

Российский сегмент Глобальной сети наблюдения за аэрозолями, облаками и осадками (GAONet) в г. Томске

А.В. Крючков¹, В.В. Филатов¹, А.И. Елизаров¹, А.В. Шалеев¹,
Д.В. Кокарев¹, А.М. Морозов¹, В.А. Шишко¹, Х. Zhu³, Н.В. Кустова¹,
А.В. Коношонкин^{1,2}, Z. Wang³, Y. Wang³, D. Liu³, М.В. Тригуб¹

¹ Институт оптики атмосферы СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зюева, 1

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, Россия, пр. Ленина, 36

³ Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China
kaw@iao.ru, fvv@iao.ru, alex@iao.ru, sav@iao.ru, kdv_02@iao.ru, moroz@iao.ru, sva@iao.ru,
xhzhu98@mail.ustc.edu.cn, kustova@iao.ru, sasha_tvo@iao.ru, zzwang@aiofm.ac.cn, wyj@aiofm.ac.cn,
dliu@aiofm.cas.cn, trigub@iao.ru

Для проведения глобального исследования атмосферных явлений важно проводить наблюдения в различных регионах мира. Для этого необходимо развивать глобальные сети наблюдений [1–3]. Сеть GAONet является примером развития глобальной инфраструктуры для исследования изменения климата и окружающей среды. Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева стал частью сети GAONet и активно развивает пункт атмосферных наблюдений в г. Томске. В данной статье показаны первые экспериментальные результаты.

Ключевые слова: атмосферные явления, климат, атмосферный профилометр, оптический монитор доли облачности, оптический монитор осадков; atmospheric phenomena, climate, atmospheric profiler, optical cloud fraction monitor, optical precipitation monitor.

Введение

Научно-техническое оборудование российского сегмента международной сети GAONet в г. Томске состоит из комплекса приборов, направленных на изучение атмосферных процессов, включая непрерывные наблюдения, в частности, профилей облачности, облачных фракций и осадков. Монтаж комплекса приборов на постоянной площадке Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева был выполнен летом



Рис. 1. Комплекс приборов российского сегмента международной сети GAONet в г. Томске

2024 года (рис. 1). Данное оборудование было разработано Ключевой лабораторией атмосферной оптики Аньхойского института оптики и точной механики (Хефэй, Китай) в рамках совместного исследователь-

ского проекта при поддержке Альянса международных научных организаций «Один пояс, один путь» (ANSO). Проект объединил организации-участники из трех стран: России, Беларуси и Китая международной сетью наблюдений за атмосферой ANSO, целью которого является создание автоматической сети станций для наблюдения за аэрозолем, облаками и осадками для задач исследования окружающей среды и изменения климата.

Сеть наблюдений за атмосферой ANSO является частью GAONet — Глобальной сети наблюдений за аэрозолями, облаками и осадками, о запуске которой было объявлено во время первого ежегодного заседания Общества дистанционного зондирования атмосферы и окружающей среды (AERSS) в 2023 году [4]. На основе существующих наблюдательных площадок, GAONet должна расширить область своих наблюдений на Южную Америку и острова Индийского океана.

Состав комплекса приборов

Входящий в состав комплекса **Атмосферный и облачный профилометр GBQ L-01** (Atmosphere and Clouds Profiler) предназначен для определения высоты нижней и верхней границы облачности и атмосферного аэрозоля. Позволяет вести непрерывные мониторинг одного из ключевых параметров атмосферы — облачного покрова.

Профилометр (лидар), по паспортным данным, позволяет получать данные о нижней границе облачности с пространственным разрешением по высоте 7,5 м и временном разрешении 5–300 с на высотах до 12 км и состоит из лазера, оптического блока, платы блока управления, платы высокоскоростного сбора сигналов, промышленной материнской платы и коммуникационного модуля. Аэрозольный лидар GBQ L-01 использует высокочастотный импульсный лазер, излучающий линейно поляризованный свет с длиной волны 1064 нм. Оптический блок состоит из передатчика и приемника. Оптический передающий блок излучает лазерные световые импульсы, которые расширяются перед тем, как попасть в атмосферу. Оптический приемный блок состоит из телескопа, который фокусирует рассеянный назад свет на оптический детектор, который, в свою очередь, подключен к усилительному блоку, р- и s- составляющие рассеянного назад света разделены поляризационной призмой в приемном канале. Система сбора данных выполнена на встроенном промышленном компьютере, на котором выполняется программное обеспечение для управления лидаром и сбора данных.

Сигналы, которые отражаются обратно после взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, несут информацию о составе атмосферы. Для извлечения этой информации используются соответствующие обратные методы, позволяющие на основе измеренных отраженных сигналов восстановить характеристики атмосферных компонентов, такие как их концентрация, распределение по высоте и оптические свойства.

Данные регистрируемые лидаром GBQ L-01 на различных высотах и расстояниях, указывают на характеристики рассеяния аэрозольных частиц, присутствующих на этих конкретных высотах или расстояниях. Решая уравнения рассеяния лидара, возможно определить коэффициенты поглощения атмосферного аэрозоля и облачных частиц на соответствующих высотах или расстояниях.

Так как лидарный импульс линейно поляризован, обратно рассеянный свет от сферических частиц сохраняет поляризационные характеристики излучаемого излучения. Однако свет, рассеянный в обратном направлении несферическими частицами, становится деполаризованным. Анализ сигналов по высотам с учетом поляризационных составляющих обратно рассеянного света, зарегистрированных лидаром, позволяет получить вертикальный профиль деполаризационного отношения атмосферных аэрозольных частиц и облаков. Кроме того, величина деполаризационного отношения отражает их несферическую природу. Для обеспечения точности и согласованности данных наземных лидарных измерений важно создать и использовать эффективную систему контроля качества лидаров. Эта система состоит из двух основных частей: заводского контроля качества и контроля качества эксплуатации и технического обслуживания. Заводской контроль качества включает в себя калибровку системы и тестирование всех показателей. Контроль качества при эксплуатации и техническом обслуживании включает в себя измерение характеристик и калибровку при техническом обслуживании. Основные контрольные проверки при эксплуатации включают в себя оценку фонового сигнала, мощности излучателя, и коррекция геометрической схемы лидара.

Получаемые лидаром GBQ L-01 данные будут аккумулироваться Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и использоваться в научных задачах Института.

Одним из важных климатообразующих параметров атмосферы является облачность. Наблюдение за облачностью и измерение ее параметров критически важны для широкого круга научных и прикладных задач. Эти данные необходимы для точного прогнозирования солнечной радиации и оценки эффективности солнечных электростанций, обеспечения безопасности в авиации и навигации, а также для метеорологических и климатических исследований [5–7].

Методы дистанционного зондирования облаков традиционно делятся на спутниковые и наземные [8–11]. Хотя спутниковые системы предоставляют глобальное покрытие, они часто ограничены в пространственном и временном разрешении. Например, геостационарные спутники делают снимки с разрешением в несколько квадратных километров, а полярные спутники — всего 1–2 раза в день. В отличие от этого, наземные системы позволяют получать данные с высоким пространственно-временным разрешением, что крайне важно для анализа локальных изменений облачности. Более того, наземные устройства экономически выгоднее спутниковых систем, что делает их предпочтительным выбором для многих задач [12–16].

Традиционно ключевые параметры облаков — тип, высота и степень покрытия определялись визуально, квалифицированными операторами. Однако этот метод страдает от субъективности и ошибок, особенно при небольшой облачности. Для повышения точности и объективности в последние десятилетия разработаны различные системы наблюдения за облаками [17–19]. Эти устройства делятся на два основных типа по используемому оптическому диапазону: видимый и инфракрасный. Наиболее распространён видимый диапазон (450–650 нм), так как он позволяет эффективно распознавать структурные особенности облаков. Кроме этого, цифровые регистраторы изображений видимого диапазона, как и оптические системы, являются более дешевыми, чем средства, предназначенные для работы в ИК-диапазоне.

Конструкция этих устройств может варьироваться: некоторые используют сферическое зеркало для отражения изображения неба на камеру, направленную вниз, тогда как другие применяют широкоугольные объективы «рыбий глаз» с направленностью вверх и защитой от прямых солнечных лучей [20–22]. Современные модификации используют технологии расширенного динамического диапазона (HDR), что позволяет отказаться от солнцезащитных элементов и получать высококачественные снимки всего небосвода без потери деталей.

Одним из элементов комплекса, предназначенного для непрерывного наблюдения за облаками днем и ночью, является **система ASC300** (Cloud Fraction Monitor).

Система состоит из модуля управления сбора визуальных изображений облаков на всем небе, используемого также и для анализа и обработка собранных данных. Для регистрации изображений используются две камеры — камера для панорамного обзора неба с объективом типа рыбий глаз (разрешение формируемых изображений 5120×5120), и тепловизионной камеры (разрешение 640×512). Канал видимого диапазона (450–650 нм) предназначен для регистрации изображений преимущественно в дневное время. Тепловизионный канал (8–14 мкм) — модуль на основе микроболометрической матрицы и германиевой широкоугольной линзы. Результатом работы ASC300 является набор изображений представленных на рис. 2.

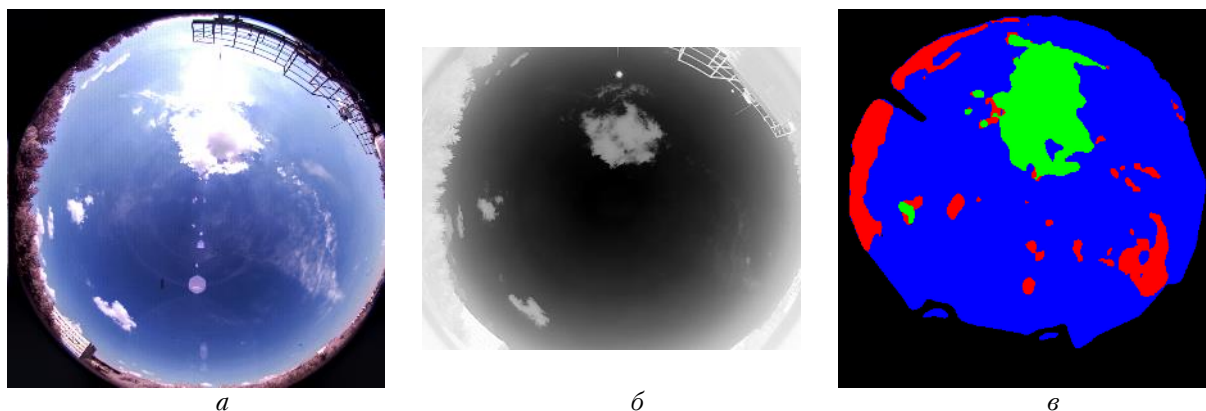


Рис. 2. Пример изображений, формируемых системой ASC300: *а* — изображение видимого диапазона; *б* — ИК-изображение; *в* — результат детектирования облачности

Тепловое излучение атмосферы и облаков регистрируется TIR-камерой в диапазоне 8–14 мкм. Поскольку облака имеют отличные от чистого неба тепловые характеристики, то это позволяет выделять их на фоне атмосферного излучения.

На рис. 3 представлены результаты совместных измерений, выполненных лидаром GBQ L-01 и системой ASC300 23 и 25 мая 2025 г. Лидарные профили демонстрируют наличие облачных слоёв на высотах от 1 до 6 км, а также отдельные аэрозольные неоднородности в приземном слое. Данные системы ASC300 подтверждают высокую степень облачности в указанные дни, что хорошо согласуется с лидарными наблюдениями. Особенно чётко это видно 25 мая, когда лидар фиксирует многослойную облачность, а изображения с камеры показывают сплошную или сильно затянутую облачность. Таким образом, наблюдается хорошее визуальное и количественное соответствие между данными лидара и наземной системы наблюдения за облаками.

В состав комплекса приборов также входит **оптический монитор осадков DSG2** (Laser Precipitation Monitor), который позволяет вести непрерывные круглогодичные измерения.

Монитор осадков предназначен для обнаружения и количественной оценки интенсивности и типа различных видов осадков: морось, дождь, снег, град, смешанные осадки. Для передачи измеренных данных используется либо интерфейс RS485/422 либо сетевой доступ посредством Ethernet. В качестве излучателя используется ИК лазер (785 нм). Диаметр измеряемых частиц от 0,16 до 8 мм, скорость падения частиц от 0,2 до 20 м/с, температура эксплуатации от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для предотвращения запотевания и обмерзания оптики используется подогрев. На рисунке 4 приведены суточные графики мониторинга осадков, построенные по данным оптического монитора DSG2 за 10 апреля 2024 г. и 24 мая 2025 г. Графики формируются в онлайн режиме, с помощью разработанного в Институте оптики атмосферы СО РАН скрипта, анализирующего «сырые» данные с осадкомера.

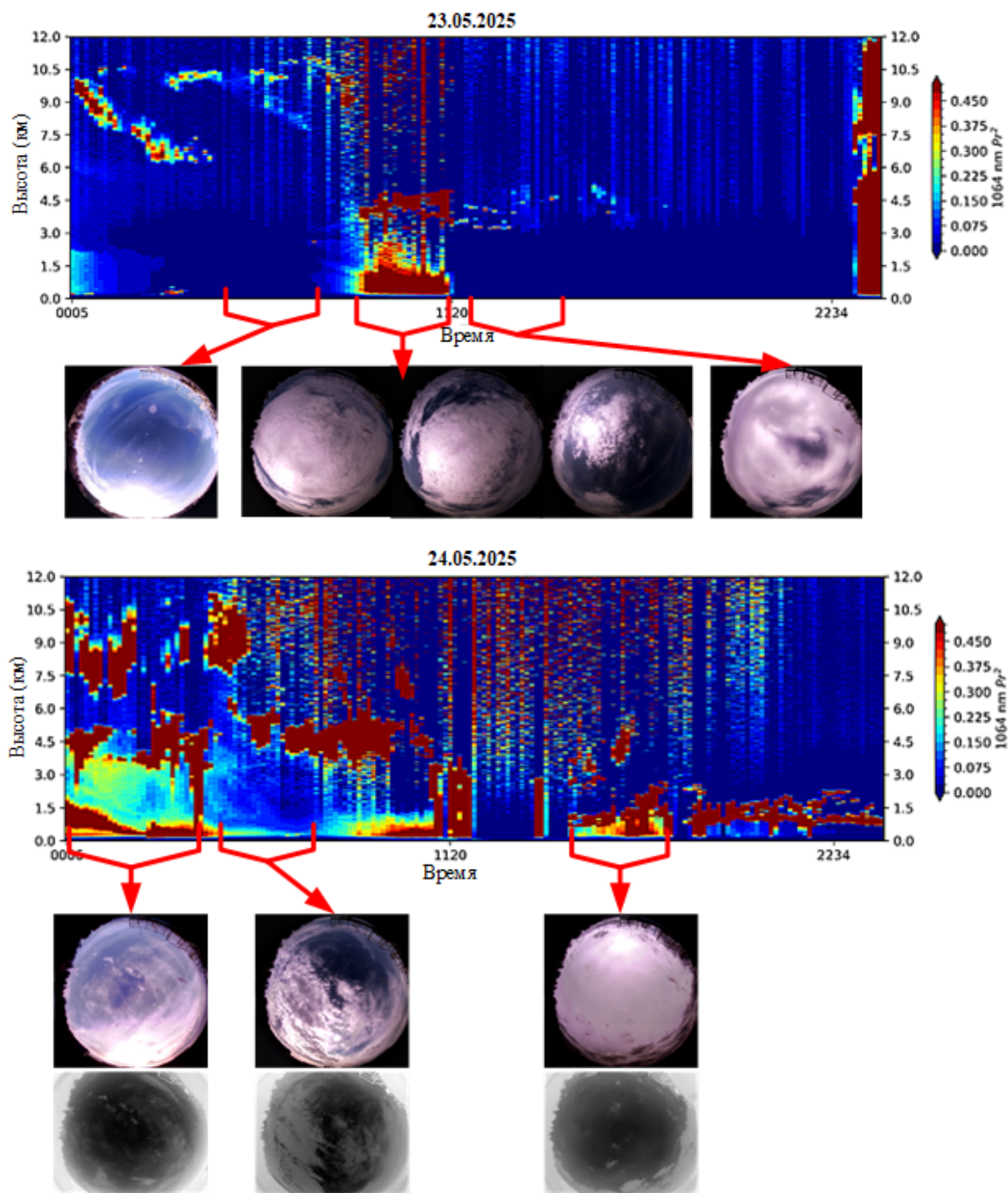


Рис. 3. Данные лидарного зондирования и соответствующее им состояние облачности по результатам регистрации системой за 23 и 25 мая 2025 г.

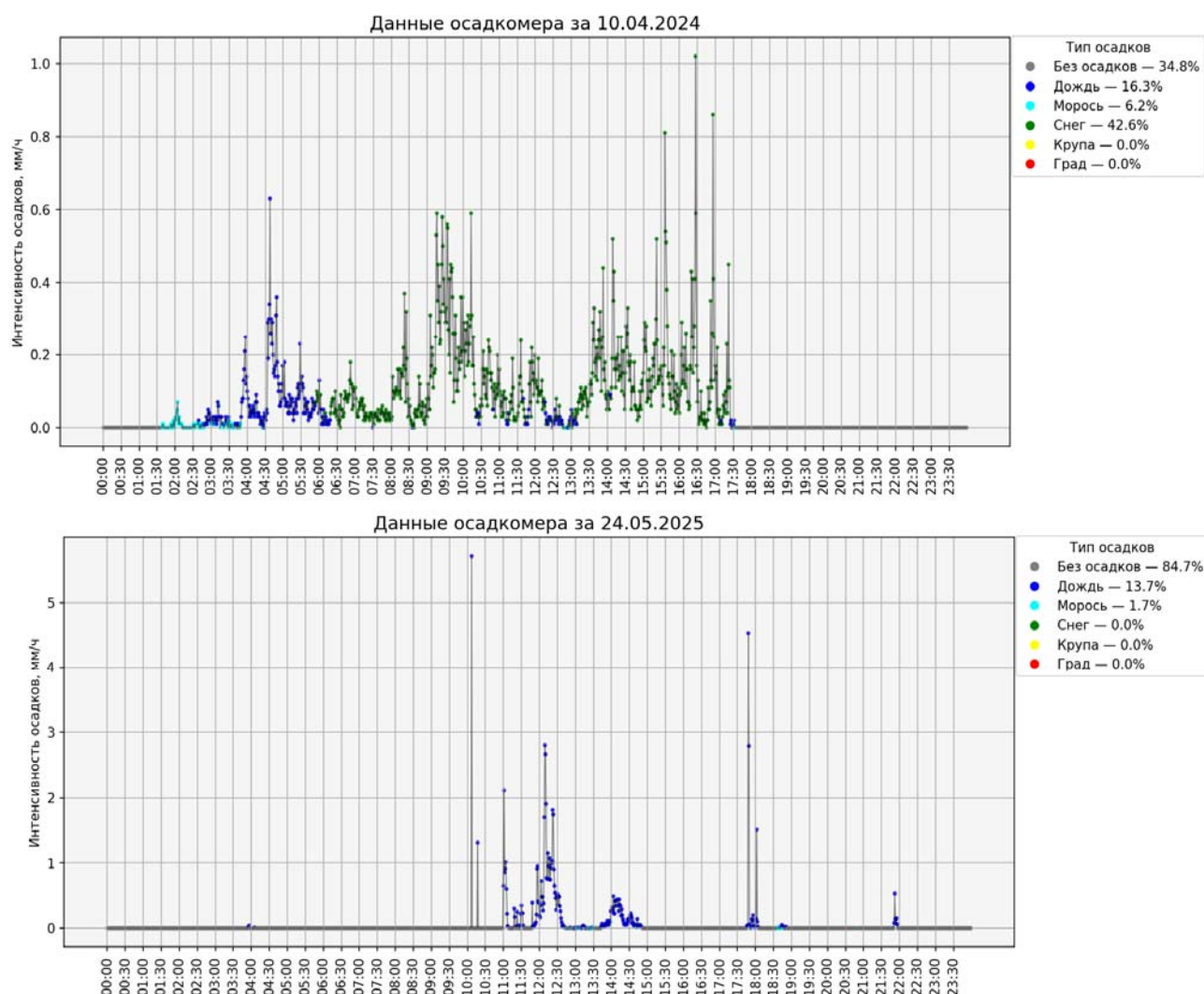


Рисунок 4 — Данные монитора осадков за 10 апреля 2024 г. и 24 мая 2025 г.

Графики отражают интенсивность осадков и их тип, определяемый по размеру и скорости падения частиц. Так, 10 апреля зафиксированы осадки в виде дождя и мокрого снега, что характерно для переходного весеннего периода. 24 мая наблюдается кратковременный ливневый дождь, интенсивность которого достигает 4 мм/ч. Полученные данные подтверждают способность прибора DSG2 к надёжной регистрации и классификации различных типов осадков в реальном времени.

Заключение

В рамках реализации российского сегмента международной сети GAONet в г. Томске установлен и запущен в эксплуатацию комплекс приборов для непрерывного мониторинга атмосферы. Установленный комплекс приборов, включающий лидар GBQ L-01, систему наблюдения за облачностью ASC300 и оптический монитор осадков DSG2, демонстрирует работоспособность и потенциал для проведения непрерывных, круглогодичных наблюдений ключевых параметров атмосферы.

Первые экспериментальные данные подтверждают возможность эффективного совместного использования лидарных измерений и наземных визуальных наблюдений для определения высоты нижней границы облачности, анализа вертикальной структуры аэрозольных слоёв и контроля динамики облачного покрова. Данные монитора осадков DSG2 позволяют достоверно регистрировать тип, интенсивность и временные характеристики различных видов осадков, что важно для метеорологических и климатических исследований.

В ходе эксплуатации оборудования выявлены технические и эксплуатационные аспекты, требующие доработки: недостаточная надёжность сетевой инфраструктуры, сложность доступа к оборудованию для обслуживания, отсутствие удобного пользовательского интерфейса и документации по настройке приборов. Эти факторы ограничивают оперативность диагностики и настройки системы в полевых условиях. Вместе с тем, полученный опыт позволяет сформулировать рекомендации по улучшению конструкции, интерфейсов и программного обеспечения для последующих этапов развёртывания станций сети GAONet.

Созданная наблюдательная платформа в Томске вносит вклад в развитие глобальной сети GAONet и служит основой для комплексных исследований атмосферных процессов, важных для задач климатического мониторинга, оценки солнечной радиации и экологического контроля. Планируется дальнейшее совершенствование системы сбора, передачи и визуализации данных, включая разработку единого веб-интерфейса для удаленного управления оборудованием и мониторинга его состояния в реальном времени.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *A European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology: EARLINET* [Электронный ресурс] <https://www.earlinet.eu/>, [web-сайт], режим доступа: свободный (дата обращения: 10.06.2025).
2. *The Latin America Lidar Network (LALINET a.k.a. ALINE)* [Электронный ресурс] <http://www.lalinet.org/>, [web-сайт], режим доступа: свободный (дата обращения: 10.06.2025).
3. *Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC)* [Электронный ресурс] <https://ndacc.larc.nasa.gov/>, [web-сайт], режим доступа: свободный (дата обращения: 10.06.2025).
4. Wang Z., Liu D., Wang Y. Research Progress of ANSO Atmospheric Observation Network and Initiative of the Global Aerosol-Cloud-Precipitation Observation Network (GAONet) Plan // AERSS Annual Meeting 2023, 16–19 September 2023, Wuhan, China. Conference Manual. P. 34.
5. Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Kur'yanovich K.V. and Mitrofanenko Ya.K. Parameters of different cloud types over the natural zones of Western Siberia according to MODIS satellite data // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. V. 33, N 5. P. 512–518. DOI: 10.1134/S1024856020050036.
6. Русскова Т.В., Скороходов А.В. Оценка применимости нейронной сети для восстановления оптической толщины и эффективного радиуса капель однослойной горизонтально неоднородной облачности // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, № 11. С. 930–938. DOI: 10.15372/AOO20241105.
7. Zhuravleva T.B. Simulation of brightness fields of solar radiation in the presence of optically anisotropic ice-crystal clouds: algorithm and test results // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34, N 2. P. 140–147. DOI: 10.1134/S1024856021020135.
8. Sato K., Okamoto H., Nishizawa T., Jin Y., Nakajima T.Y., Wang M., Satoh M., et al. JAXA Level 2 cloud and precipitation microphysics retrievals based on EarthCARE radar, lidar, and imager: the CPR_CLP, AC_CLP, and ACM_CLP products // Atmospheric Measurement Techniques. 2025. V. 18. P. 1325–1338. DOI: /10.5194/amt-18-1325-2025.
9. Matvienko G.G., Babushkin P.A., Bobrovnikov S.M., Borovoi A.G., Bochkovskii D.A., Galileiskii V.P., Grishin A.I., Dolgii S.I., Elizarov A.I., Kokarev D.V., Konoshonkin A.V., Kryuchkov A.V., Kustova N.V., Nevzorov A.V., Marichev V.N., Morozov A.M., Oshlakov V.K., Romanovskii O.A., Sukhanov A.Ya., Trifonov D.A., Yakovlev S.V., Sadovnikov S.A., Nevzorov A.A. and Kharchenko O.V. Laser and Optical Sounding of the Atmosphere // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. V. 33, N 1. P. 51–68. DOI: 10.1134/S102485602001008X.
10. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка» / Под. ред. А.С. Солонина. СПб.: Гидрометеондат, 2007. 246 с.
11. Разработка методов, алгоритмов и технологий построения автоматизированных систем сбора и обработки спутниковых данных [Электронный ресурс] <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=332>, [web-сайт] – режим доступа: свободный, (дата обращения 10.06.2025).
12. Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Borovoi A.G. and Novoselov M.M. Studies of the Orientation of Crystalline Particles in Ice Clouds by a Scanning Lidar // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35, N 5. P. 509–516. DOI: 10.1134/S1024856022050141.
13. Kustova N., Konoshonkin A., Kokhanenko G., Wang Z., Shishko V., Timofeev D., Borovoi A. Lidar backscatter simulation for angular scanning of cirrus clouds with quasi-horizontally oriented ice crystals // Optics Letters. 2022. V. 47, N 15. P. 3648–3651. DOI: 10.1364/OL.463282.
14. Trigub M.V., Gembukh P.I., Vasnev N.A., Shiyanov D.V. Laser monitor for simultaneous imaging in the VIS and Near-IR spectral regions // Atmospheric and Oceanic Optics. 2023. V. 36, N 4. P. 415–420. DOI: 10.1134/S1024856023040176.
15. Садовников С.А., Крайцова Н.С., Герасимова М.П., Аршинов М.Ю., Яковлев С.В. Лидарная система для измерения содержания углекислого газа в городских условиях // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38, № 5. С. 406–411. DOI: 10.15372/AOO20250511.
16. He Q., Li J., Zhao T., Zhang H., Meng L. Observing a dust aerosol layer at a height of 3–4 km above the ground on the southern margin of the Tarim Basin // Atmospheric Environment. 2024. V. 318. P. 120236. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120236.
17. Jee G., Ham Y.B., Choi Y., Kim E., Lee C., Kwon H., Trondsen T.S., Kim J.E., Kim J.H. Observations of the Aurora by Visible All-Sky Camera at Jang Bogo Station, Antarctica // J. Astron. Space Sci. 2021. V. 38, N 4. P. 203–215. DOI: 10.5140/JASS.2021.38.4.203.
18. Barentine J.C. Night sky brightness measurement, quality assessment and monitoring // Nature Astronomy. 2022. V. 6, N. 10. P. 1120–1132. DOI: 10.1038/s41550-022-01756-2.
19. Xie W., Wang Y., Xia Y., Gao Z., Liu D. Angular calibration of visible and infrared binocular All-sky-view cameras using sun positions // Remote Sensing. 2021. V. 13, N 13. P. 2455. DOI: 10.3390/rs13132455.
20. Кокарев Д.В., Галилейский В.П., Морозов А.М., Елизаров А.И. Устройство наблюдения оптического состояния неба в пределах видимой полусферы. Патент на полезную модель RU 191582 U1, 13.08.2019. Заявка № 2019107577 от 18.03.2019.
21. Long C.N., Slater D.W., Tooman T.P. Total sky imager model 880 status and testing results. – Richland, WA, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2001. 36 p. DOI: 10.2172/1020735.

22. *Dev S., Savoy F.M., Lee Y.H., Winkler S.* Design of low-cost, compact and weather-proof whole sky imagers for High-Dynamic-Range captures // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2015. P. 5359–5362. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7327046.

A.V. Kryuchkov, V.V. Filatov, A.I. Elizarov, A.V. Shaleev, D.V. Kokarev, A.M. Morozov, V.A. Shishko, X. Zhu, N.V. Kustova, A.V. Konoshonkin, Z. Wang, Y. Wang, D. Liu, M.V. Trigub. **Russian Observation Site of Global Aerosol-Cloud-Precipitation Observation Network (GAONet) in Tomsk.**

To conduct a global study of atmospheric phenomena, it is important to conduct observations in different regions of the world. To do this, it is necessary to develop global observation networks. The GAONet network is an example of the development of a global infrastructure for studying climate change and the environment. The V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics has become part of the GAONet network and is actively developing an atmospheric observation point in Tomsk. This article presents the first experimental results.