проблема, с которой сталкиваются не только гражданские, но и авиационные синоптики в процессе своей оперативной деятельности. В частности, в условиях современного глобального потепления климата, выражающегося в первую очередь в росте зимних температур [1], отмечается увеличение количества случаев данного опасного явления (ОЯ).

Согласно существующим в научной литературе определениям к зимним, или снеговым, грозам относят грозы, при которых вместо ливневого дождя выпадает ливневый снег, ледяной дождь или ледяная либо снежная крупа. Однако за счет роста зимних температур грозы чаще всего сопровождаются ливневыми осадками в жидком виде. В связи с этим, по мнению авторов, важно дополнить определение понятия «зимние грозы», включив в него и жидкие осадки.

Зимние грозы – достаточно редкое явление. Благоприятные условия для образования гроз на территории Беларуси в основном складываются в теплый период года (апрель – сентябрь), на который приходится до 99 % их количества. В холодный период (октябрь – март) грозы регистрируют очень редко (раз в 5–10 лет)¹.

К сожалению, к настоящему времени проблема прогнозирования зимних гроз не получила широкой освещенности в литературе и науке как в Беларуси, так и за рубежом.

Исследования в данной области на современном этапе велись российскими учеными Ю. И. Юсуповым, который занимался разработкой прогноза шквалов и интенсивных осадков, в том числе и для холодного периода, с использованием векторной фронтогенетической функции и изоэнтропического потенциального вихря Эртеля в состоянии насыщения с применением расчетов по выходной информации мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW [2], и С. Э. Смирновым, Ю. М. Михайловым, Г. А. Михайловой, О. В. Капустиной, изучавшими особенности зимних гроз на Камчатке с точки зрения влияния солнечной, сейсмической и циклонической активности [3].

¹Опасные явления погоды в теплый период года: грозы, ливни, шквалы, град [Электронный ресурс]. URL: <http://www.belgidromet.by/ru/news-ru/view/opasnye-javlenija-pogody-v-teplyj-period-goda-grozy-livni-shkvaly-grad-3201> (дата обращения: 15.09.2021).

На территории Европы испанские ученые Х. Монтанья и Ф. Фабро с соавторами выделили ряд регионов (Средиземноморье, Япония и др.) с наибольшей частотой зимних молний, которые представляют опасность для ветряных турбин и малой авиации [4].

Наиболее активное исследование зимних гроз велось в США. Так, Д. М. Шульцем и Р. Дж. Вавреком были определены следующие основные критерии для прогноза зимних гроз: влажность, подъем, неустойчивое состояние атмосферы и температура воздуха ниже 0 °С в облаке и вблизи уровня земли [5]. Американский ученый С. Шварц² выделил такие критерии для прогноза зимних гроз, как наличие циклонов, которые движутся с теплой акватории моря, температурные аномалии, области положительной завихренности на уровне АТ-500, большие вертикальные скорости и большой подъем на уровне АТ-700, струйные потоки и расхождение на уровне АТ-300. Всестороннее изучение зимних гроз также было проведено П. С. Маркетом [6]. Совместно с К. Кроу, Б. Петтигрю, К. Меликом и Дж. Подзимеком он проанализировал связь зимних гроз и обильных снегопадов на территории США с 1961 по 1990 г. На основании полученных результатов исследователи пришли к выводу, что только одна из трех зимних гроз сопровождается обильным снегопадом и связана с выходом внетропического циклона [7]. В соавторстве с А. М. Оравец, Д. Гэдэ и другими учеными П. С. Маркет провел исследование высотного барического поля 97 случаев зимних гроз на Среднем Западе США, связанных в основном с активными циклонами, а также фронтальными разделами и эффектами озера [8]. Им же совместно с К. Е. Халкомбом и Р. Л. Эбертом выполнено климатологическое описание пространственных, временных и синоптических характеристик зимних гроз в США. Было выявлено, что большинство событий, связанных с грозой, обычно регистрируются только на одной станции и лишь в редких случаях последовательно в течение трехчасовых наблюдений. Таким образом, это закрепило представление о зимней грозе как о довольно локализованном явлении ограниченной продолжительности [9]. Американские ученые Э. А. Розенов, Д. М. Пламмер, Р. М. Раубер с коллегами с использованием радарных данных исследовали вертикальные скорости и физическую структуру конвективных облаков, связанных с зимними циклонами [10].

На территории Беларуси изучением пространственно-временного распределения ОЯ на фоне изменения климата занимались В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока, которые, проанализировав количество дней с грозами в целом за год и за холодный период (октябрь – март) в 1975–2008 гг., выявили, что с 1975 по 1987 г. отмечалось около 0,6 дня с грозами, а с 1988 по 2008 г. – 0,7 дня [11]. Среднее число дней с грозами за весь рассматриваемый период (1975–2008) составило 24 дня в год. При этом не наблюдается тенденции к росту или уменьшению количества случаев данного ОЯ. Изменение числа дней с грозами имеет широтный характер, увеличиваясь с севера на юг, и связано с аномалиями электропроводности. Зонами активной грозовой деятельности в нехарактерный для гроз период года (октябрь – март) являются следующие территории: на северо-востоке и в центральной части страны – Витебская и Минская возвышенности, на юге – Пружанская и Люсиновская равнины, на юго-востоке – Стрешницкая, Речицкая, Василевичская, Хойникская и Комаринская низменности, Тереховская равнина [12; 13].

Согласно исследованию изменения климата (1903–2012), экстремальных погодных и климатических явлений и их связи с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Дзердзеевскому, проведенному В. Ф. Логиновым, Ю. А. Бровкой, В. С. Микуцким, в ближайшее время должно снижаться количество ОЯ, так как наблюдается тенденция к уменьшению числа дней с меридиональной южной циркуляцией [14].

В. И. Мельник, И. В. Буяков, В. Д. Чернышев в результате изучения изменения количества и вида атмосферных осадков в холодный период года на территории Беларуси (1961–2018) отметили рост количества осадков и амплитуды их колебаний, а также уменьшение твердых осадков и увеличение жидких осадков [15].

Е. Н. Сумак и И. Г. Семёнова в ходе исследования циклонической активности и повторяемости ОЯ над территорией Беларуси (1995–2015) установили, что ОЯ вызывали лишь циклонические вихри южных и западных траекторий [16].

Вопросами возникновения зимних гроз занималась также авиационный инженер-синоптик М. К. Мальчик, которая выделила пять основных синоптических условий, благоприятных для возникновения зимних гроз, таких как наличие динамического фактора, большая конвективная неустойчивость, сильные ветры западной четверти, подток влажного воздуха в слое 0–1500 м и сухого воздуха в слое 1500–3000 м, наличие задерживающих слоев [17].

В настоящее время на аэродроме Минск-2 не существует разработанных методик прогнозирования зимних гроз, а применяются лишь устаревшие расчетные методы прогноза гроз по Решетову, Славину и Вайтингу, которые имеют более высокую оправдываемость в теплый период года [18].

²Schwartz S. Thundersnow! [Electronic resource]. URL: <https://www.theweatherprediction.com/weatherpapers/043/index.html> (date of access: 15.09.2021).

Отсутствие разработанных алгоритмов и методик прогноза таких редких, но очень опасных конвективных явлений, как зимние грозы, а также связанных с ними сильных ливневых осадков и шквалистого усиления ветра подтверждает актуальность данной проблемы, в частности в области качественного метеорологического обеспечения авиации, от которого зависят безопасность, регулярность и эффективность полетов. Кроме того, отсутствие сформированной авиационно-метеорологической школы в Беларуси и недостаточная освещенность рассматриваемого вопроса за рубежом вызывают необходимость пополнения методической базы по прогнозированию опасных конвективных явлений холодного периода.

В связи с этим целью настоящего исследования являлось определение аэросиноптических условий возникновения гроз в холодный период года и методик прогнозирования этих опасных конвективных явлений на примере аэродрома Минск-2. Для ее решения были поставлены следующие задачи: проведение статистической обработки данных числа случаев гроз и сопровождающих их явлений в виде ливневых осадков и шквалистого ветра с октября по март в 1989–2020 гг. для территории аэродрома Минск-2 за периоды круглосуточных наблюдений; установление связей опасных конвективных явлений холодного времени года и приземных синоптических и высотных аэрологических условий, при которых они наблюдались; разработка научных рекомендаций по прогнозу гроз в холодный период года.

Территория, материалы и методы исследования

Исследование включало несколько последовательных этапов: выборку исходных данных, анализ полученной информации, поиск взаимосвязей и закономерностей, разработку рекомендаций по прогнозу опасных конвективных явлений погоды в холодный период года.

На этапе выборки исходных данных отбирались:

- 1) число случаев опасных конвективных явлений холодного периода года на примере зимних гроз и сопровождающих их явлений;
- 2) соответствующие приземные метеорологические данные в виде карт приземного анализа, когда отмечались выявленные случаи ОЯ;
- 3) соответствующие высотные метеорологические данные из аэрологических диаграмм, когда отмечались выявленные случаи ОЯ.

Для отбора числа случаев опасных конвективных явлений холодного периода года были использованы данные фактических авиационно-метеорологических наблюдений, проводившихся на аэродроме Минск-2 с октября по март в 1989–2020 гг.

Выбор аэродрома Минск-2 в качестве изучаемой территории обусловлен большим фактическим материалом, собранным по этому объекту за длительный период наблюдений, а также важностью подобных исследований для авиации.

За начало выборки был взят 1989 г., так как именно с него в Беларуси начался самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений на протяжении последних 130 лет, который характеризуется особенно резким повышением зимних температур [1]. С 1989 г. среднегодовая температура в стране выросла на 1,2 °С, а температура в период с января по март – на 2 °С и более по сравнению с климатической нормой [1].

Выборка исходных данных в виде случаев опасных конвективных явлений холодного периода года производилась посредством работы с дневниками погоды АВ-6, которые составляются техниками-метеорологами авиационной метеорологической станции гражданской (АМСГ) 1-го разряда Минск, расположенной на аэродроме Минск-2.

Целью данной ступени выборки был поиск случаев опасных конвективных явлений в холодный период года (октябрь – март), а именно: зимних гроз, интенсивных ливневых осадков (снега, дождя, снежной крупы), шквалистого ветра. Также фиксировались сопутствующие им метеорологические условия: скорость и направление ветра, тип осадков и видимость в них, температура воздуха у земли и ее изменение, барическая тенденция.

Следующей ступенью выборки являлся анализ карт приземных метеорологических условий, отобранных за ту же дату и синоптический срок, когда были отмечены случаи наступления опасных конвективных явлений холодного периода года. Он проводился на основе архивных данных Белгидромета (1989–2003) и интернет-портала *Wetter3 – aktuelle Wetterkarten* (2004–2019)³, а также частично сохранившейся электронной базы данных карт АМСГ 1-го разряда Минск (2020).

³DWD Analyse-Archiv [Electronic resource]. URL: http://www1.wetter3.de/archiv_dwd_dt.html (date of access: 29.09.2021).

В ходе анализа карт приземных метеорологических условий определены фактические синоптические ситуации у земли, при которых наблюдались зимние грозы:

- барические образования, стадии их развития;
- наличие фронтальных разделов, траектории их смещения и тенденции развития.

Третьей ступенью выборки стал анализ метеорологических условий по высотам с использованием аэрологических диаграмм за ту же дату и синоптический срок, когда были отмечены случаи наступления опасных конвективных явлений холодного периода года. Аэрологические диаграммы получены в результате реанализа ERA5 с помощью бесплатной интернет-платформы *thundeR* (1989–2020)⁴.

По результатам анализа аэрологических диаграмм определены высотные метеоусловия формирования зимних гроз:

- температура воздуха и дефицит точки росы на уровне АТ-850;
- направление и скорость ветра на уровнях АТ-700, АТ-500, АТ-300;
- уровень конденсации и уровень конвекции, характеризующие мощность конвективного облака.

Следующим этапом исследования стал анализ полученной информации, а именно соотнесение случаев опасных конвективных явлений холодного периода года с аэросиноптическими ситуациями, в которых они наблюдались, т. е. с фактическими метеорологическими условиями у поверхности земли и на высотах.

По результатам вышеописанного анализа исходной информации были определены взаимосвязи между опасными конвективными явлениями и аэросиноптическими условиями их формирования, установлены основные закономерности возникновения опасных для авиации и редких в холодный период года конвективных явлений, что также отражено в предыдущих работах авторов [19; 20].

Выявленные взаимосвязи и закономерности положены в основу рекомендаций по прогнозу зимних гроз и сопровождающих их явлений в виде интенсивных ливневых осадков и шквалистого ветра.

Таким образом, при выполнении работы использовались статистический метод для обработки многолетних рядов метеорологических данных, метод синтеза и анализа исходной аэросиноптической информации, метод наблюдений и личного опыта работы в сфере авиационной метеорологии, метод моделирования синоптических ситуаций для прогноза опасных конвективных явлений холодного периода года.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования проанализированы повторяемость зимних гроз (октябрь – март) и сопровождающих их явлений на аэродроме Минск-2 за последние 32 года (1989–2020) и связь с приземной синоптической ситуацией. Результаты данного анализа представлены в табл. 1.

На основании анализа исходной информации обнаружено, что за последние 32 года на аэродроме Минск-2 были отмечены 17 случаев зимних гроз (1 случай зафиксирован в январе, 3 – в феврале, 4 – в марте, 8 – в октябре, 1 – в ноябре). Из табл. 1 видно, что наблюдается тенденция к увеличению количества данного ОЯ в последнее десятилетие.

Формирование зимних гроз над аэродромом Минск-2 в рассматриваемый период было связано с прохождением атмосферных фронтов: холодного фронта с волнами (7 случаев), основного холодного фронта (1 случай), вторичного холодного фронта (1 случай) и фронта окклюзии по типу теплого фронта (8 случаев). Грозы на холодных фронтах регистрировались после полудня (с 12:00 до 18:00 UTC – 5 случаев) или вечером (с 18:00 до 20:00 UTC – 3 случая), в первую половину дня (с 06:00 до 12:00 UTC – 1 случай), а на фронтах окклюзии – в вечернее время (с 18:00 до 24:00 UTC – 2 случая), в ночные и утренние часы (с 00:00 до 06:00 UTC – 4 случая), в первую половину дня (с 06:00 до 12:00 UTC – 1 случай), после полудня (с 12:00 до 18:00 UTC – 1 случай).

Как правило, зимние грозы отмечались вблизи вершин волновых возмущений на холодных фронтах с волнами и вблизи точки окклюзии на фронтах окклюзии. На рис. 1 показаны фактические приземные синоптические ситуации, при которых наблюдались зимние грозы, связанные с холодным фронтом и фронтом окклюзии, в 2020 г.

Фронтальные разделы имели скорости смещения более 30 км/ч и были связаны с ориентированными с юга на север или с юго-запада на северо-восток ложбинами в составе глубоких скандинавских циклонов с давлением в центре 945–995 гПа и южных циклонов с давлением в центре 995–1005 гПа.

Ветер у земли имел направление южной составляющей со средней скоростью 3–5 м/с до прохождения фронтов. Прохождение фронтов сопровождалось усилением ветра до 9–13 м/с и разворотом на юго-запад (в случае фронта окклюзии) или запад, северо-запад (в случае холодного фронта). Зафиксированы лишь 2 случая усиления ветра выше 15 м/с. Также почти всегда отмечались большие градиенты давления, что говорит о больших скоростях смещения воздушных масс.

⁴thundeR – ERA5 sigma levels browser [Electronic resource]. URL: http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe/ (date of access: 29.09.2021).

Приземные метеорологические условия возникновения зимних гроз на аэродроме Минск-2 за период с 1989 по 2020 г.

Table 1

Surface meteorological conditions for the occurrence of winter thunderstorms at the Minsk-2 airfield for the period from 1989 to 2020

Дата	Время, UTC	Синоптическая ситуация	Направление ветра, град		Скорость ветра, м/с		Барическая тенденция, гПа за 3 ч		Температура воздуха, °С		Явление, сопровождающее грозу	Видимость в осадках, м
			До фронта	После фронта	До фронта	После фронта	До фронта	После фронта	До фронта	После фронта		
26.01.1990	17:36–17:55	Холодный фронт с волнами	190	220	3	5–9	+1,8	+0,7	+6,4	+4,8	Ливневый дождь	3800
27.02.1990	19:46–20:42	Фронт окклюзии	190	290	4	3–7	-1,4	+1,6	+3,0	+0,2	Ливневый снег	400
07.03.1990	13:17–13:39	Вторичный холодный фронт	300	320	5–8	9–12	+0,3	+3,6	+2,1	+1,0	Ливневый снег	300
19.10.1996	19:40–21:00	Фронт окклюзии	0	0	0	0	-0,6	-0,9	+11,4	+10,7	Ливневый дождь	2500
27.02.2002	16:51–18:00	Холодный фронт с волнами	150	290	3	6–16	-3,5	+4,4	+5,3	+1,8	Ливневый дождь	2500
03.10.2003	08:08–08:30	Холодный фронт с волнами	200	210	1	3	+0,3	+0,3	+10,7	+9,9	Ливневый дождь	2300
31.10.2004	00:30–01:00	Фронт окклюзии	170	180	2	3	-1,0	+0,1	+12,1	+11,6	Ливневый дождь	2700
15.03.2005	15:13–15:23	Холодный фронт с волнами	240	300	4–9	7–12	-1,7	+2,2	+2,7	-0,3	Ливневый снег	100
03.10.2006	01:10–02:42	Фронт окклюзии	210	230	1	3–8	-0,4	+0,7	+12,7	+11,5	Ливневый дождь	1600
23.02.2008	01:03–01:41	Фронт окклюзии	220	280	3–8	3–18	-4,0	+3,0	+5,0	+3,7	Ливневый дождь	550
12.03.2008	15:31–15:39	Фронт окклюзии	170	230	3	3–8	-2,3	-0,5	+7,9	+5,7	Ливневый дождь	1700
08.10.2009	18:06–18:38	Холодный фронт с волнами	180	340	2	9–13	-3,2	+2,2	+17,7	+11,2	Ливневый дождь	2800
10.11.2010	08:50–09:06	Фронт окклюзии	150	170	3	5–8	-0,6	+0,4	+6,8	+3,7	Ливневый дождь	3800
07.10.2011	18:14–18:54	Холодный фронт с волнами	0	280	0	3–6	-1,1	+1,1	+3,0	+0,2	Ливневый снег	400
06.10.2012	18:31–19:30	Холодный фронт с волнами	0	350	0	4–7	-3,4	-1,2	+2,1	+1,0	Ливневый снег	300
12.03.2020	16:54–17:28	Холодный фронт	200	270	8	11–24	-4,4	+3,4	+11,4	+10,3	Ливневый дождь	2500
14.10.2020	03:45–04:07	Фронт окклюзии	60	100	3–6	3–6	-2,9	+1,0	+5,3	+1,8	Ливневый дождь	2500

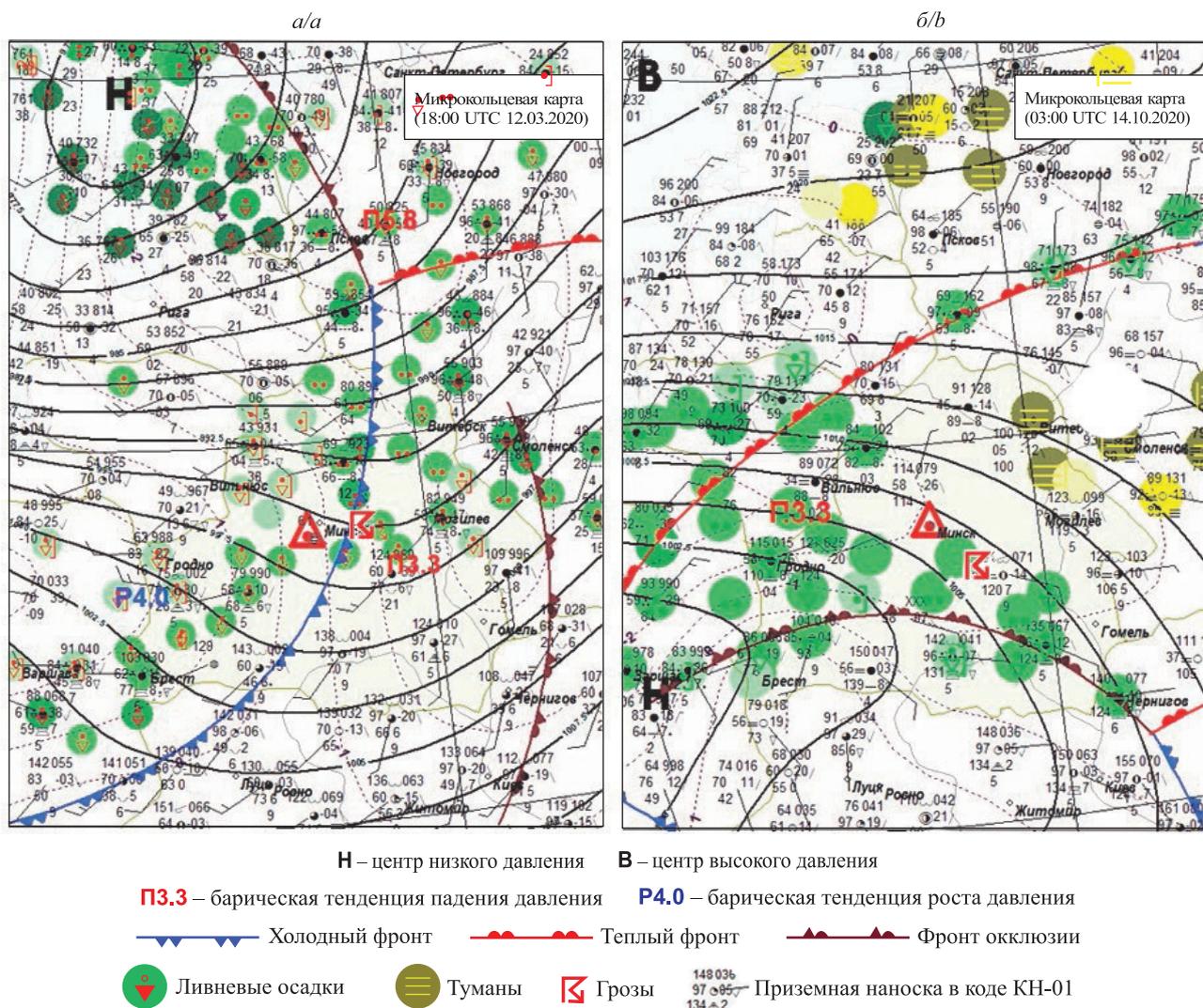


Рис. 1. Приземные синоптические ситуации, с которыми связаны зимние грозы:
а – холодный фронт; б – фронт окклюзии

Fig. 1. Surface synoptic situations associated with winter thunderstorms:
а – cold front; б – occlusion front

Пять гроз были зарегистрированы при температуре воздуха от +5 до 0 °С и менее, две грозы – при температуре от +5 до +10 °С, десять гроз – при температуре от +10 до +15 °С.

Все грозы сопровождалась осадками: при высоких температурах – ливневым дождем с ухудшением видимости от 550 до 3800 м, при температурах около 0 °С – сильными снегопадами с видимостью от 100 до 400 м.

После определения высотной ситуации проанализированы метеорологические условия на различных уровнях с использованием аэрологических диаграмм, полученных с помощью бесплатной интернет-платформы *thundeR*⁵. При этом особое внимание было уделено анализу уровней АТ-850, АТ-700, АТ-500, АТ-300. Результаты представлены в табл. 2.

Наличие слоя конвективной неустойчивости в атмосфере, когда вертикальные градиенты температуры были больше влажноадиабатических, подтверждается аэрологическими диаграммами сроков наблюдения зимних гроз в 2020 г., что отражено на рис. 2.

Из аэрологических данных, представленных в табл. 2 и на рис. 2, видно, что кучево-дождевые облака, с которыми были связаны зимние грозы, имели нижнюю границу (уровень конденсации) примерно 300–900 м и верхнюю границу (уровень конвекции) около 2000–8700 м в зависимости от температурного фона.

⁵thundeR – ERA5 sigma levels browser...

Аэрологические условия формирования зимних гроз на аэродроме Минск-2 за период с 1989 по 2020 г.

Table 2

Aerological conditions for the formation of winter thunderstorms at the Minsk-2 airfield for the period from 1989 to 2020

Дата	Время, UTC	Мощность конвективного облака		АТ-850		АТ-700		АТ-500		АТ-300	
		Уровень конденсации, м	Уровень конвекции, м	Температура, °С	Дефицит точки росы, °С	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
26.01.1990	17:36–17:55	700	3500	-0,3	2,0	240	80	240	160	280	180
27.02.1990	19:46–20:42	600	2600	-3,3	1,4	250	80	240	120	240	130
07.03.1990	13:17–13:39	600	4600	-7,7	4,5	320	80	330	220	330	220
19.10.1996	19:40–21:00	700	5300	+5,0	1,3	160	40	160	50	200	60
27.02.2002	16:51–18:00	700	5100	-0,2	0,0	240	100	240	110	240	150
03.10.2003	08:08–08:30	300	5300	+4,8	1,1	220	25	160	60	200	160
31.10.2004	00:30–01:00	600	5500	+9,7	2,5	240	80	240	120	240	170
15.03.2005	15:13–15:23	300	2000	-7,0	2,0	270	80	280	90	270	140
03.10.2006	01:10–02:42	500	5900	+6,7	5,0	260	70	260	80	260	150
23.02.2008	01:03–01:41	700	2600	+0,5	0,0	270	120	260	180	260	240
12.03.2008	15:31–15:39	500	2400	+0,2	0,5	250	80	240	120	250	110
08.10.2009	18:06–18:38	300	8700	+10,7	0,3	250	90	250	120	250	160
10.11.2010	08:50–09:06	400	3800	+6,5	2,7	200	60	200	70	220	120
07.10.2011	18:14–18:54	800	2800	+5,1	0,2	220	80	230	100	220	130
06.10.2012	18:31–19:30	800	5400	+5,5	0,0	250	110	260	120	250	190
12.03.2020	16:54–17:28	700	3100	+3,3	0,4	260	120	260	120	270	200
14.10.2020	03:45–04:07	900	4300	+9,8	2,0	150	70	160	80	210	110

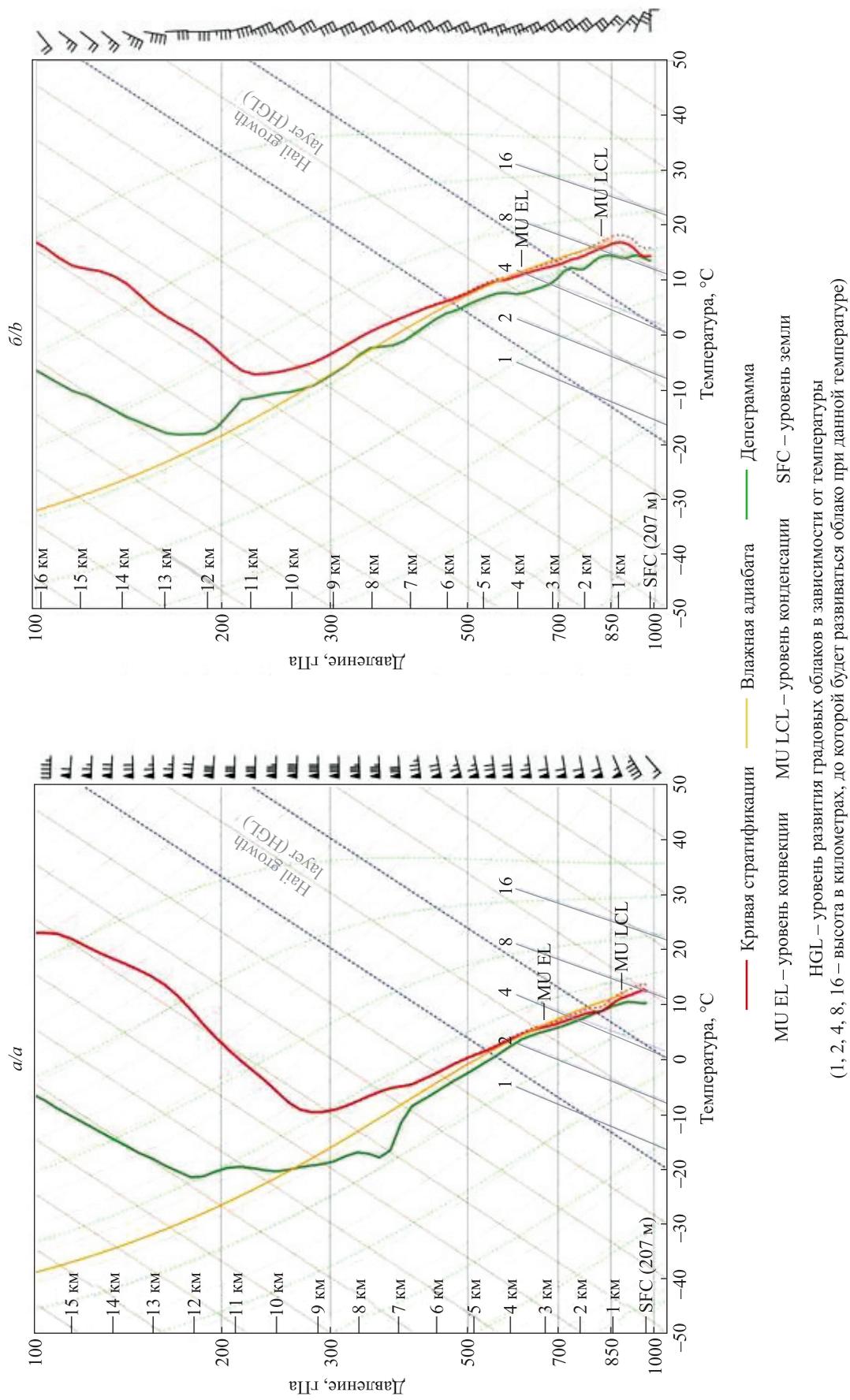


Рис. 2. Аэрологические диаграммы во время зимних гроз:

а – 12.03.2020; б – 14.10.2020

Fig. 2. Aerological diagrams during winter thunderstorms:

а – 12.03.2020; б – 14.10.2020

На уровне АТ-850 практически во всех случаях наблюдается гребень теплового и влажного воздуха, который затем сменяется ложбиной холода. Диапазон температур на данном уровне колеблется от $-7,7$ до $+10,7$ °С в зависимости от господствующей воздушной массы. На рис. 3 представлена аэрологическая ситуация на уровне АТ-850 во время зимних гроз в 2020 г., которая отражает активные процессы смены адвекции тепла адвекцией холода согласно направлению ведущих потоков, определяемых как 0,8 скорости ветра на уровне АТ-500.

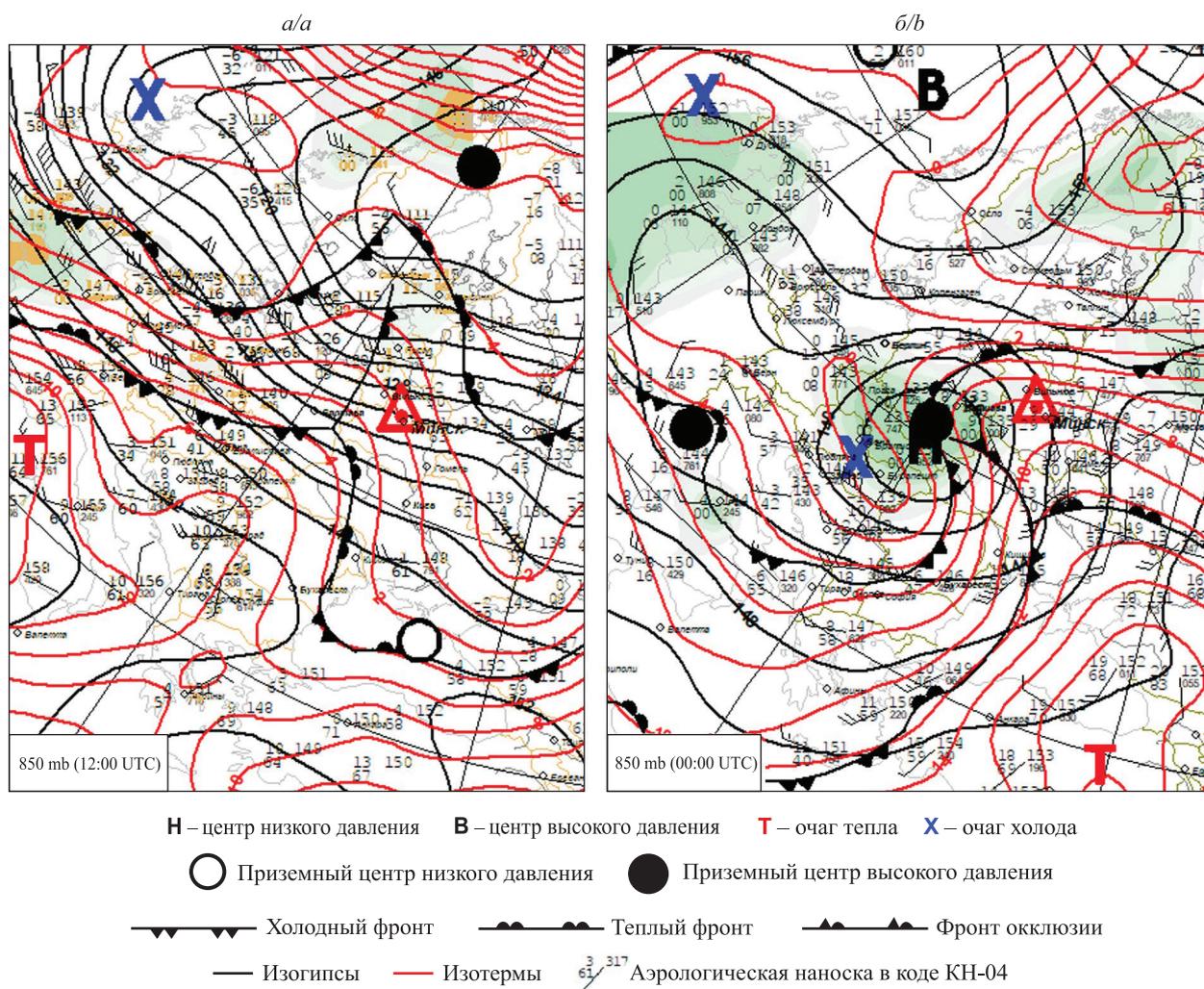


Рис. 3. Аэрологическая ситуация на картах АТ-850 в случаях зимних гроз:
а – 12.03.2020; б – 14.10.2020

Fig. 3. Aerological situation on 850 mb maps in cases of winter thunderstorms:
а – 12.03.2020; б – 14.10.2020

На уровне АТ-700 наблюдается усиление южного и юго-западного ветра до критериев струйного течения (100 км/ч). Анализ данного уровня показывает наибольшие вертикальные скорости и наибольший подъем частицы воздуха в сложившейся ситуации⁶. На рис. 4 представлена аэрологическая обстановка на уровне АТ-700 во время зимних гроз в 2020 г.

На уровне АТ-500 в большинстве случаев отмечаются ветры южного и юго-западного направления со скоростями более 100 км/ч, что говорит о наличии струйного течения. Это подтверждается картами АТ-500 за 12 марта и 14 октября 2020 г., представленными на рис. 5.

На уровне АТ-300, за исключением 19 октября 2006 г., отмечается струйное течение юго-западного направления со скоростями от 100 до 240 км/ч. Струйные потоки и дивергенция, которые наблюдаются на данном уровне, усиливают шторм и создают сдвиг, так что вершины грозового облака иногда будут пролетать над слоисто-кучевыми облаками [6].

⁶Schwartz S. Thundersnow!..

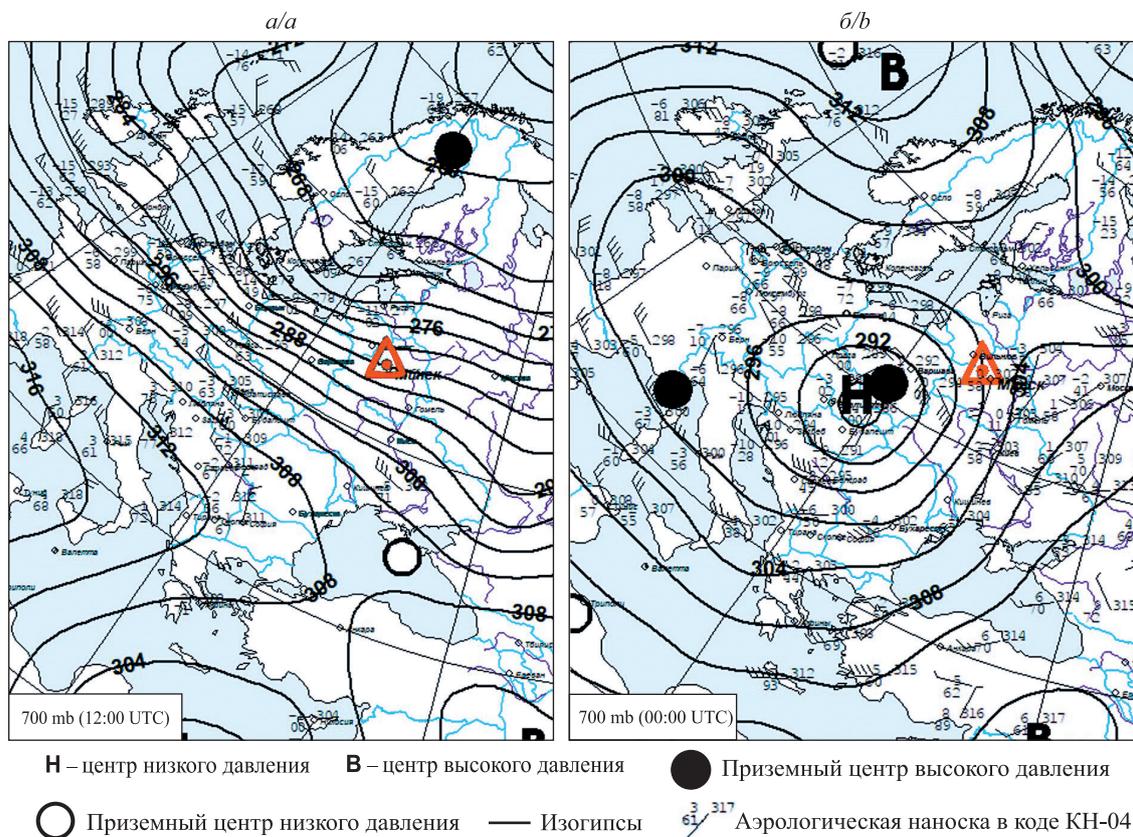


Рис. 4. Аэрологическая ситуация на картах АТ-700 в случаях зимних гроз: а – 12.03.2020; б – 14.10.2020
 Fig. 4. Aerological situation on 700 mb maps in cases of winter thunderstorms: a – 12.03.2020; b – 14.10.2020

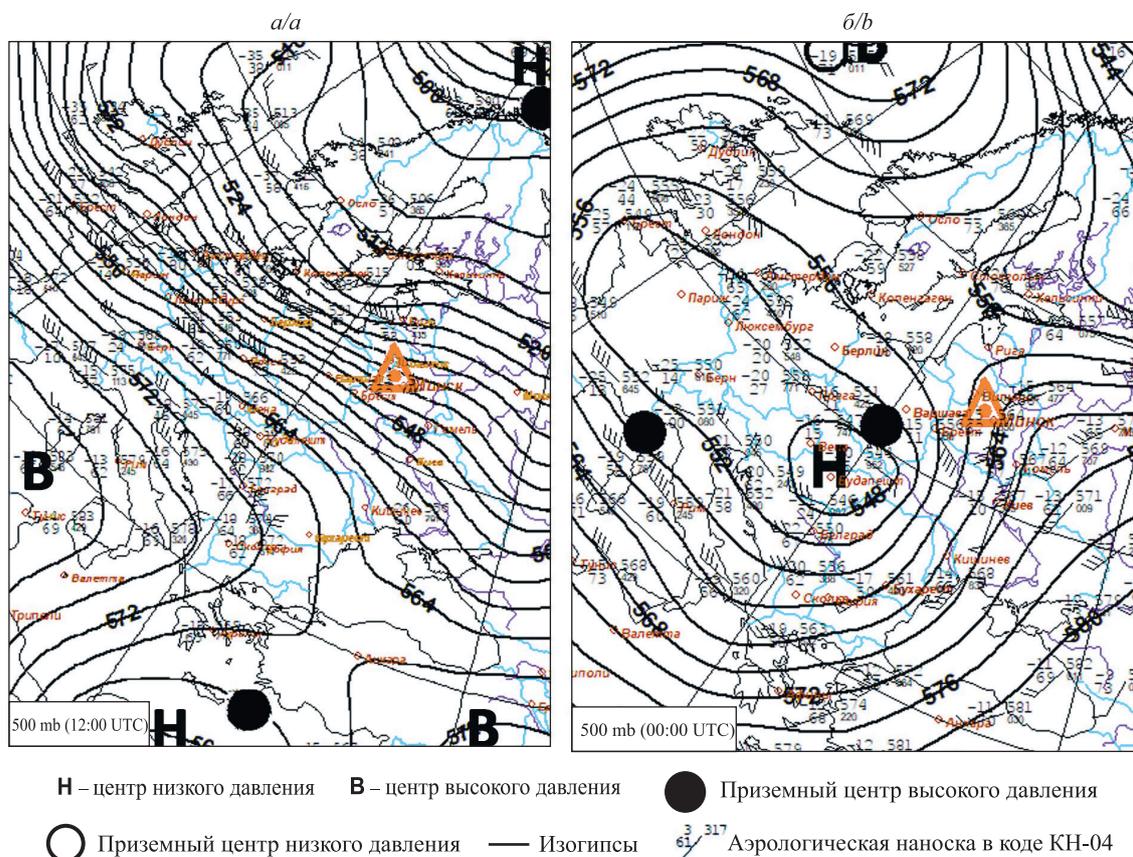


Рис. 5. Аэрологическая ситуация на картах АТ-500 в случаях зимних гроз: а – 12.03.2020; б – 14.10.2020
 Fig. 5. Aerological situation on 500 mb maps in cases of winter thunderstorms: a – 12.03.2020; b – 14.10.2020

На рис. 6 представлена аэрологическая ситуация на уровне АТ-300 во время зимних гроз в 2020 г., которая указывает на наличие мощных струйных течений как одного из факторов формирования гроз в холодный период года.

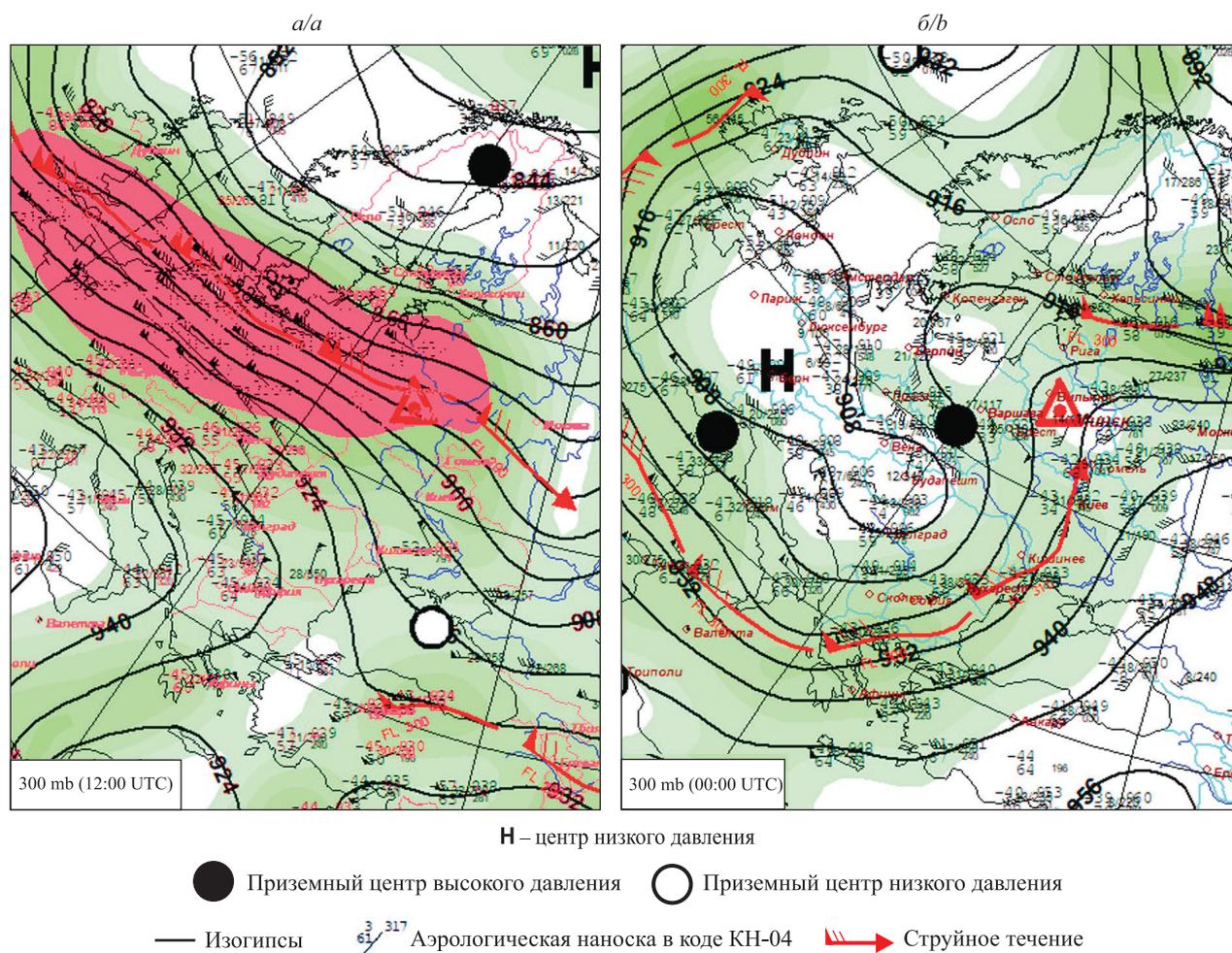


Рис. 6. Аэрологическая ситуация на картах АТ-300 в случаях зимних гроз:
а – 12.03.2020; б – 14.10.2020

Fig. 6. Aerological situation on 300 mb maps in cases of winter thunderstorms:
а – 12.03.2020; б – 14.10.2020

Расположение района с грозами вблизи оси струйного течения на уровне АТ-300 показывало, что циклон набирал свою активность⁷.

Заключение

На основании анализа информации о фактических грозах с октября по март в 1989–2020 гг. были выявлены 17 случаев зимних гроз на аэродроме Минск-2. При этом отмечена небольшая тенденция к росту количества гроз и сопровождающих их явлений (ливневые осадки, шквалистый ветер) в условиях современного потепления климата.

Отличительной особенностью зимних гроз является то, что они наблюдаются в результате динамического фактора, т. е. при прохождении активных фронтальных разделов и, как правило, вблизи вершины волновых возмущений на холодных фронтах с волнами и вблизи точки окклюзии на фронтах окклюзии. При этом усиление ветра до штормовых значений (выше 15 м/с) зафиксировано в 2 случаях. Все грозы сопровождались осадками: при высоких температурах – ливневым дождем с ухудшением видимости от 550 до 3800 м (12 случаев), при температурах около 0 °С – сильными снегопадами с видимостью от 100 до 400 м (5 случаев).

⁷Schwartz S. Thundersnow!..

Основными факторами формирования гроз в холодный период года являются:

- поступление теплой (с температурой воздуха у земли выше 0 °С) и влажной воздушной массы с юга или юго-запада, связанное с выходом интенсивно углубляющихся североатлантических или южных циклонов в стадии молодого циклона;
- прохождение основных и вторичных активных холодных фронтов со скоростями более 30 км/ч, холодных фронтов с волнами и фронтов окклюзии, обеспечивающих подъем теплого и влажного воздуха нижней тропосферы;
- существование слоя конвективной неустойчивости в атмосфере, характеризующейся вертикальными градиентами температуры, значительно превышающими влажноадиабатические градиенты;
- наличие гребня теплого и влажного воздуха, который затем сменяется ложбиной холода, на уровне АТ-850;
- наличие низкоструйных течений и положительной завихренности на уровнях АТ-700 и АТ-500, указывающих на подъем частицы воздуха;
- наличие мощного струйного течения западной четверти на уровне АТ-300, усиливающего конвективные процессы.

Практическая значимость исследования заключается в том, что вышеперечисленные факторы позволят определить наличие аэросиноптических условий, благоприятных для формирования зимних гроз, на начальном этапе прогноза опасных конвективных явлений с помощью оценки карт приземного анализа и карт барической топографии. Для уточнения прогноза ОЯ дополнительно должны использоваться расчетные методы прогноза конвективных явлений, построенные уже для конкретного рассматриваемого города или аэродрома.

Также необходимо отметить, что поскольку гроза представляет собой локальное мезомасштабное явление, то для целей наукастинга в сочетании с численными моделями прогноза погоды важно применять оперативные радиолокационные данные.

Результаты исследования аэросиноптических условий возникновения опасных конвективных явлений холодного периода в виде научно обоснованных рекомендаций по автоматизированным прогнозам года на примере аэродрома Минск-2 могут быть использованы для оперативных целей в сфере не только авиационно-метеорологического обеспечения, но и метеорологического информирования населения.

Библиографические ссылки

1. Подгорная ЕВ, Мельник ВИ, Комаровская ЕВ. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия. *Труды Гидрометцентра России*. 2015;358:112–120.
2. Юсупов ЮИ. *Прогноз шквалов и интенсивных осадков с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля* [диссертация]. Москва: [б. и.]; 2021. 129 с.
3. Смирнов СЭ, Михайлов ЮМ, Михайлова ГА, Капустина ОВ. Особенности зимних гроз на Камчатке. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2019;59(6):742–749.
4. Montaña J, Fabró F, van der Velde O, March V, Williams ER, Pineda N, et al. Global distribution of winter lightning: a threat to wind turbines and aircraft. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016;16(6):1465–1472. DOI: 10.5194/nhess-16-1465-2016.
5. Schultz DM, Vavrek RJ. An overview of thundersnow. *Weather*. 2009;64(10):274–277. DOI: 10.1002/wea.376.
6. Market PS. Upper air constant pressure composites of midwestern thundersnow events [Internet]. In: *Proceedings of the 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting / 16th Conference on Numerical Weather Prediction; 2004 January 12–16; Seattle, USA*. Seattle: American Meteorological Society; 2004 [cited 2021 September 29]. Available from: <http://solberg.snr.missouri.edu/ROCS/pub/WAF2004-TSSN-COMP.pdf>.
7. Crowe C, Market P, Pettegrew B, Melick C, Podzimek J. An investigation of thundersnow and deep snow accumulations. *Geophysical Research Letters*. 2006;33(24):L24812. DOI: 10.1029/2006GL028214.
8. Market PS, Oravetz AM, Gaede D, Bookbinder E, Lupo AR, Melick CJ, et al. Proximity soundings of thundersnow in the central United States. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2006;111(D19):D19208. DOI: 10.1029/2006JD007061.
9. Market PS, Halcomb CE, Ebert RL. A climatology of thundersnow events over the contiguous United States. *Weather and Forecasting*. 2002;17(6):1290–1295. DOI: 10.1175/1520-0434(2002)017<1290:ACOTEO>2.0.CO;2.
10. Rosenow AA, Plummer DM, Rauber RM, McFarquhar GM, Jewett BF, Leon D. Vertical velocity and physical structure of generating cells and convection in the comma head region of continental winter cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2014;71(5):1538–1558. DOI: 10.1175/JAS-D-13-0249.1.
11. Логинов ВФ, Волчек АА, Шпока ИН. Сравнение пространственно-временных особенностей изменений опасных метеорологических явлений в характерное и не характерное для них время года. В: Карабанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Гаврильчик АП, Волчек АА и др., редакторы. *Природопользование. Выпуск 19*. Минск: А. Н. Вараксин; 2011. с. 5–21.
12. Логинов ВФ, Волчек АА, Шпока ИН. Изменчивость числа дней с грозами на территории Беларуси. В: Логинов ВФ, редактор. *Природопользование. Выпуск 12*. Минск: Тонпик; 2006. с. 33–39.
13. Шпока ИН. *Пространственно-временное распределение опасных метеорологических явлений на территории Беларуси* [диссертация]. Брест: [б. и.]; 2011. 210 с.

14. Логинов ВФ, Бровка ЮА, Микуцкий ВС. Изменение климата, экстремальных погодных и климатических явлений и их связь с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзержевскому. В: Карбанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Волчек АА, Кадацкая ОВ и др., редакторы. *Природопользование. Выпуск 24*. Минск: Минсктиппроект; 2013. с. 5–10.
15. Мельник ВИ, Буяков ИВ, Чернышев ВД. Изменения количества и вида атмосферных осадков в холодный период на территории Беларуси в условиях современного потепления климата. *Природопользование*. 2019;2:44–51.
16. Сумак ЕН, Семёнова ИГ. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019;2:79–93. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.
17. Мальчик МК. *Рекомендации по прогнозу гроз в осенне-зимний период*. Минск: САМО РАМЦ; 2006. 41 с.
18. Воробьев ВИ. *Синоптическая метеорология*. Ленинград: Гидрометеониздат; 1991. 616 с.
19. Лукша МВ. Анализ и прогноз зимних гроз на примере аэродрома Минск-2. В: *Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий; 24–26 ноября 2021 г.; Иркутск, Россия*. Иркутск: Издательство ИГУ; 2021. с. 297–305.
20. Лукша МВ. Анализ и прогноз гроз в холодный период года на примере аэродрома Минск-2. В: Гайсёнок ВА, Василевская ЕИ, Григорьева ОН, Евтушенко НВ, редакторы. *Фундаментальная наука и образовательная практика. Материалы I Республиканской научно-методической конференции «Актуальные проблемы современного естествознания»; 2 декабря 2021 г.; Минск, Беларусь*. Минск: РИВШ; 2021. с. 49–53.

References

1. Padhornaya EV, Melnik VI, Kamarouskaya EV. Characteristic features of the climate change on the territory of the Republic of Belarus in the last decades. *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2015;358:112–120. Russian.
2. Yusupov YuI. *Prognoz shkvalov i intensivnykh osadkov s primeneniem termodinamicheskikh parametrov atmosfery i potentsial'nogo vikhrya Ertelya* [Forecast of squalls and intense precipitation using thermodynamic parameters of the atmosphere and a potential Ertel vortex] [dissertation]. Moscow: [s. n.]; 2021. 129 p. Russian.
3. Smirnov SE, Mikhailov YuM, Mikhailova GA, Kapustina OV. [Features of winter thunderstorms in Kamchatka]. *Geomagnitizm i aeronomiya*. 2019;59(6):742–749. Russian.
4. Montanya J, Fabró F, van der Velde O, March V, Williams ER, Pineda N, et al. Global distribution of winter lightning: a threat to wind turbines and aircraft. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016;16(6):1465–1472. DOI: 10.5194/nhess-16-1465-2016.
5. Schultz DM, Vavrek RJ. An overview of thundersnow. *Weather*. 2009;64(10):274–277. DOI: 10.1002/wea.376.
6. Market PS. Upper air constant pressure composites of midwestern thundersnow events [Internet]. In: *Proceedings of the 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting / 16th Conference on Numerical Weather Prediction; 2004 January 12–16; Seattle, USA*. Seattle: American Meteorological Society; 2004 [cited 2021 September 29]. Available from: <http://solberg.snr.missouri.edu/ROCS/pub/WAF2004-TSSN-COMP.pdf>.
7. Crowe C, Market P, Pettegrew B, Melick C, Podzimek J. An investigation of thundersnow and deep snow accumulations. *Geophysical Research Letters*. 2006;33(24):L24812. DOI: 10.1029/2006GL028214.
8. Market PS, Oravetz AM, Gaede D, Bookbinder E, Lupo AR, Melick CJ, et al. Proximity soundings of thundersnow in the central United States. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2006;111(D19):D19208. DOI: 10.1029/2006JD007061.
9. Market PS, Halcomb CE, Ebert RL. A climatology of thundersnow events over the contiguous United States. *Weather and Forecasting*. 2002;17(6):1290–1295. DOI: 10.1175/1520-0434(2002)017<1290:ACOTEO>2.0.CO;2.
10. Rosenow AA, Plummer DM, Rauber RM, McFarquhar GM, Jewett BF, Leon D. Vertical velocity and physical structure of generating cells and convection in the comma head region of continental winter cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2014;71(5):1538–1558. DOI: 10.1175/JAS-D-13-0249.1.
11. Loginov VF, Volchek AA, Shpoka IN. Comparison of existential features of changes of hazardous meteorological phenomena in characteristic and not characteristic for them season. In: Karabanov AK, Bambalov NN, Berzovskii NI, Bровка GP, Gavril'chik AP, Volchek AA, et al., editors. *Природопользование. Выпуск 19* [Nature management. Issue 19]. Минск: A. N. Varaksin; 2011. p. 5–21. Russian.
12. Loginov VF, Volchek AA, Shpoka IN. Variability number day's thunderstorms on the territorial Belarus. In: Loginov VF, editor. *Природопользование. Выпуск 12* [Nature management. Issue 12]. Минск: Tonpik; 2006. p. 33–39. Russian.
13. Shpoka IN. *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie opasnykh meteorologicheskikh yavlenii na territorii Belarusi* [Spatial-temporal distribution of dangerous meteorological phenomena on the territory of Belarus] [dissertation]. Brest: [s. n.]; 2011. 210 p. Russian.
14. Loginov VF, Bровка JA, Mikutskiy VS. Change of climate, extreme weather and climatic phenomena and their link with types of atmospheric circulation of Northern hemisphere by B. L. Dzerzhievskii. In: Karabanov AK, Bambalov NN, Berzovskii NI, Bровка GP, Volchek AA, Kadatskaya OV, et al., editors. *Природопользование. Выпуск 24* [Nature management. Issue 24]. Минск: Минсктиппроект; 2013. p. 5–10. Russian.
15. Melnik VI, Buyakov IV, Chernyshev VD. Changes in the amount and type of precipitation in the cold period in the territory of Belarus under conditions of modern climate warming. *Nature Management*. 2019;2:44–51. Russian.
16. Sumak KM, Semenova IG. The cyclonic activity and frequency of dangerous weather phenomena over the territory of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2019;2:79–93. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.
17. Mal'chik MK. *Rekomendatsii po prognozu гроз v осенне-зимний период* [Recommendations for the forecast of thunderstorms in the autumn-winter period]. Минск: САМО РАМЦ; 2006. 41 p. Russian.
18. Vorob'ev VI. *Sinopticheskaya meteorologiya* [Synoptic meteorology]. Ленинград: Гидрометеониздат; 1991. 616 p. Russian.

19. Luksha MV. [Analysis and forecast of winter thunderstorms on the example of the Minsk-2 airfield]. In: *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii. Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi k Godu nauki i tekhnologii; 24–26 noyabrya 2021 g.; Irkutsk, Rossiya* [Current trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia. Materials of the 4th All-Russian scientific and practical conference dedicated to the Year of Science and Technology; 2021 November 24–26; Irkutsk, Russia]. Irkutsk: Publishing House of the Irkutsk State University; 2021. p. 297–305. Russian.

20. Luksha MV. Analysis and forecast of thunderstorms in the cold season on the example of the Minsk-2 airfield. In: Gaisnok VA, Vasilevskaya EI, Grigor'eva ON, Evtushenko NV, editors. *Fundamental'naya nauka i obrazovatel'naya praktika. Materialy I Respublikanskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennogo estestvoznaniya»; 2 dekabrya 2021 g.; Minsk, Belarus'* [Fundamental science and educational practice. Materials of the 1st Republican scientific and methodological conference «Actual problems of modern natural science»; 2021 December 2; Minsk, Belarus]. Minsk: National Institute for Higher Education; 2021. p. 49–53. Russian.

Получена 14.12.2021 / исправлена 24.03.2022 / принята 24.03.2022.
Received 14.12.2021 / revised 24.03.2022 / accepted 24.03.2022.