Астроклиматический мониторинг для установки TAIGA-100

© А.Л. Иванова,[1,2] И. Астапов,[3] А. Андреева,[2] В. Астахов,[2] П. Безъязыков,[4] Е. Бонвеч,[4]
А. Булан,[4] А. Блинов,[5] А. Бородин,[5] Н. Буднев,[2] П. Бусыгин,[2] Н. Волков,[6]
П. Волчугов,[4,2] Д. Воронин,[7] А. Гафаров,[2] А. Гармаш,[1,8] В. Гребенюк,[5,9] О. Гресь,[2]
Т. Гресь,[2] Е. Гресь,[2] А. Гринюк,[5] О. Гришин,[2] А. Дячок,[2] Д. Журов,[2]
А. Загородников,[2] В. Зиракашвили,[10] А.Д. Иванова,[2,11] М. Илюшин,[2] И. Кабанник,[1,8]
Н. Калмыков,[4] В. Киндин,[3] С. Кирюхин,[2] В. Кожин,[4] К. Компаниец,[3] Е. Коростелева,[4]
Е. Кравченко,[1,8] А. Крюков,[4] Л. Кузьмичев,[4] А. Кьявасса,[12] А. Лагутин,[6] Ю. Лемешев,[2]
Б. Лубсандоржиев,[7] Н. Лубсандоржиев,[4,2] А. Луканов,[7] С. Малахов,[2] Р. Миргазов,[2]
Р. Монхоев,[1,2] Е. Мордвин,[6] Э. Осипова,[4] Л. Паньков,[2] А. Пахоруков,[2] А. Петрухин,[3]
Д. Подгрудков,[4] В. Полещук,[2] Е. Попова,[4] Е. Постников,[4] В. Просин,[4] А. Пушнин,[2]
Р. Райкин,[6] А. Разумов,[4,2] А. Ревякин,[6] Г. Рубцов,[7] Е. Рябов,[2] В. Самолига,[2] В. Сверкунов,[2]
Л. Свешникова,[4] А. Сидоренков,[7] А. Силаев,[4] А. Силаев (мл.),[4] А. Скурихин,[4] А. Соколов,[1,8]
А. Сударчиков,[2] В. Таболенко,[2] А. Танаев,[2] М. Терновой,[2] Н. Ушаков,[7] Д. Чернов,[4]
А. Шайковский,[5] М. Шульга,[2] И. Яшин[3]

[1]Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
[2]Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
[3]Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
[4]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
119991 Москва, Россия
[5]Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия
[6]Алтайский государственный университет,
656049 Барнаул, Россия
[7]Институт ядерных исследований РАН,
117312 Москва, Россия
[8]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[9]Государственный университет „Дубна“,
141980 Дубна, Московская обл., Россия
[10]Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия
[11]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[12]Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN,
10125 Torino, Italy
e-mail: annaiv.86@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 12 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Представлено описание астроклиматической станции, созданной для мониторинга локальных климатических условий на перспективных локациях для размещения астрофизического комплекса TAIGA-100. Особое внимание уделено оценке доли безоблачных периодов по показаниям пирометров.

Ключевые слова: комплекс TAIGA-100, астроклимат, облачность, пирометр.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64048.308-26

Введение

Проект астрофизического комплекса TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади около $100\,\mathrm{km}^2$ [1,2] основан на успешном опыте, полученном при создании в Тункинской долине гамма-обсерватории TAIGA-1 [2] площадью $1\,\mathrm{km}^2$. В состав комплекса TAIGA-100 войдут атмосферные черенковские телескопы, детекторы флуоресцентного излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ), а также ~ 3500 суперстанций, включающих: широкоугольные черенковские детекторы с углом обзора $\sim 2\,\mathrm{sr}$, подземные водные

черенковские детекторы мюонов площадью $\sim 40\,\mathrm{m}^2$, сцинтилляционные детекторы и детекторы радиоизлучения ШАЛ.

Поиск оптимальной площадки для комплекса TAIGA-100 требует всесторонней оценки множества факторов, включая астроклиматические и топографические особенности местности и развитость инфраструктуры [3,4]. Наиболее эффективным подходом к выбору места для крупномасштабного проекта представляется комплексный анализ данных спутниковых систем, геологических карт, климатических моделей и натурных наблюдений. Такой подход обеспечит всестороннюю оценку каждой локации и позволит сделать обоснованные выводы о ее пригодности для размещения комплекса TAIGA-100.

По результатам анализа данных спутниковых систем, климатических моделей и геологических карт на текущем этапе выделены две перспективные площадки с разной высотой над уровнем моря: Боргойская степь в Республике Бурятия ($\sim 800\,\mathrm{m}$ a.s.l., 50.84° N., 105.81° E.) и Чуйская степь в Республике Алтай ($\sim 1800\,\mathrm{m}$ a.s.l., 49.89° N., 88.22° E.) [3,4].

Для исследования локальных астроклиматических условий сотрудниками Иркутского государственного университета была разработана специализированная астроклиматическая станция, оборудованная метеорологическими и астрофизическими инструментами. Поэтапное развертывание первой станции началось на территории действующего комплекса TAIGA-1 в декабре 2024 г. Вторая аналогичная станция была установлена в Боргойской степи в сентябре 2025 г. Станции обеспечивают непрерывный мониторинг астроклимата в режиме реального времени. Предполагается установка подобных станций на всех перспективных площадках.

1. Астроклиматическая станция

Астроклиматическая станция представляет собой автоматизированный комплекс для непрерывного мониторинга параметров окружающей среды. Оснащение станции состоит из модуля измерения оптических свойств атмосферы, модуля метеонаблюдений и термометрической косы. Модуль измерения оптических свойств атмосферы содержит вертикальную камеру G3M178MC с объективом COMPUTAR EG3Z3915FCS-MPWIR-31, камеру бокового вида, два пирометра MLX90614ESFBAA и предназначен в первую очередь для оценки доли безоблачных событий. Модуль метеонаблюдений включает Small weather station CWT-UWD-SDTHR и барометрический датчик bme280, которые обеспечивают мониторинг температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности, силы и направления ветра. В ближайшее время предполагается дополнить метеостанцию датчиком UICPAL Rain and Snow Sensor Relay для получения данных о наличии и интенсивности осадков. Термометрическая коса обеспечивает мониторинг температуры грунта и представляет собой систему датчиков DS18B20, размещенных на глубине $0-3\,\mathrm{m}$ с шагом 20 cm в Боргойской степи и 30 cm на территории TAIGA-1.

Дополнение астроклиматических станций черенковскими детекторами, сцинтилляционными счетчиками и радиоантеннами позволит выполнить сравнительную оценку условий для регистрации компонент широких атмосферных ливней и уровня шума в радиодиапазоне. Черенковский детектор проходит этап тестирования и калибровки. Он представляет собой оптическую станцию TAIGA-HiSCORE [2,5] с сокращенным до 2 количеством ФЭУ и конусов Винстона. Установка детектора в Боргойской степи запланирована на август 2026 г. Также станция будет укомплектована сцинтилляционными счетчиками, идентичными счетчикам установки TAIGA-Muon [6].

2. Использование пирометров для анализа облачности

Наличие систем регистрации черенковского и флуоресцентного излучения ШАЛ в составе TAIGA-100 [1] требует тщательного анализа доли безоблачных ночей и прозрачности атмосферы. Оценка облачности по данным пирометров базируется на разнице в излучательной способности чистого неба и облачного покрова [7,8]. Чистое небо имеет низкий уровень инфракрасного (ИК) излучения, близкий к „холодному“ излучению космоса, $\sim -50\,^\circ\mathrm{C} - -60\,^\circ\mathrm{C}$, облака излучают больше из-за более высокой температуры и большей излучательной способности (коэффициент излучения $\varepsilon \approx 0.8-0.95$ для водяных облаков).

Астроклиматическая станция укомплектована двумя пирометрами MLX90614ESFBAA производства фирмы Melexis, которые представляют собой ИК термометры бесконтактного типа. Пирометр MLX90614ESFBAA с помощью ИК-датчика измеряет яркостную температуру объекта (неба) и с учетом коэффициента излучения преобразует ее в реальную температуру объекта. Термодатчик, расположенный на плате внутри корпуса пирометра, отражает температуру окружающей среды вблизи устройства. Таким образом, пирометр позволяет фиксировать изменение температуры при появлении облаков в поле зрения. Основными техническими характеристиками являются: диапазон измерения температуры объекта — от $-70\,^\circ\mathrm{C}$ до $+380\,^\circ\mathrm{C}$, рабочая температура от $-40\,^\circ\mathrm{C}$ до $+85\,^\circ\mathrm{C}$, точность измерения от $\pm 0.5\,^\circ\mathrm{C}$ в диапазоне $0\,^\circ\mathrm{C}-50\,^\circ\mathrm{C}$ до $\pm 3\,^\circ\mathrm{C}$ при крайних значениях диапазона, разрешение $0.02\,^\circ\mathrm{C}$, угол обзора 90°°, спектральный диапазон $8-14\,\mu\mathrm{m}$, что соответствует „окну прозрачности“ атмосферы, в котором ИК-излучение распространяется с минимальным поглощением и рассеиванием. Запись данных ведется с интервалом 10 s.

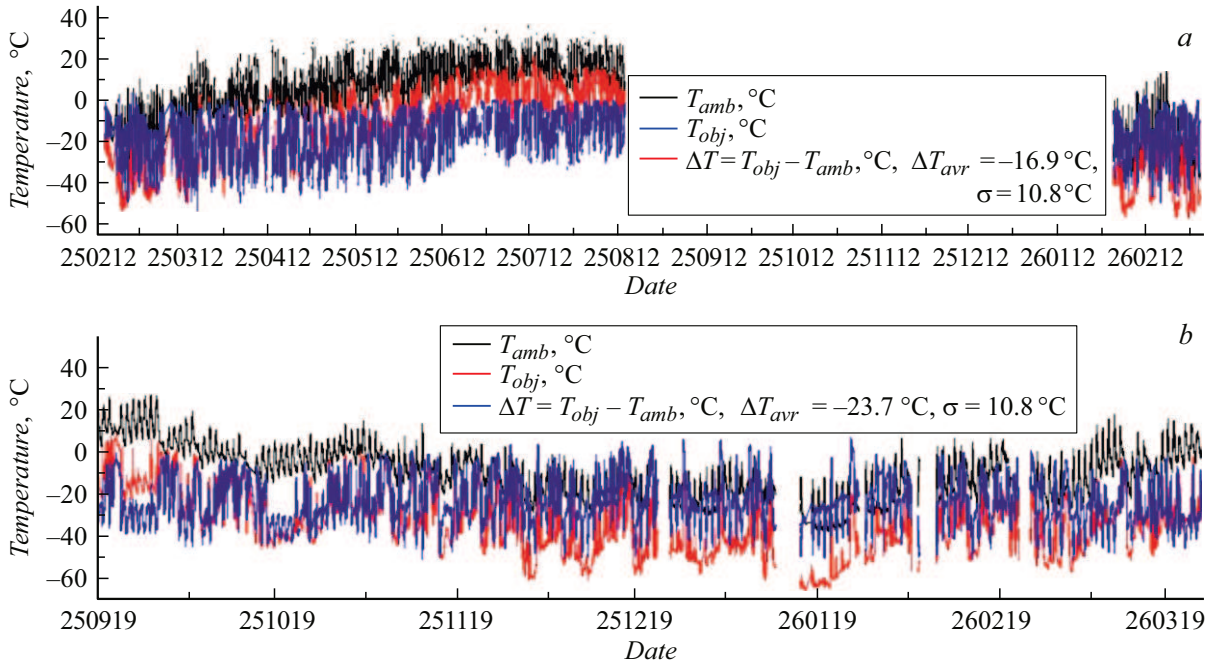


Рис. 1. Изменение данных пирометров с течением времени: *a* — на территории астрофизического комплекса TAIGA-1, *b* — в Боргойской степи.

Дополнительно в стадии разработки находится методика оценки облачности по данным планетарной камеры. Она основана на анализе снимков и сопоставлении выявленных на них объектов с данными каталога звезд Tycho2. Ключевой параметр — интегральное распределение по звездной величине, позволяющее судить об уровне облачности и прозрачности атмосферы.

3. Анализ данных пирометров

При использовании пирометров для оценки облачности в качестве ключевого анализируемого параметра выбрана разность температур $\Delta T = T_{obj} - T_{amb}$, где T_{obj} — температура неба, T_{amb} — температура воздуха на уровне наблюдений [8]. Такой подход позволяет исключить сезонные вариации температур, приводящие к разнице в температурах T_{obj} и T_{amb} между теплыми и холодными месяцами до 25 °C, и отражает суточные и погодные вариации. Для территории действующего комплекса TAIGA-1 среднее значение разности температур составило $\Delta T_{avr} = -16.9\,^{\circ}\mathrm{C}$, $\sigma = 10.8\,^{\circ}\mathrm{C}$ (рис. 1, *a*), для Боргойской степи — $\Delta T_{avr} = -23.7\,^{\circ}\mathrm{C}$, $\sigma = 10.8\,^{\circ}\mathrm{C}$ (рис. 1, *b*).

Распределение событий в зависимости от ΔT для обеих площадок представлено на рис. 2. Для снижения влияния краткосрочных колебаний температуры при его построении были использованы данные пирометров, усредненные по 10-минутным временным интервалам. Многопиковая форма распределения обусловлена различными состояниями неба, типами облачности, переходными процессами и суточными колебаниями температуры. Пик в районе 0 °C, наблюдаемый в данных для территории TAIGA-1, предположительно связан с туманами. Сгруппированные в нем события наиболее вероятно наблюдаются в утренний период.

Для оценки скорости изменения разности температур было выполнено дифференцирование пирометрических данных (рис. 3, *a*). Среднее значение скорости изменения температуры в Боргойской степи составило $\langle \frac{d(\Delta T)}{dt} \rangle = -1.3 \cdot 10^{-5}\,^{\circ}\mathrm{C/min}$ при $\sigma = 0.16\,^{\circ}\mathrm{C/min}$, в Тункинской долине — $\langle \frac{d(\Delta T)}{dt} \rangle = 5.2 \cdot 10^{-4}\,^{\circ}\mathrm{C/min}$ при $\sigma = 0.16\,^{\circ}\mathrm{C/min}$. Дифференцирование позволило выявить в данных переходные периоды с быстрым изменением температуры и отобрать для дальнейшего анализа временные интервалы с относительно постоянной температурой ($\left|\frac{d(\Delta T)}{dt}\right| < \sigma$). Оценка суточных колебаний ΔT показала, что наиболее стабильным периодом для Боргойской степи является промежуток с 22 вечера до 8 утра местного времени (рис. 3, *b*). Значение ΔT колеблется от $\approx -30\,^{\circ}\mathrm{C}$ днем до $\approx -20\,^{\circ}\mathrm{C}$ ночью. При этом температура неба в дневное и ночное время различается в пределах 4 °C. Для того чтобы выявить поведение ΔT в разное время суток, пирометрические данные были разбиты на 3 группы: 1) данные, набранные с 11:00 до 17:00 местного времени, 2) наблюдения с 00:00 до 06:00 местного времени, 3) оставшиеся данные, охватывающие утренний и вечерний периоды. Для Боргойской степи распределение событий по ΔT в каждой группе имеет двухпиковую форму (рис. 4, *a*). Разумно предположить, что первый пик соответствует ясной атмосфере, второй — облачности. Положение

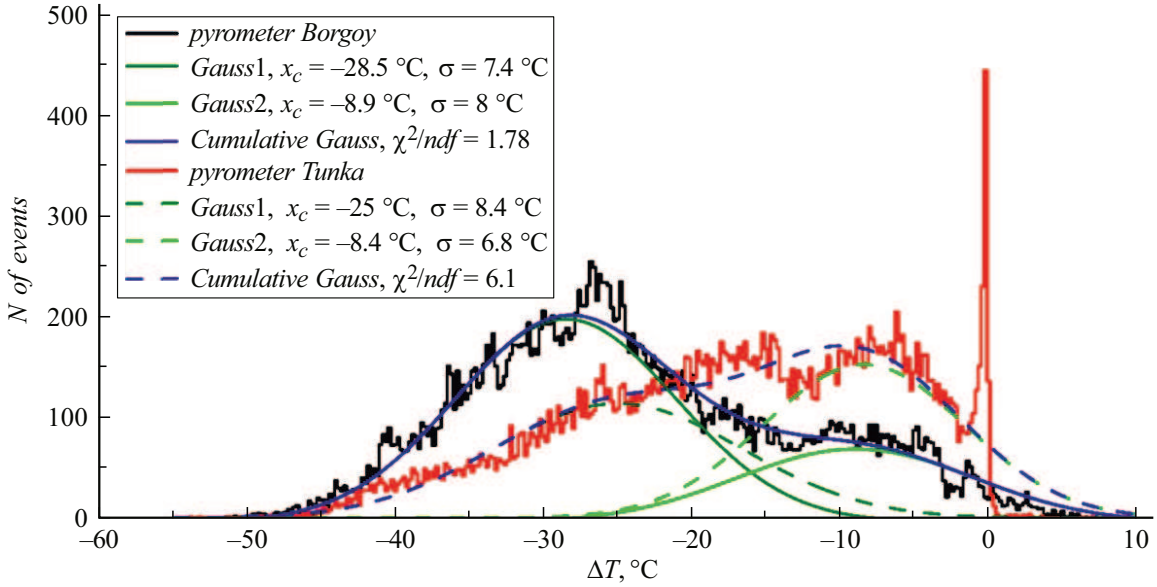


Рис. 2. Распределение событий в зависимости от ΔT (красная линия — на территории действующего комплекса TAIGA-1, черная — в Боргойской степи).

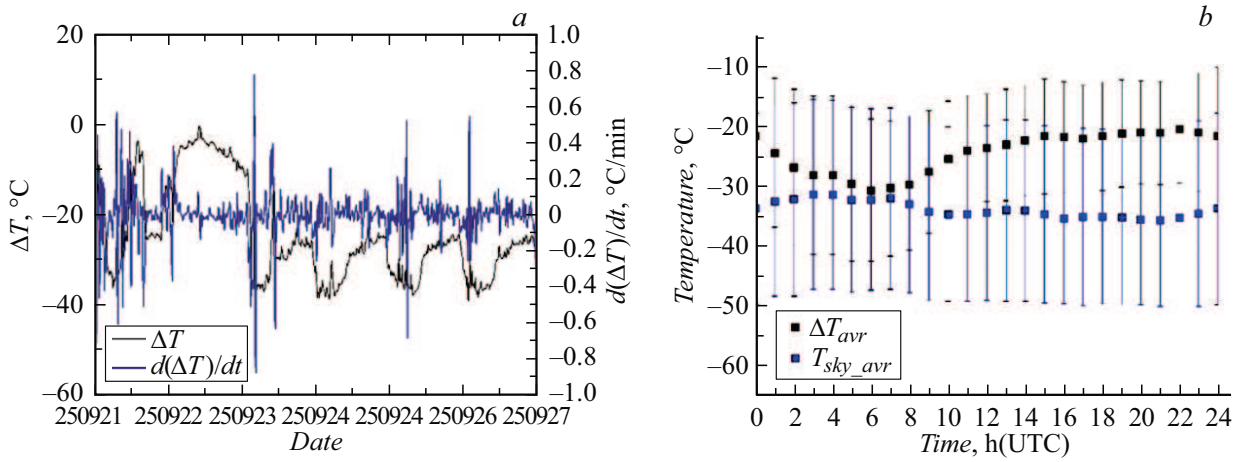


Рис. 3. Данные Боргойской степи: *a* — результат дифференцирования показаний пирометров (синяя линия, соответствует правой оси ординат) в сравнении с ΔT (черная линия, соответствует левой оси ординат), *b* — суточные колебания температуры неба (синие квадраты) и разности температур (черные квадраты).

пика, предположительно соответствующего облачному небу, колеблется от $-11.8\,^{\circ}$C для дневного периода до $-8.5\,^{\circ}$C для ночного. Пик, наиболее вероятно отвечающий чистому небу, меняет свое положение с $-36.0\,^{\circ}$C днем до $-25.7\,^{\circ}$C ночью. Такое поведение связано с тем, что днем под воздействием солнечного света воздух на уровне наблюдения прогревается значительно сильнее, чем на большой высоте, и разность между показаниями термодатчика в корпусе пирометра и ИК-датчика увеличивается.

Установки на основе черенковских и флуоресцентных детекторов ведут набор данных только в ясные безлунные ночи, поэтому в первую очередь вызывает интерес состояние атмосферы в ночной период. Распределение событий по ΔT во временном окне наблюдений с 00:00 ночи до 06:00 утра описывается комбинацией двух гауссианов $x_{c1} = -25.7\,^{\circ}$C, $\sigma_1 = 4.6\,^{\circ}$C, $x_{c2} = -8.5\,^{\circ}$C, $\sigma_2 = 4.9\,^{\circ}$C. Качество аппроксимации составляет $\chi^2/ndf = 2.2$. Если площадь под гауссианами интерпретировать как долю событий, „сгруппированных“ вокруг соответствующих состояний атмосферы, то отношение ясных/облачных периодов в ночное время для Боргойской степи составляет 77 %/23 %. Аналогичная картина наблюдается и в распределении событий по температуре неба (рис. 4, *b*). Напомним, что по результатам анализа спутниковых данных за 5 лет наблюдений для Боргойской степи доля безоблачных событий в ночное время составила 68 %–71 %, процент

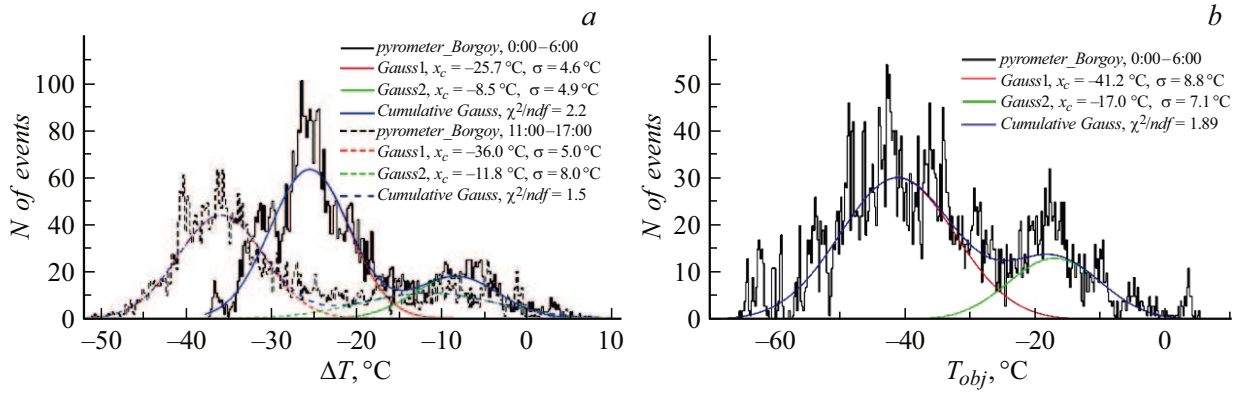


Рис. 4. Распределение пирометрических данных в Боргойской степи: *a* — в зависимости от разности температур в двух группах событий (пунктирная линия — день 11:00–17:00, сплошная линия — ночь 0:00–06:00), *b* — в ночное время в зависимости от температуры неба.

событий с учетом периодов легкой облачности (верхние перистые облака) — 74 %–76 % [3,4]. Различия в оценке облачности по данным спутниковых наблюдений и пирометров могут быть связаны с погрешностями обеих методик, в том числе с влиянием на показания пирометров поглощения и рассеяния ИК-излучения в атмосфере, отличия реального коэффициента теплового излучения облачного покрова от установленного в пирометре, нестабильности атмосферы и особенностей облачного покрова. Например, состоящие из кристаллов льда высотные перистые облака за счет низкой температуры и плотности дают такой слабый ИК-сигнал, что пирометр может их „не увидеть“.

Заключение

Анализ облачности по данным пирометров — экономичный и в целом эффективный метод для количественного мониторинга безоблачных событий, особенно в условиях круглосуточной работы и автоматизации. Однако данный метод имеет определенные ограничения, связанные с особенностями детектирования ИК-излучения (подверженность влиянию атмосферных эффектов, сложности в детектировании перистых облаков верхнего яруса, погрешности измерений, обусловленные вариацией коэффициента теплового излучения облачного покрова и его отличием от установленного в пирометре). В ближайшее время планируется доработка методики оценки облачности по снимкам широкоугольной камеры и совместное применение обоих методов. Такой комплексный подход позволит выполнить взаимную калибровку измерительных систем, независимую верификацию получаемых данных и более точную оценку оптических свойств атмосферы.

Финансирование работы

Исследование поддержано Российским научным фондом (проекты 23-72-00016 (раздел „Астроклиматическая станция“), 23-72-00054 (раздел „Анализ данных пирометров“)) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2024-0005, 2026-0006, FWGM-2025-0059).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] L.A. Kuzmichev. Phys. Particles Nuclei, **56**, 297 (2025). DOI: 10.1134/S1063779624701557

[2] N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeekov, E.A. Bonvech, A. Blinov, A.N. Borodin, A.V. Bulan, P.V. Busygin, D.V. Chernov, A. Chiavassa, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, E.O. Gress, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, M.A. Iliushin, I.A. Kabannik, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryukhin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, L.A. Kuzmichev, A.A. Lagutin, M.V. Lavrova, Yu.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, S.D. Malakhov, R.R. Mirgazov, R.D. Monkhoev, E.A. Okuneva, E.A. Osipova, A.L. Pakhorukov, L.V. Pankov, A. Pan, A.D. Panov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, V.A. Poleschuk, E.G. Popova, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, A.V. Razumov, G.I. Rubtsov, E.V. Ryabov, V.S. Samoliga, I. Satyshev, A.A. Silaev, A.A. Silaev (junior), A.Yu. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, L.G. Sveshnikova, A. Shaikovsky, M.V. Shulga, V.A. Tabolenko, M.Yu. Ternovoy, N.A. Ushakov, P.A. Volchugov, N.V. Volkov, D.M. Voronin, V. Zirakashvili, A.V. Zagorodnikov, D.P. Zhurov, I.I. Yashin. Phys. Atom. Nuclei, **88** (2), 232 (2025). DOI: 10.1134/S106377882570036X

[3] A.L. Ivanova, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeekov, E.A. Bonvech, A. Blinov, A.N. Borodin, N.M. Budnev, A.V. Bulan, P.V. Busygin, D.V. Chernov, A. Chiavassa, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, E.O. Gress, O.A. Gress, T.I. Gres, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.D. Ivanova, M.A. Iliushin, I.A. Kabannik, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryukhin, V.A. Kozhin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, L.A. Kuzmichev, A.A. Lagutin, Yu.E. Lemeshev, M.N. Lopatin, B.K. Lubsandorzhiev, N.B. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, S.D. Malakhov, R.R. Mirgazov, R.D. Monkhoev, E.Y. Mordvin, E.A. Okuneva, E.A. Osipova, A. Pan, A.D. Panov, L.V. Pankov, A.L. Pakhorukov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, I. Poddubnyi, E.G. Popova, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, A.A. Pushnin, V.A. Poleshchuk, R.I. Raikin, A.Yu. Razumov, A.I. Revyakin, G.I. Rubtsov, E.V. Ryabov, I. Satyshev, V.S. Samoliga, L.G. Sveshnikova, A.Yu. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev, Jr., A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, A.V. Shaikovsky, M.V. Shulga, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, M.Yu. Ternovoy, N.A. Ushakov, N.V. Volkov, P.A. Volchugov, D.M. Voronin, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, V. Zirakashvili, I.I. Yashin. Phys. Atom. Nuclei, **88**, 1131 (2025). DOI: 10.1134/S1063778825602033

[4] A.L. Ivanova, M.N. Lopatin, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeekov, E.A. Bonvech, A.V. Blinov, A.N. Borodin, N.M. Budnev, A.V. Bulan, P.V. Busygin, N.V. Volkov, P.A. Volchugov, D.M. Voronin, A.R. Gafarov, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, T.I. Gress, E.O. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.N. Dyachok, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, V.N. Zirakashvili, A.D. Ivanova, M.A. Iliushin, I.A. Kabannik, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryuhin, V.A. Kozhin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, L.A. Kuzmichev, A. Chiavassa, M.V. Lavrova, A.A. Lagutin, Yu.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhiev, N.B. Lubsandorzhiev, A.D. Lukanov, S.D. Malakhov, R.R. Mirgazov, R.D. Monkhoev, E.A. Okuneva, E.A. Osipova, A. Pan, A.D. Panov, L.V. Pankov, A.L. Pakhorukov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, I.A. Poddubny, V.A. Poleschuk, E.G. Popova, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, A.V. Razumov, G.I. Rubtsov, E.V. Ryabov, I. Satyshev, V.S. Samoliga, L.G. Sveshnikova, A.Yu. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, M.Yu. Ternovoy, L.G. Tkachev, N.A. Ushakov, D.V. Chernov, A.V. Shaikovsky, M.V. Shulga, I.I. Yashin. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **89** (6), 884 (2025). DOI: 10.1134/S1062873825711651

[5] N.M. Budnev, N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, E. Bonvech, A. Borodin, A. Bulan, A. Chiavassa, D. Chernov, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, E. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Komponiets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Panasenko, L. Pankov, A.D. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubny, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Silaev, A. Silaev Junior, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashchansky, M.Y. Ternovoy, L. Tkachev, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, A. Zhaglova, D. Zhurov, I. Yashin. Nucl. Instrum. Meth. A, **1039**, 167047 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047

[6] R.D. Monkhoev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, V. Chernykh, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Igoshin, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popesku, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, B. Sabirov, A. Silaev, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, V. Slunecka, A. Sokolov, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, A. Tanaev, M. Ternovoy, N. Ushakov, K. Ustinov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. J. Phys. Conf. Ser., **1697** (1), 012026 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012026R

[7] *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений.* Т. I, Гл. 15. ВМО №8 (2023). ISBN 978-92-63-40008-6.

[8] А.В. Кочин. Метеорология и гидрология, **9**, 43–48 (2026). DOI: 10.52002/0130-2906-2026-9-43-48