

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-277-290>

УДК 551.594



Анализ условий формирования гроз в районе НИС «Ледовая база Мыс Баранова»

Л.А. Старцев[✉], И.А. Ильющенко¹, М.А. Ёжикова²

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия.

[✉]sla@aari.ru

ЛАС, 0009-0001-2250-3042; ИАИ, 0009-0006-9643-3063; МАЕ, 0009-0005-5729-2977

Аннотация. В статье представлен обзор синоптических условий и анализ данных радиозондирования атмосферы, полученных на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» ФГБУ «ААНИИ». Исследование охватывает четыре случая грозовой активности: в июне 2019 г., два случая в июне 2020 г. и в июле 2022 г., включая первую зарегистрированную грозу на станции, произошедшую 20 июня 2019 г. Основное внимание уделяется данным утреннего радиозондирования, использованным для построения аэрологических диаграмм и расчета индексов неустойчивости, таких как индекс Бойдена, К-индекс, Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals. Анализ условий показал, что над районом формируются воздушные потоки юго-западных направлений, с более теплой, прогретой в летнее время континентальной части, на относительно более холодную северо-восточную акваторию Карского моря, акваторию моря Лаптевых, а также район архипелага Северная Земля. Обнаружено наличие температурной инверсии в приземном слое и устойчиво стратифицированной атмосферы во всех рассматриваемых случаях, что обычно препятствует грозовой активности. Тем не менее фактические случаи гроз выявляют необходимость пересмотра пороговых значений для прогнозирования гроз в условиях высокоширотной Арктики.

Ключевые слова: Арктика, гроза, неустойчивость атмосферы, индексы неустойчивости, конвекция

Для цитирования: Старцев Л.А., Ильющенко И.А., Ёжикова М.А. Анализ условий формирования гроз в районе НИС «Ледовая база Мыс Баранова». *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(3):277–290. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-277-290>

Поступила 06.03.2025

После переработки 26.05.2025

Принята 18.06.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Study of thunderstorm formation conditions at the research station “Ice Base Cape Baranova”

Leonid A. Startsev¹✉, Irina A. Ilyushchenkova¹, Marina A. Yezhikova²

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

✉sla@aari.ru

ID LAS, 0009-0001-2250-3042; IAI, 0009-0006-9643-3063; MAY, 0009-0005-5729-2977

Abstract. The paper study presents a review of synoptic conditions and an analysis of atmospheric radiosonde data collected at the “Ice Base Cape Baranova” research station, operated by the Federal State Budgetary Institution “AARI”. The station is located on the coast of the Shokal’sky Strait at the northern tip of Bolshevik Island (Severnaya Zemlya archipelago). The analysis includes four cases of thunderstorm activity: one case in June 2019, two cases in June 2020 and one case in July 2022. Notably, the first recorded thunderstorm at the station occurred on June 20, 2019. The analysis focused on morning radiosonde data (00:00 UTC) and aimed to construct and evaluate aerological diagrams and calculate various instability indices, including the Boyden Index, K-index, Vertical Totals, Cross Totals and Total Totals. The findings reveal diverse synoptic conditions at the surface, while the upper troposphere consistently exhibited the influence of baric trough from the southwest and height ridges from the southeast. In all the cases analyzed, a temperature inversion was observed in the surface layer, typically indicating stable atmospheric stratification. However, the actual occurrence of thunderstorms suggests alternative factors, such as orographic influences and warm air advection, may give rise to these convective processes.

Although the calculated instability indices generally remained below established thresholds, indicating a low probability of thunderstorms, thunderstorm events were nevertheless recorded. This discrepancy highlights the need to adapt existing criteria for predicting thunderstorm activity in the High Arctic. This study underscores the importance of further research to enhance understanding of atmospheric dynamics in Polar Regions and improve predictive models for convective weather phenomena.

Keywords: Arctic, thunder and lightning, atmospheric instability, instability indices, convection

For citation: Startsev L.A., Ilyushchenkova I.A., Yezhikova M.A. Study of thunderstorm formation conditions at the research station “Ice Base Cape Baranova”. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(3):277–290. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-277-290>

Received 06.03.2025

Revised 26.05.2025

Accepted 18.06.2025

Введение

В условиях меняющегося климата отмечается тенденция к увеличению повторяемости опасных погодных явлений [1]. В высоких широтах потепление климата наблюдается с большей скоростью [2]. При этом отмечается влияние увеличения грозовой активности на изменения ледовых условий летом в Арктике, обусловленное повышением водяного пара в верхней тропосфере, который действует как парниковый газ [3]. В научной литературе все чаще упоминается грозовая деятельность в высоких широтах [4, 5]. В районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова» ФГБУ «ААНИИ» (далее НИС) на берегу пролива Шокальского у северной оконечности острова Большевик (архипелаг Северная Земля) впервые

зарегистрировали грозу 20 июня 2019 г., а самая продолжительная гроза (55 минут) в высокоширотной Арктике была зарегистрирована в июле 2022 г.¹

Стационар расположен на берегу пролива Шокальского, разделяющего острова Большевик и Октябрьской Революции архипелага Северная Земля, недалеко от мыса Баранова и имеет координаты: 79°16′ с. ш., 101°45′ в. д. Пролив достигает глубины до 350 м и ширины 40 км. Прилегающая к району расположения стационара территория характеризуется наличием широкого спектра природных льдов: морского дрейфующего и припайного, озерного и речного, мощными (до 800 м) куполообразными ледниками и многочисленными айсбергами.

Окрестность стационара изобилует многочисленными озерами и отличается ярко выраженным ландшафтом полярной пустыни. Район расположения станции характеризуется длительными полярной ночью (с 22 октября по 22 февраля) и полярным днем (с 22 апреля по 22 августа). Средняя температура воздуха летом (июнь – август) составляет от 0 до +4 °С. Зимой (октябрь – апрель) температура воздуха варьирует от –25 до –45 °С. Для района станции характерны устойчивые ветры преимущественно юго-западного направления со средней скоростью 10–15 м/с. В переходные периоды года скорость ветра в порывах может достигать до 45 м/с. Грунт в районе станции большей частью каменистый, сланцевый².

Наблюдаемые случаи гроз в районе НИС не являются единичными, а отражают общую тенденцию в высоких широтах. По данным метеорологических станций ВМО к северу от 60° с. ш. за период 2000–2019 гг., Российская Арктика рассматривается как регион с высокой повторяемостью гроз, и в среднем 85 % случаев зарегистрированных гроз приходится на летний период с июня по август [6]. 90 % случаев гроз к северу от 60° с. ш. приходится на фон температуры воздуха от +5 °С до +25 °С. Отмечено, что случаи гроз при температуре воздуха ниже +5 °С редки, однако зарегистрированы случаи гроз в Арктике при температуре воздуха ниже –20 °С [6]. Летом 2019 г. американская Национальная служба погоды зафиксировала грозу в менее чем 50 км от Северного полюса [7]. Это подтверждает возможность формирования гроз даже в условиях низких температур воздуха при наличии благоприятных термодинамических условий.

Вопрос о вероятной динамике повторяемости гроз в Арктике в будущем остается открытым [8, 9]. В научном сообществе существуют противоположные мнения: одни авторы указывают на возможное увеличение частоты гроз в связи с потеплением климата и отмечают корреляцию между температурой воздуха и количеством гроз [4, 5], другие, напротив, предполагают снижение грозовой активности [10]. Тем не менее мониторинг гроз и прогнозирование условий их возникновения остаются важными задачами для обеспечения безопасной хозяйственной и научной деятельности в высоких широтах [11].

Целью настоящей работы является выявление и анализ синоптических и метеорологических условий, способствующих формированию грозовой активности

¹ Ученые ААНИИ зафиксировали самую продолжительную грозу в высокоширотной Арктике. URL: <https://www.aari.ru/press-center/news/vae/uchenye-aanii-zafiksirovali-samuyu-prodolzhitelnuyu-grozu-v-vysokoshirotnoy-arktike> (дата обращения: 21.04.2025).

² Научно-технический отчет о работе Научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова» 2022–2023. ААНИИ; 2023. 530 с.

в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова», на основе зарегистрированных случаев гроз в 2019, 2020 и 2022 гг. Работа направлена на установление особенностей атмосферной циркуляции и термодинамических условий.

Материалы и методы

В работе представлен результат анализа метеорологических условий, атмосферной циркуляции на приземном уровне и высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа и данных радиозондирований атмосферы (базовая станция системы радиозондирования «Полус-С» и радиозонды МРЗ-Н1), проведенных на НИС. Исследуемые данные наблюдений охватывают четыре случая регистрации грозовой активности — первый зарегистрированный случай грозы на НИС в июне 2019 г., два случая в июне 2020 г. и один случай в июле 2022 г. До этих событий грозы в районе НИС не регистрировались, также не были изучены условия их формирования в рассматриваемом районе. В контексте нашего исследования были проанализированы данные утреннего радиозондирования (00:00 UTC, 08:00 местного времени), для каждого случая были построены и проанализированы аэрологические диаграммы, рассчитаны наиболее часто применяемые на практике индексы неустойчивости, такие как индекс Бойдена (Boyden Index), К-индекс (индекс Вайтинга), Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals.

Индекс Бойдена (Boyden Index) [12] рассчитывается для прогноза зимних гроз по формуле:

$$BI = (Z_{700} - Z_{1000}) - T_{700} - 200, \quad (1)$$

где Z_{700} — высота уровня 700 гПа в декаметрах; Z_{1000} — высота уровня 1000 гПа в декаметрах; T_{700} — температура на уровне 700 гПа, °С. Данный индекс является мерой неустойчивости нижней тропосферы до уровня 700 гПа. Пороговое значение $BI > 94$.

К-индекс [13] рассчитывается для оценки потенциала к развитию конвекции и гроз. Пороговые значения индекса: < 20 — вероятность гроз стремится к нулю, $20-30$ — вероятность формирования отдельных грозовых очагов, > 35 — высокая вероятность формирования многочисленных грозовых очагов.

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}), \quad (2)$$

где T_{850} — температура на уровне 850 гПа, °С; T_{500} — температура на уровне 500 гПа, °С; Td_{850} — температура точки росы на уровне 850 гПа, °С; T_{700} — температура на уровне 700 гПа, °С; Td_{700} — температура точки росы на уровне 700 гПа, °С.

Vertical Totals³ рассчитывается по формуле:

$$VT = T_{850} - T_{500}, \quad (3)$$

где T_{850} — температура на уровне 850 гПа, °С; T_{500} — температура на уровне 500 гПа, °С.

Если $VT > 28$, следовательно, тропосфера обладает высоким потенциалом конвективной неустойчивости, достаточным для образования гроз.

³ Vertical Totals calculator. Skystef's aviation & weather world. URL: <https://www.skystef.be/calculator-verticaltotalsindex.htm> (accessed 05.02.2025).

Cross Totals⁴ индекс рассчитывается по формуле:

$$CT = Td_{850} - T_{500}, \quad (4)$$

где Td_{850} — температура точки росы на уровне 850 гПа, °C; T_{500} — температура на уровне 500 гПа, °C.

Пороговые значения индекса: < 18 — тропосфера обладает низким потенциалом конвективной неустойчивости, который недостаточен для грозовой деятельности; 18–19 — умеренная неустойчивость, слабая грозовая деятельность; 20–21 — высокая неустойчивость, грозы; 22–23 — энергия неустойчивости, при которой возможны сильные грозы; 24–25 — высокая энергия неустойчивости, сильные грозы; > 25 — очень высокая энергия неустойчивости, очень сильные грозы.

Total Totals [14] индекс рассчитывается по формуле:

$$TT = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - T_{500}), \quad (5)$$

где T_{850} — температура на уровне 850 гПа, °C; T_{500} — температура на уровне 500 гПа, °C; Td_{850} — температура точки росы на уровне 850 гПа, °C.

Пороговые значения индекса: < 44 — грозовая деятельность невозможна; 44–45 — отдельная гроза или несколько гроз; 46–47 — рассеянные грозовые очаги; 48–49 — значительное количество гроз, отдельные из которых сильные; 50–51 — рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем; 52–55 — значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем; > 55 — многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.

Индексы Vertical Totals и Cross Totals были рассчитаны с помощью интернет-ресурсов (ссылки 3 и 4). Как видно, К-индекс, Cross Totals и Total Totals учитывают не только температурные, но и влажностные характеристики атмосферы.

Анализ и результаты исследования

Обзор синоптических условий

в дни формирования гроз на НИС «Ледовая база Мыс Баранова»

Для изучения синоптических условий использованы фактические данные стандартных метеорологических наблюдений FM 12 SYNOP, FM 35 TEMP, получаемые в Автоматической службе передачи данных (АСПД) ААНИИ и обработанные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ) ААНИИ. Карты высот стандартной изобарической поверхности 500 гПа представлены в геопотенциальных декаметрах (гп. дам).

20 июня 2019 г. район архипелага Северная Земля находился под влиянием юго-западной периферии обширного циклона (рис. 1а), смещающегося с приполюсного сектора моря Лаптевых далее на северо-восток. С юго-запада развивался промежуточный барический гребень. Во второй половине суток 20 июня с юго-запада начала влияние барическая ложбина от нового циклона (давление в центре 990 гПа), расположенного над юго-западом Карского моря. Наблюдалась смена направления ветра от юго-западного (230°) к восточным направлениям (80–100°), наблюдались порывы очень сильного ветра, скорость достигала 18–19 м/с, фон температуры воз-

⁴ Cross Totals calculator. Skystef's aviation & weather world. URL: <https://www.skystef.be/calculator-crosstotalindex.htm> (accessed 05.02.2025).

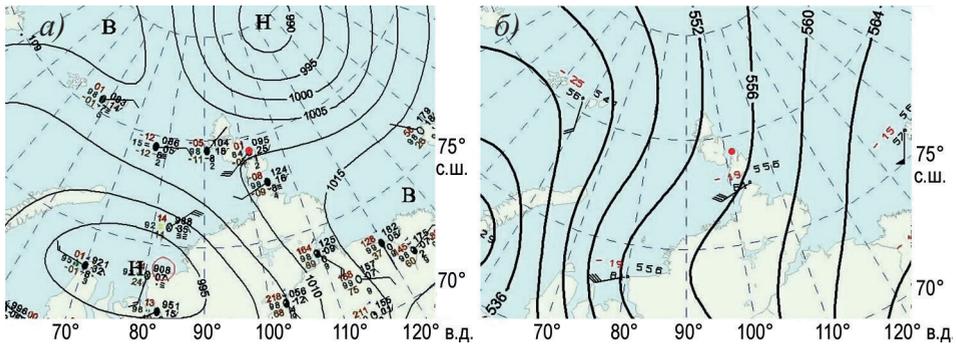


Рис. 1. Приземная карта погоды (а), карта высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, гп. дам (б), 20.06.2019 00:00 UTC

Fig. 1. Surface weather map (a), geopotential surface height map 500 hPa, gpdam (б), June 20, 2019, 00:00 UTC

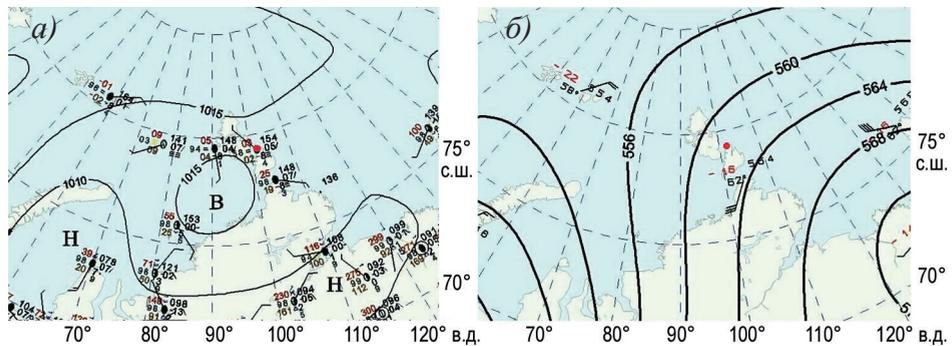


Рис. 2. Приземная карта погоды (а), карта высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, гп. дам (б), 24.06.2020 00:00 UTC

Fig. 2. Surface weather map (a), geopotential surface height map 500 hPa, gpdam (б), June 24, 2020, 00:00 UTC

духа находился в пределах $0... +3\text{ }^{\circ}\text{C}$, в конце суток отмечались осадки в виде мороси и слабого дождя. Анализируя карты высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа 20 июня (рис. 1б), можно отметить положение центра низкого давления в районе южной оконечности арх. Новая Земля, к востоку от арх. Северная Земля отмечается наличие высотного гребня.

24 июня 2020 г. синоптические условия определялись влиянием частного циклона (рис. 2а), расположенного над северо-восточной акваторией Карского моря, в районе мыса Баранова влиял теплый сектор данного циклона. Во второй половине периода усиливалось барическое ядро (давление в центре 1015 гПа) над северо-восточной акваторией Баренцева моря. Направление ветра сменялось от северо-восточного (40°) к северо-западному ($320\text{--}340^{\circ}$), наблюдались слабые ветра $2\text{--}4\text{ м/с}$. Фон температуры воздуха в течение суток преобладал $0... +1\text{ }^{\circ}\text{C}$. С 06:00 UTC до 18:00 UTC отмечалось значительное ухудшение видимости до 400 м в связи с туманом, относительная влажность зафиксирована $99\text{--}100\text{ \%}$. Анализ карт высоты

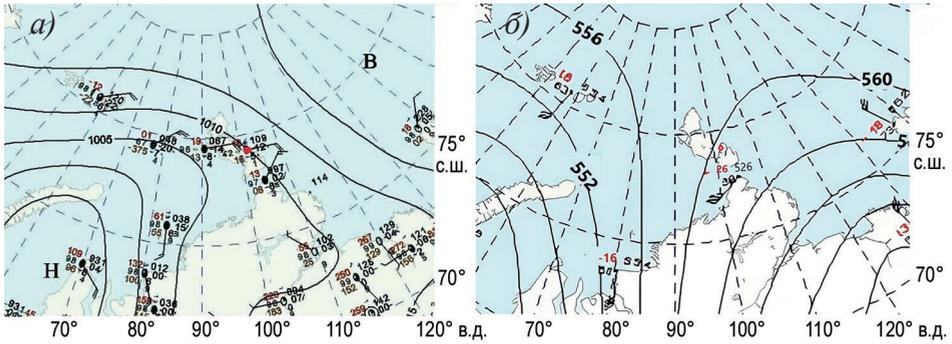


Рис. 3. Приземная карта погоды (а), карта высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, гп. дам (б), 30.06.2020 00:00 UTC

Fig. 3. Surface weather map (a), geopotential surface height map 500 hPa, gpdam (b), June 30, 2020, 00:00 UTC

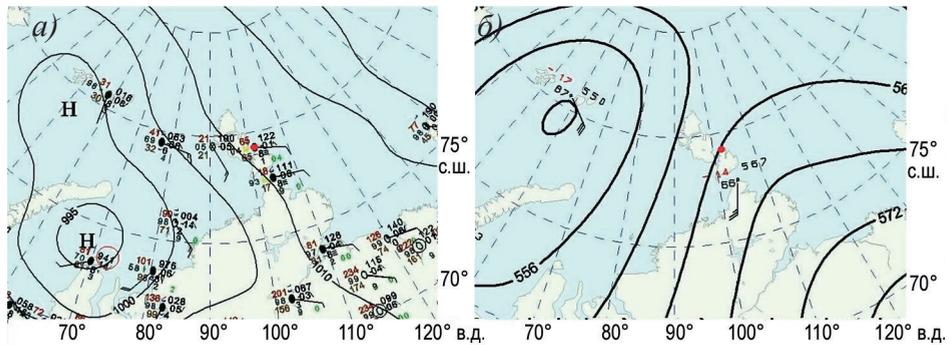


Рис. 4. Приземная карта погоды (а), карта высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, гп. дам (б), 27.07.2022 00:00 UTC

Fig. 4. Surface weather map (a), geopotential surface height map 500 hPa, gpdam (b), July 27, 2022, 00:00 UTC

геопотенциальной поверхности 500 гПа показал, что в верхней тропосфере над районом влиял высотный гребень с юго-востока, с центром повышенного давления над северо-западом Якутии (рис. 2б).

30 июня 2020 г. арх. Северная Земля находился под влиянием барической ложбины с запада от активного циклона (рис. 3а), расположенного над юго-западом Карского моря. С востока влияла периферия обширного антициклона (давление в центре 1020 гПа), расположенного в приполюсном секторе Восточно-Сибирского моря. На арх. Северная Земля отмечалось прохождение фронта окклюзии. В течение суток отмечалось две смены направления ветра: в начале суток от восточного (90°) к северо-западному, северному ($320\text{--}350^\circ$) и в конце суток к северо-восточному (50°); в начале суток порывы ветра достигали 13 м/с, с последующим ослаблением ветра до 2–3 м/с. В начале суток наблюдался дождь и ухудшение видимости до 100 м в связи с туманом, в период с 00:00 до 06:00 UTC относительная влажность повышалась до 100 %. Наблюдалось повышение температуры воздуха от $0\dots +1^\circ\text{C}$ до $+5\dots +6^\circ\text{C}$. В верхней тропосфере преобладал высотный гребень с юго-востока (рис. 3б).

27 июля 2022 г. район находился под влиянием барической ложбины с юго-запада от циклона (рис. 4а), расположенного над юго-западом Карского моря, с востока отмечалась периферия обширного циклона (давление в центре 1025 гПа), протянувшегося с акватории Восточно-Сибирского моря в приполюсный район. На станции «Ледовая база Мыс Баранова» наблюдалась смена направления ветра от восточного (100°) к западному (280°) и в конце суток к юго-восточному (150°). В период с 06:00 UTC до 12:00 UTC усиливался ветер и отмечались порывы до 10–11 м/с. В начале суток горизонтальная дальность видимости ухудшалась до 400 м в связи с туманом. Относительная влажность повышалась до 100 %. Фон температуры преобладал +3... +6 °С. В верхней тропосфере отмечался высотный гребень с юго-востока, циркумполярный вихрь располагался к северу от арх. Новая Земля (рис. 4б).

Анализ карт высот изобарической поверхности 500 гПа показал, что во всех рассмотренных случаях наблюдались юго-западные потоки.

На следующем этапе исследования был проведен углубленный анализ условий, способствующих формированию гроз. Для этого были использованы данные утреннего радиозондирования атмосферы (00:00 UTC), полученные на НИС. На основе радиозондовых измерений построены аэрологические диаграммы (см. рис. 5), а также выполнены расчеты индексов неустойчивости атмосферы, позволяющих оценить потенциал к развитию конвективной активности.

Анализ аэрологических диаграмм и расчет индексов неустойчивости атмосферы

Анализ данных утреннего радиозондирования показал наличие схожих условий в приземном слое и свободной атмосфере. Они характеризовались наличием приземной температурной инверсии и в целом устойчиво стратифицированной атмосферой. Построенные по данным зондирования аэрологические диаграммы представлены на рис. 5. Приземные температуры, максимальные температуры инверсионного слоя и толщина инверсионного слоя приведены в табл. 1.

Как известно, слой инверсионного распределения температуры препятствует развитию вертикального движения в атмосфере [15] и теоретически не способствует развитию грозовых явлений. Предполагается, что формирование гроз вблизи НИС «Ледовая база Мыс Баранова» возникает при юго-западных потоках, которые приносят теплый и влажный воздух с материка на холодную морскую поверхность, иницируя конвективные процессы выше уровня инверсии.

С учетом исследований влияния параметров приземного слоя на развитие облачной конвекции [16], можно предположить, что рельеф местности способен сыграть

Таблица 1

Приземные температуры, максимальная температура инверсионного слоя и его толщина

Table 1

Surface temperatures, maximum temperature of the inversion layer and its thickness

Параметр	20.06.2019	24.06.2020	30.06.2020	27.07.2022
Приземная температура, °С	0,1	1,1	1,5	6,5
Максимальная температура слоя инверсии, °С	3,9	9,0	12,6	11,0
Толщина инверсионного слоя, м	240	1305	1116	342

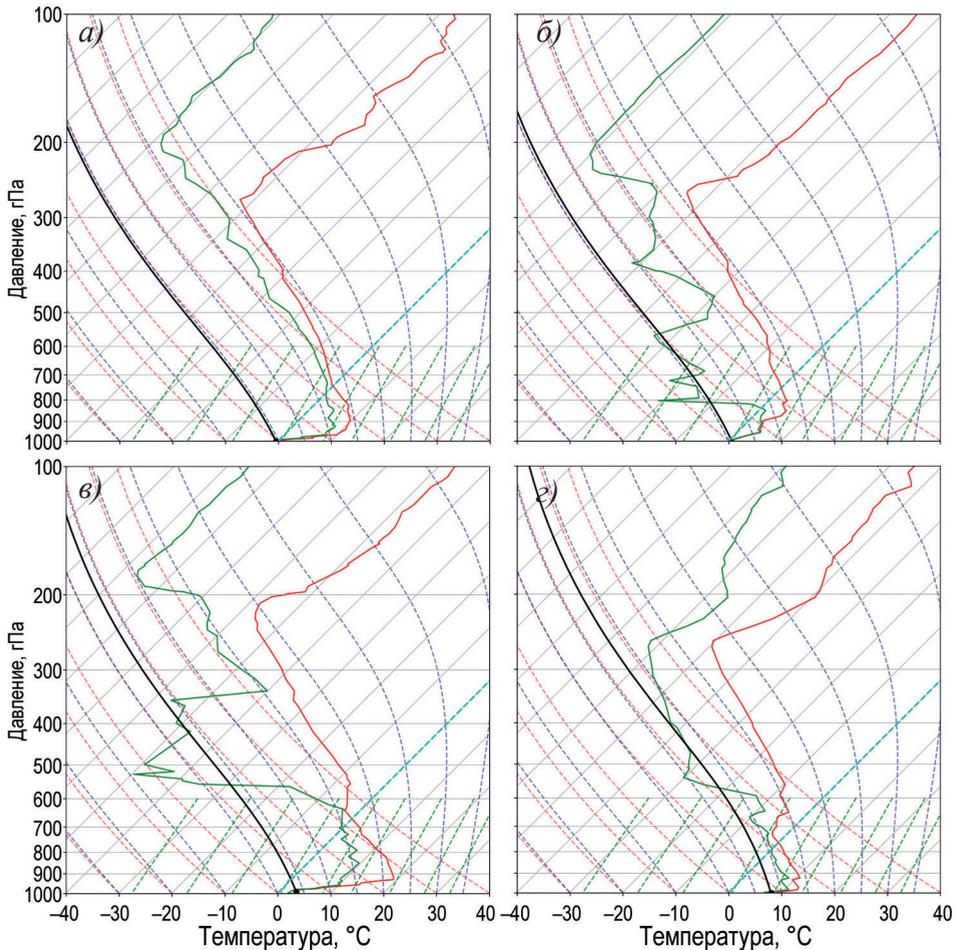


Рис. 5. Аэрологические диаграммы, построенные по данным утреннего радиозондирования 00:00 UTC за дни с грозами 20.06.2019 (а), 24.06.2020 (б), 30.06.2020 (в), 27.07.2022 (з).

Красной сплошной линией обозначена кривая стратификации, черной линией — кривая состояния, зеленой сплошной линией — температуры точки росы

Fig. 5. Aerological diagrams, based on morning radiosonde data at 00:00 UTC for days with thunderstorms: June 20, 2019 (a); June 24, 2020 (b); June 30, 2020 (v); July 27, 2022 (z).

The red solid line demonstrates the stratification curve, the black line shows the state curve, and the green solid line demonstrates the dew point temperature

роль стартового механизма для восходящего потока, позволяющего «пробить» инверсионный слой и запустить процесс конвекции, учитывая значительные изменения высот подстилающей поверхности на архипелаге Северная Земля, достигающих 960 м (ледник Карпинского, о. Октябрьской Революции). В работах, исследующих процессы грозообразования в окрестностях Шпицбергена и Канадского архипелага, местный рельеф также упоминается в качестве возможного спускового механизма, способствующего развитию вертикальных движений [17, 18].

Таблица 2

Значения рассчитанных индексов неустойчивости

Table 2

The values of the calculated instability indices

Число	VI > 94	KI > 20	VT > 28	CT > 18	TT > 44
20.06.2019	90,7	-3,1	23,2	12,2	35,4
24.06.2020	92,3	14,2	27,5	14,2	33,9
30.06.2020	93,6	32,5	24,5	22,8	47,3
27.07.2022	90,6	-1,3	22,8	18,4	41,2

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены значения, достигшие пороговых значений
 Note. The values that reached the thresholds are highlighted in bold

Для дальнейшего анализа проводился расчет 5 индексов неустойчивости, включая индекс Бойдена (Boyden Index), К-индекс, Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals.

В табл. 2 приводятся результаты расчета индексов неустойчивости.

В целом рассчитанные индексы неустойчивости, при которых наблюдались грозы, в большинстве случаев оказались ниже пороговых значений. Анализируя данные табл. 2, можно отметить, что наиболее приближенными к пороговым значениям для всех четырех случаев являются индексы Бойдена VI (среднее отклонение от порогового значения составляет 2,2 единицы, или 2,3 %) и Cross Totals (среднее отклонение составляет 1,1 °C, или 6,1 %), а наихудшую сопоставимость демонстрирует К-индекс (среднее отклонение составляет 9,4 °C, или 47,1 %). Грозовой эпизод 30 июня 2020 г. отличается от остальных тем, что были достигнуты пороговые значения по трем индексам из пяти (KI, Cross Totals, Total Totals). Индекс Cross Totals достиг пороговых значений в двух случаях: 30 июня 2020 г. и 27 июля 2022 г. В работе, где проводится анализ применения различных индексов неустойчивости над территорией Западной Сибири при прогнозировании грозовой активности, авторы отмечают, что К-индекс и Total Totals являются одними из наиболее успешных [19]. В то же время авторы статьи указывают на необходимость корректировки пороговых значений индексов в зависимости от расположения исследуемых локаций. При расчетах на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» не обнаружено, что индексы KI и Total Totals более успешны по сравнению с остальными, однако в настоящем исследовании число случаев довольно мало, чтобы проводить полноценный анализ.

Обсуждение результатов и выводы

Для четырех случаев формирования гроз в районе архипелага Северная Земля, НИС «Ледовая база Мыс Баранова», проанализированы синоптические условия на основе данных инструментальных метеорологических наблюдений, приземных синоптических карт и карт высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, рассчитаны индексы неустойчивости. Над районом формируются воздушные потоки преимущественно юго-западных направлений, с более теплой, прогретой в летнее время континентальной части на относительно более холодную северо-восточную акваторию Карского моря, акваторию моря Лаптевых, а также района архипелага Северная Земля. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работе [20], где анализируются четыре периода грозовой активности в районе к северу от 75° с. ш. Один из этих периодов охватывает временной интервал с 00:00 UTC 26 июня по 00:00 UTC

2 июля 2020 г. Авторы отмечают значительное потепление на территории Северо-Сибирской низменности в указанный период. Экстремальное потепление над сушей в сочетании с сохраняющимися низкими температурами над акваторией Северного Ледовитого океана формирует выраженный меридиональный градиент температуры воздуха. Это, в свою очередь, способствует усилению бароклинной неустойчивости и развитию конвективных систем над акваторией Северного Ледовитого океана к северу от Сибири [20]. В районе архипелага Шпицберген грозовая активность, напротив, ассоциируется с поступлением холодных воздушных масс. Согласно результатам исследований, большинство зафиксированных случаев гроз в данном регионе связано с воздействием холодного фронта, смещающегося с юга или юго-запада [21]. Таким образом, грозовая активность в районе Шпицбергена обусловлена преимущественно приходом холодных фронтов и вторжением холодного воздуха.

На момент проведения исследования в районе «Ледовой базы Мыс Баранова» официально зарегистрировано всего четыре случая гроз по данным метеорологических сводок. Все эти случаи были включены в анализ, поскольку других зафиксированных эпизодов в районе НИС не имеется. Безусловно, такого количества недостаточно для проведения статистически значимого анализа или выявления устойчивых закономерностей. Однако, учитывая редкость самого явления и его слабую изученность в высоких широтах, представляется целесообразным провести разведочный анализ имеющихся эпизодов. Это позволяет рассмотреть особенности формирования арктических гроз, оценить сопутствующие синоптические условия и параметры неустойчивости тропосферы.

Расположение НИС «Ледовая база Мыс Баранова» обладает рядом рельефных и климатических особенностей, которые могут способствовать формированию локальных грозовых явлений. Резкие переходы от прибрежных низменностей к возвышенностям создают благоприятные условия для формирования локальных восходящих потоков воздуха. Контраст температур воздуха между ледниковой поверхностью и поступающими теплыми воздушными массами с юга может усиливать вертикальные градиенты температуры воздуха, способствуя формированию конвективной неустойчивости. Архипелаг окружен морями, которые в летний период освобождаются ото льда, что способствует увлажнению нижнего слоя атмосферы и увеличивает вероятность развития конвективных процессов.

Во всех рассмотренных случаях гроз на НИС фон температуры воздуха преобладал от 0 до +6 °С. Отмечается, что около 1,5 % случаев зарегистрированных гроз за период 2000–2019 гг. в районе к северу от 60° с. ш. приходится на температуры воздуха +5 °С и ниже, грозы при температурах воздуха ниже 0 °С очень редки [6].

При анализе аэрологических диаграмм выявлены сходные условия для всех четырех случаев. Данные показывают наличие приземной инверсии температуры и устойчиво стратифицированной атмосферы, что может противоречить факту наблюдаемого явления.

В большинстве случаев расчетные значения индексов неустойчивости не достигли пороговых значений, что приводит к выводу о необходимости адаптации пороговых коэффициентов для прогнозирования грозовых явлений в условиях высокоширотной Арктики. Авторы работ [19, 22] в своих исследованиях отмечают, что пороговые значения индексов неустойчивости для разных географических районов сильно отличаются и необходимо их уточнение для каждого конкретного региона. Вероятной

причиной несоответствия рассчитанных индексов пороговым значениям может являться то, что используемые индексы не отражают некоторые физические механизмы, способствующие развитию грозовой активности именно в условиях высокоширотной Арктики. Кроме того, в настоящем исследовании оценка индексов неустойчивости проводилась по данным утреннего радиозондирования (08:00 ч местного времени), а зафиксированные случаи гроз наблюдались в вечернее время (20:00 — 22:00 ч местного времени), т. е. с момента зондирования проходило в среднем 12 ч. Этого времени достаточно для развития локальной конвекции, однако с использованием данных только утреннего зондирования зафиксировать ее не представляется возможным. Тем не менее можно сделать предварительный вывод о том, что на рассматриваемой станции успешнее всего оказались индексы Бойдена VI и Cross Totals, которые в среднем отклоняются от пороговых значений на 2,2 единицы и 1,1 °С соответственно. Возможно, в дальнейшем в оперативной практике прогнозирования будет иметь смысл понизить пороговые значения для данных индексов, однако предварительно необходимо расширить количество исследуемых случаев.

Схожие барические поля описываются в полярный день при формировании гроз в Баренцевом море и в районе архипелага Шпицберген [21]. Авторы исследования выделяют на высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа влияние барического гребня с юго-востока (с центром над арх. Новая Земля) и барической ложбины с юго-запада (центр в районе Исландии). Также отмечено, что в полярный день формирование гроз в Арктике наиболее вероятно при перемещении воздушных масс с континентальной части на арктические острова, в полярную ночь ситуация меняется на обратную [21]. Такая взаимосвязь может объясняться тем, что летом суша обычно теплее поверхности океана, а зимой теплее акватория моря. При формировании гроз должны быть условия для адвекции относительно теплого и влажного воздуха, которая создает условия для неустойчивой стратификации атмосферы.

Полученные результаты подчеркивают важность дополнительного анализа атмосферных условий и доработки методов прогнозирования гроз в арктических регионах, учитывая их уникальные климатические и географические особенности. Описанные зафиксированные случаи грозовой активности представляют собой довольно ценную информацию, которая может быть использована для валидации данных реанализов, настройки региональных численных моделей, а также для дальнейшего изучения физических механизмов формирования гроз в высокоширотной Арктике.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Исследование синоптических условий в зоне действия НИС «Ледовая база Мыс Баранова» показало, что грозовая активность на архипелаге Северная Земля поддерживается сочетанием влияния барических ложбин с юго-запада и высотных гребней с юго-востока, формирующих воздушные потоки, переносящие теплые и влажные воздушные массы с материка.

2. Анализ аэрологических диаграмм выявил наличие приземной температурной инверсии, что предполагает устойчивость атмосферы и препятствует развитию вертикальных движений. Тем не менее возникновение грозовой активности в указанных условиях свидетельствует о том, что такие факторы, как рельеф местности и влияние теплых потоков, могут значительно изменять динамику ситуации.

3. Расчеты индексов неустойчивости, таких как индекс Бойдена, К-индекс и другие, в большинстве случаев не достигали пороговых значений, что указывает

на необходимость уточнения пороговых коэффициентов для прогнозирования грозовых явлений в условиях высокоширотной Арктики или поиска новых индикаторов грозовой активности в арктическом регионе.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИТР 5.1 Росгидромета на 2025–2029 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики»; регистрационный номер НИТР 125040704938-7.

Competing interests. The authors have no conflict of interest to declare.

Funding. The research was carried out within the framework of the scientific research and technology works 5.1 of Roshydromet for 2025–2029. “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of interaction of ice with natural objects and engineering structures for the Arctic”; STW registration number 125040704938-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технические технологии; 2022. 124 с.
2. Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылёв Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020;13(3):3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(3):3–19. (In Russ). <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
3. Saha J., Price C., Plotnik T., Guha A. Are thunderstorms linked to the rapid sea ice loss in the Arctic? *Atmospheric Research*. 2023;294:106988. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106988>
4. Holworth R.H., Brundell J.B., McCarthy M.P., Jacobson A.R., Rodger C.J., Anderson T.S. Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2021;48(7):e2020GL091366. <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>
5. Chen Y., Romps D.M., Seeley J.T., Veraverbeke S., Riley W.J., Mekonnen Z.A., Randerson J.T. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon. *Nature Climate Change*. 2021;11(5):404–410. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01011-y>
6. Kępski D., Kubicki M. Thunderstorm activity at high latitudes observed at manned WMO weather stations. *International Journal of Climatology*. 2022;42(15):1–23. <https://doi.org/10.1002/joc.7678>
7. Xu D., Ren B., Lu G., Huang H., Zheng J., Kou L. A rare elevated thunderstorm crossing over the North Pole associated with an Arctic warming event. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2025;42:1179–1194. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-4141-7>
8. Williams E.R. Lightning and climate: A review. *Atmospheric Research*. 2005;76(1–4):272–287. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.014>
9. Price C. Lightning applications in weather and climate research. *Surveys in Geophysics*. 2013;34:755–767. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9218-7>
10. Finney D.L., Doherty R.M., Wild O., Stevenson D.S., MacKenzie I.A., Blyth A.M. A projected decrease in lightning under climate change. *Nature Climate Change*. 2018;8(3):210–213. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0072-6>
11. Mills B., Unrau D., Pentelow L., Spring K. Assessment of lightning-related damage and disruption in Canada. *Natural Hazards*. 2010;52(2):481–499. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9391-2>
12. Boyden C. A simple instability index for use as a synoptic parameter. *Meteorol. Mag.* 1963;92:198–210.

13. George J.J. *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York, London: Academic Press; 1960. 684 p.
14. Miller R.C. *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Technical Report*. AWS, USAF, Scott AFB, IL; 1975.
15. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге. *Ученые записки Российской государственной гидрометеорологического университета*. 2015;40:150–159.
Kryukova S.V., Simakina T.E. Analysis of temperature inversions in St. Petersburg. *Ucheniye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2015;40:150–159. (In Russ.)
16. Данилова Н.Е., Кульгина Л.М., Семенова Ю.А., Закинян Р.Г. Исследование влияния параметров приземного слоя на развитие облачной конвекции. *Наука. Инновации. Технологии*. 2017;2:109–118.
Danilova N.E., Kulygina L.M., Semenova Yu.A., Zakinyan R.G. Study of the parameters atmospheric boundary layer in the development of cloud convection. *Nauka. Innovacii. Tekhnologii = Science. Innovations. Technologies*. 2017;2:109–118. (In Russ.)
17. Czernecki B., Taszarek M., Kolendowicz L., Szyga-Pluta K. Atmospheric conditions of thunderstorms in the European part of the Arctic derived from sounding and reanalysis data. *Atmospheric Research*. 2015;154:60–72. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.001>
18. Brown D.M., Kochtubajda B., Said R.K. A severe thunderstorm outbreak north of 70°N over the Canadian Arctic Islands with unusual lightning characteristics. *Atmosphere-Ocean*. 2020;58(4):231–242. <https://doi.org/10.1080/07055900.2020.1792405>
19. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро-радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири. *Метеорология и гидрология*. 2015;5:10–19.
Gorbatenko V.P., Krechetova S.Yu., Belikova M.Yu., Nechepurenko O.E. The comparison of atmospheric instability indices retrieved from the data of radio sounding and MODIS spectroradiometer on thunderstorm days over West Siberia. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015;40(5):289–295. <https://doi.org/10.3103/S1068373915050015>
20. Пopyкина А., Ilin N., Shatalina M., Price C., Sarafanov F., Terentev A., Kurkin A. Thunderstorms near the North Pole. *Atmosphere*. 2024;15(3):310. <https://doi.org/10.3390/atmos15030310>
21. Soroka J., Bania M. Burze w Hornsundzie (SW Spitsbergen). *Problemy Klimatologii Polarnej*. 2013;23:137–146. (In Polish).
22. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018;2(368):44–59.
Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Sevastyanov V.V. Instability indices and their thresholds for the forecast of thunderstorms over Siberia. *Hydrometeorological research and forecasts*. 2018;2(368):44–59. (In Russ.)