

Аэрозольное зондирование тропосферы и стратосферы с помощью лидарных и аэрологических технологий

Н.В. Балугин^{✉ 1}, В.Н. Маричев², В.А. Юшков¹,
Б.А. Фомин¹, Д.А. Бочковский^{2*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория
141707, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3
²Институт оптики атмосферы им. В.В. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 29.07.2023;
после доработки 09.10.2023;
принята к печати 10.10.2023

Лидарные методы активно используются для дистанционного зондирования атмосферы, однако их применение ограничено погодными условиями. Прямой метод измерений на базе аэрологического аэрозольного зонда обратного рассеяния (АЗОР) не имеет таких ограничений, а по физическим принципам работы эти методы близки. Всепогодная система мониторинга стратосферного аэрозоля может быть создана на основе совместного применения прямых и дистанционных методов наблюдений, но их согласованность следует подтвердить экспериментально. В работе представлены результаты лидарно-аэрологического эксперимента по зондированию атмосферы на высотах 7–50 и 0–30 км с помощью наземного лидара и АЗОР соответственно в г. Томске 15–16.03.2023 г. Измерялись вертикальные профили коэффициентов обратного рассеяния излучения от источников с близкими длинами волн: 532 (лидар наземного базирования) и 528 нм (АЗОР). Хорошее согласие результатов лидарных и баллонных измерений указывает на возможность использования АЗОР как мобильного средства для дополнения лидарных измерений в условиях облачности. Обсуждается одновременное применение технологий прямого и дистанционного зондирования атмосферы для повышения качества измерений в исследованиях аэрозольного состава атмосферы. Продемонстрирована возможность расширения лидарных наблюдений на двух длинах волн (355 и 532 нм) прямыми измерениями АЗОР с дополнительным набором длин волн (470, 528, 850, 940 нм).

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, температура атмосферы, лидар, аэрозольный зонд, многоволновое зондирование; stratospheric aerosol, atmospheric temperature, lidar, backscattersonde, multiwave sounding.

Введение

Актуальная проблема климатических изменений требует изучения динамики состава и свойств атмосферы, влияющих на ее радиационный баланс. Для этого регулярно проводятся измерения климатообразующих компонент и характеристик атмосферы и их последующий анализ. Прежде всего следует отметить наблюдения аэрозольной оптической толщи (АОТ) на сети AERONET, а также измерения АОТ со спутников. Данных о вертикальном распределении аэрозоля в атмосфере пока значительно меньше.

Существуют контактные и дистанционные методы и средства зондирования атмосферы различного базирования — наземные, аэрологические, самолетные, спутниковые и ракетные. Для развития

исследований атмосферного аэрозоля требуются также разработка и создание новых эффективных методов и экономичных технических средств. В настоящей работе рассмотрено исследование аэрозольной компоненты и термического режима стратосферы на основе комбинации дистанционного (лидарного) и контактного (аэрологического) оптического зондирования. Лидарные и аэрологические технологии аэрозольного зондирования тропосферы и стратосферы взаимно дополняют друг друга, обеспечивая всепогодность наблюдений и непрерывность рядов данных. Кроме того, согласованность результатов зондирования различными методами на близких длинах волн 528 и 532 нм позволяет в дальнейшем расширять наблюдения измерениями на других длинах волн, создавая основу для практического применения многоволновой теории в аэрозольном зондировании стратосферы. Прямые измерения температурного профиля атмосферы в ходе полета АЗОР в рамках совместного лидарно-баллонного эксперимента повышают точность учета вклада молекулярного рассеяния в лидарный сигнал и, как

* Николай Владимирович Балугин (horst2007@yandex.ru); Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Владимир Александрович Юшков (v_yushkov@mail.ru); Борис Алексеевич Фомин (b.fomin@mail.ru); Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru).

следствие, улучшают качество целевой информации об аэрозоле. Особенно это значимо для изучения аэрозоля в тропопаузе и выше, где его вклад в измеряемый сигнал зачастую на порядок меньше вклада молекулярного рассеяния.

Лидарный метод зондирования атмосферы обладает рядом достоинств, включая высокое пространственно-временное разрешение, возможность проведения длительных непрерывных измерений, оценку выбранной характеристики в произвольном направлении лазерного луча и на различных высотах и т.д. Однако имеются и ограничения [1–5]. Так, например, наличие облачности заметно снижает эффективность лидарных наблюдений. Возможности аэрологического зондирования с использованием бортовых приборов позволяют проводить прямые (*in situ*) измерения аэрозольного рассеяния в условиях облачности, поэтому хорошо дополняют дистанционные лидарные наблюдения. Существуют и другие преимущества использования комбинации лидаров и аэрологических зондов, их мы рассмотрим ниже.

Цель настоящей работы — определение согласованности данных лидарного зондирования атмосферы и результатов измерений аэрозольным зондом обратного рассеяния (АЗОР), возможности расширения диапазона длин волн оптического зондирования, а также повышение точности дистанционных наблюдений за счет увеличения достоверности данных о вертикальном распределении температуры атмосферы.

Материалы и методы

В нашей работе в качестве прямых измерений предлагается использовать аэрозольный зонд обратного рассеяния — АЗОР [6, 7]. Подъем зонда осуществляется на аэрологическом баллоне. АЗОР укомплектован навигационным модулем и телеметрическим передатчиком, что обеспечивает его автономность и мобильность. Следует отметить, что баллонная технология подготовки и выпуска такого зонда проста, экономична и не требует наличия сложной инфраструктуры для обеспечения зондирования. По своему принципу действия АЗОР подобен лидару и также измеряет сигнал суммарного обратного молекулярного и аэрозольного рассеяния. При этом он использует бортовой светодиодный источник света, а измерение обратного рассеяния света осуществляется из ближней зоны объемом $0,1 \text{ м}^3$, расположенной на расстоянии 1–5 м от излучателя. Зонд также укомплектован измерителем температуры атмосферы с точностью $\pm 1 \text{ К}$ на высотах 0–30 км. Пространственное положение зонда определяется бортовым навигационным модулем с погрешностью не хуже $\pm 2 \text{ м}$. По значениям температуры рассчитывается плотность атмосферы на определенной высоте по барометрической формуле Лапласа–Рюльмана.

Коэффициент обратного молекулярного рассеяния на длине волны излучателя легко вычисляется по данным о вертикальном распределении

плотности атмосферы в рамках априорной информации о наличии или отсутствии аэрозоля на высотах максимального подъема АЗОР (30 км). Подробное описание техники измерений зондом представлено в [6].

В описываемом ниже эксперименте используется лидар ИОА СО РАН, который измеряет температуру начиная с высот 5–7 км. Это может вносить некоторую погрешность в определение коэффициента молекулярного рассеяния при лидарных измерениях, так как вертикальный профиль температуры для расчета плотности атмосферы оказывается не полным. Так как зачастую вклад молекулярного рассеяния в измеряемый сигнал доминирует, то это может приводить к заметным погрешностям в определении коэффициента обратного аэрозольного рассеяния. Это обстоятельство также свидетельствует в пользу комбинации лидарных измерений и АЗОР, на котором, как указывалось выше, установлен датчик для измерения вертикального профиля температуры от поверхности земли до вершины траектории полета. Горизонтальное удаление зонда от точки зондирования лидара в стратосфере в нашем эксперименте составило не более 45 км для всех проведенных измерений. На рис. 1 (цв. вкладка) соответствующими цветами обозначены траектории полета зондов, дата и время начала выпуска (длительность выпуска не превышала 2 ч).

В базовой комплектации АЗОР применяются два источника излучения — на длинах волн 470 и 940 нм. Современная линейка применяемых в АЗОР светодиодных излучателей позволяет использовать другие длины волн — 528, 650, 850 нм. Существующая сеть AERONET [8] измеряет аэрозольную оптическую толщину на длинах волн 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 и 1029 нм. Данные о вертикальном распределении аэрозоля по измерениям АЗОР в спектральных диапазонах сети AERONET позволяют проводить комплексные наблюдения аэрозольного наполнения атмосферы.

Для получения информации о составе аэрозоля по измерениям АЗОР применяется так называемый цветовой индекс — отношение значений сигналов, соответствующих аэрозольному рассеянию, на двух длинах волн излучателя. При этом для характерных моделей аэрозолей цветовой индекс вычисляется заранее. Сравнение его теоретических значений с рассчитанными по данным АЗОР указывает на тип аэрозоля [9]. Эта информация используется для оценки воздействия аэрозоля на энергобаланс атмосферы [10], а также решения других задач. Заметим, что перспективы в развитии многоволнового лидарного зондирования атмосферы ограничиваются сложностью технических решений, сама же теория многоволнового зондирования аэрозоля подробно описана в [11].

Результаты и обсуждение

Совместный лидарно-аэрологический эксперимент был проведен 15–16.03.2023 г. в Томске (56° с.ш. , 85° в.д.) на базе Института оптики

атмосферы СО РАН. На лидарном комплексе института измерения проводились в интервале высот от 7 до 50 км, а зондом — от 0 до 30 км.

Для разных дат эксперимента были получены вертикальные профили безразмерной величины $R(\lambda, H)$ на длинах волн 355 и 532 нм (лидар) и 470, 528, 850, 940 нм (зонд). Физический смысл величины $R(\lambda, H)$ описывается формулой

$$R(\lambda, H) = \frac{\beta(\lambda, H)}{\beta_M(\lambda, H)} = \frac{\beta_M(\lambda, H) + \beta_A(\lambda, H)}{\beta_M(\lambda, H)} = 1 + \frac{\beta_A(\lambda, H)}{\beta_M(\lambda, H)},$$

где $\beta(\lambda, H)$, $\beta_M(\lambda, H)$, $\beta_A(\lambda, H)$ — коэффициенты общего, молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния света на длине волны λ на высоте H . Выполнение условий $R(\lambda, H) = 1$ означает отсутствие на данных высотах аэрозоля; значение $R(\lambda, H) > 1$ говорит о его наличии. Таким образом, по значению $R(\lambda, H)$ определяется величина аэрозольного рассеяния по отношению к молекулярному.

На рис. 2 (цв. вкладка) представлены значения $R(\lambda, H)$ для АЗОР и лидара. Время полета зонда составляет в среднем 2 ч, а время зондирования (накопления) лидара — в среднем 1 ч для каждой длины волны, поэтому зондирование начиналось одновременно с началом выпуска зонда. Как видно из полученных результатов, наблюдается согласие (по крайней мере на высотах 12–22 км) в полученных профилях $R(H)$ для близких длин волн (528 и 532 нм). Различия данных на высотах ниже 12 км могут быть объяснены наличием переменной облачности на высотах 5–8 км. Совокупность всех приведенных лидарных данных для $\lambda = 355$ и 532 нм и данных АЗОР для $\lambda = 470, 528, 850$ и 940 нм демонстрирует широкую изменчивость профилей $R(\lambda, H)$ в зависимости от длины волны и состояния атмосферы. Такой набор данных измерений на разных длинах волн может быть полезен в анализе изменчивости аэрозольного состава атмосферы.

Полученные вертикальные профили $R(\lambda, H)$ показывают умеренное аэрозольное наполнение, характерное для выбранной даты измерений при отсутствии вулканической активности. Наиболее ярко это проявляется на рис. 2 в данных зондирования на длине волны 940 нм, где молекулярное рассеяние относительно невелико.

Для обработки данных аэрозольного зондирования необходимо знать вертикальное распределение плотности атмосферы, которое рассчитывается по барометрическим формулам на основе результатов температурного зондирования. Были проанализированы вертикальные профили температуры атмосферы в районе проведения эксперимента, полученные разными способами: аэрологическое зондирование на ближайшей (210 км) станции в г. Новосибирске, спутниковые данные (AURA), датчик температуры в составе АЗОР, лидарные наблюдения в г. Томске (рис. 3, цв. вкладка). Как видно из этого рисунка, значения температуры

на соответствующих высотах в стратосфере (10–25 км), полученные лидаром и зондом, согласуются с точностью до нескольких градусов. В целом до высот 12–15 км использование результатов прямых измерений температуры АЗОР выглядит более предпочтительным, чем данных лидарного зондирования.

Заключение

Получено удовлетворительное согласие одновременных прямых (баллонных) и дистанционных (лидарных) измерений аэрозольного состава атмосферы, что указывает на возможность применения АЗОР как мобильного средства для дополнения лидарных наблюдений, проводимых в различных географических точках. Следует особо отметить экономичность аэрологической технологии, что позволяет использовать ее во всех регионах России, в том числе арктическом. Продемонстрирована возможность расширения лидарных наблюдений (на длинах волн 355 и 532 нм) прямыми измерениями АЗОР с дополнительным набором длин волн (470, 528, 850, 940 нм). Для расчетов вертикального распределения плотности атмосферы в диапазоне высот 10–25 км достаточно данных лидарного зондирования температуры, которые хорошо согласуются с результатами прямых зондовых измерений; на тропосферных высотах (ниже 12 км) результаты прямых измерений температуры более предпочтительны.

Финансирование. Модернизация инструментария исследований — лидарного комплекса — была проведена в рамках госзадания ИОА СО РАН, а экспериментальные исследования и получение данных — при поддержке РФФ (грант № 23-27-00057).

Список литературы

1. Hinkley E.D. Laser Monitoring the Atmosphere. New York: Springer, 1976. 380 p.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. Захаров В.А., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследования климата. Л.: Гидрометеиздат, 1996. 320 с.
4. Trickl T., Giehl H., Jager H., Vogelmann H. 35 yr of stratospheric aerosol measurements at Garmisch-Partenkirchen: From Fuego to Eyjafjallajökull, and beyond // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 5205–5225. DOI: 10.5194/acp-13-5205-2013.
5. Лидарный мониторинг облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. 450 с.
6. Балугин Н.В., Фомин Б.А., Юшков В.А. Оптический зонд обратного рассеяния для баллонных аэрологических измерений // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2022. Т. 58, № 3. С. 365–372. DOI: 10.31857/S0002351522030026.
7. Rosen J.M., Kjöme N.T. Backscattersonde: A new instrument for atmospheric aerosol research // Appl. Opt. 1991. V. 30, N 12. P. 1552–1561.

8. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A.W., Vermote E.F., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu I., Jankowiak I., Smirnov A.V. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
9. Маричев В.Н., Матвиенко Г.Н., Юшков В.А. Балугин Н.В., Бочковский Д.А. Лидарно-баллонный эксперимент по исследованию стратосферного аэрозоля для климатических наблюдений и диагностических задач // Метеорол. и гидрол. 2022. № 11. С. 41–45.
10. Балугин Н.В., Фомин Б.А., Лыков А.Д., Юшков В.А. Оценка воздействия стратосферного аэрозоля на радиационный баланс стратосферы по данным оптического баллонного зонда обратного рассеяния и радиационного моделирования // Метеорол. и гидрол. 2022. № 10. С. 121–128.
11. Наац И.Э. Теория многочастотного лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 157 с.

N.V. Balugin, V.N. Marichev, V.A. Yushkov, B.A. Fomin, D.A. Bochkovskiy. Aerosol sounding of the troposphere and stratosphere by lidar and aerological technologies.

Weather conditions are a natural limitation of the use of remote lidar sensing methods of the atmosphere, while the direct method based on an aerological aerosol backscattersonde has no such limitations, and these methods are close in physical principles of measurement. The creation of an all-weather stratospheric aerosol monitoring system can be based on the combination of direct and remote observation methods; however, their consistency should be experimentally confirmed. The results of a lidar-aerological experiment on atmospheric sounding at altitudes of 7–50 and 0–30 km using a ground-based lidar and an aerosol backscattersonde (AZOR), respectively, are presented. The experiment was conducted in Tomsk on March 15–16, 2023. Vertical profiles of backscattering coefficients of radiation from sources with close wavelengths were measured: ground-based 532 nm (in lidar) and balloon-based 528 nm (in AZOR). The obtained consistency of lidar and balloon measurements indicates the possibility of using AZOR as a mobile tool to complement lidar measurements in the case of clouds. The combination of direct and remote sensing of the atmosphere with the aim of improving the quality of measurements in studies of the aerosol composition of the atmosphere is discussed. The possibility of extending two wave (355 and 532 nm) lidar observations by direct measurements of AZOR with an additional set of wavelengths (470, 528, 850, and 940 nm) is shown.

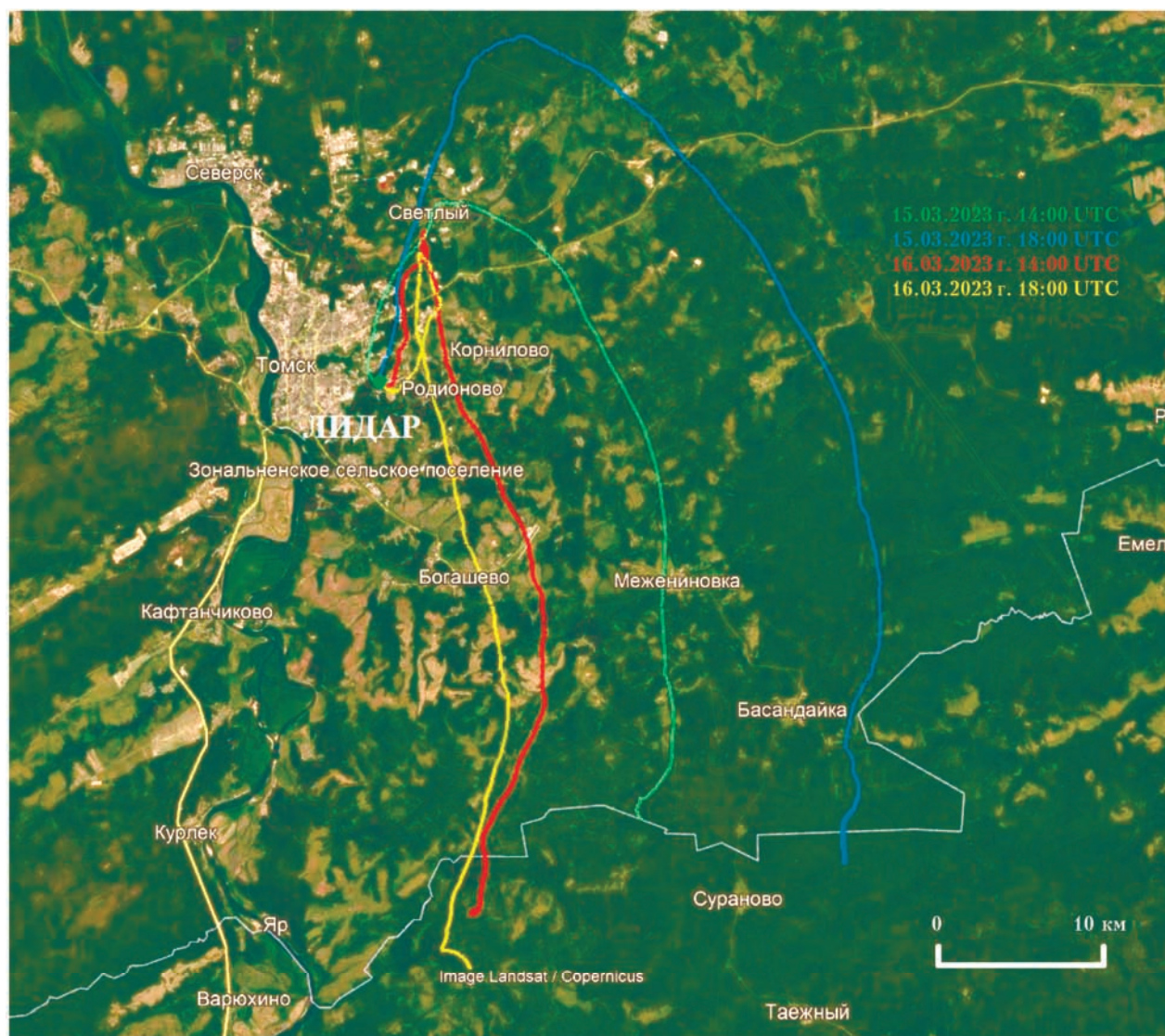


Рис. 1. Горизонтальные траектории полета зондов в лидарно-баллонном эксперименте

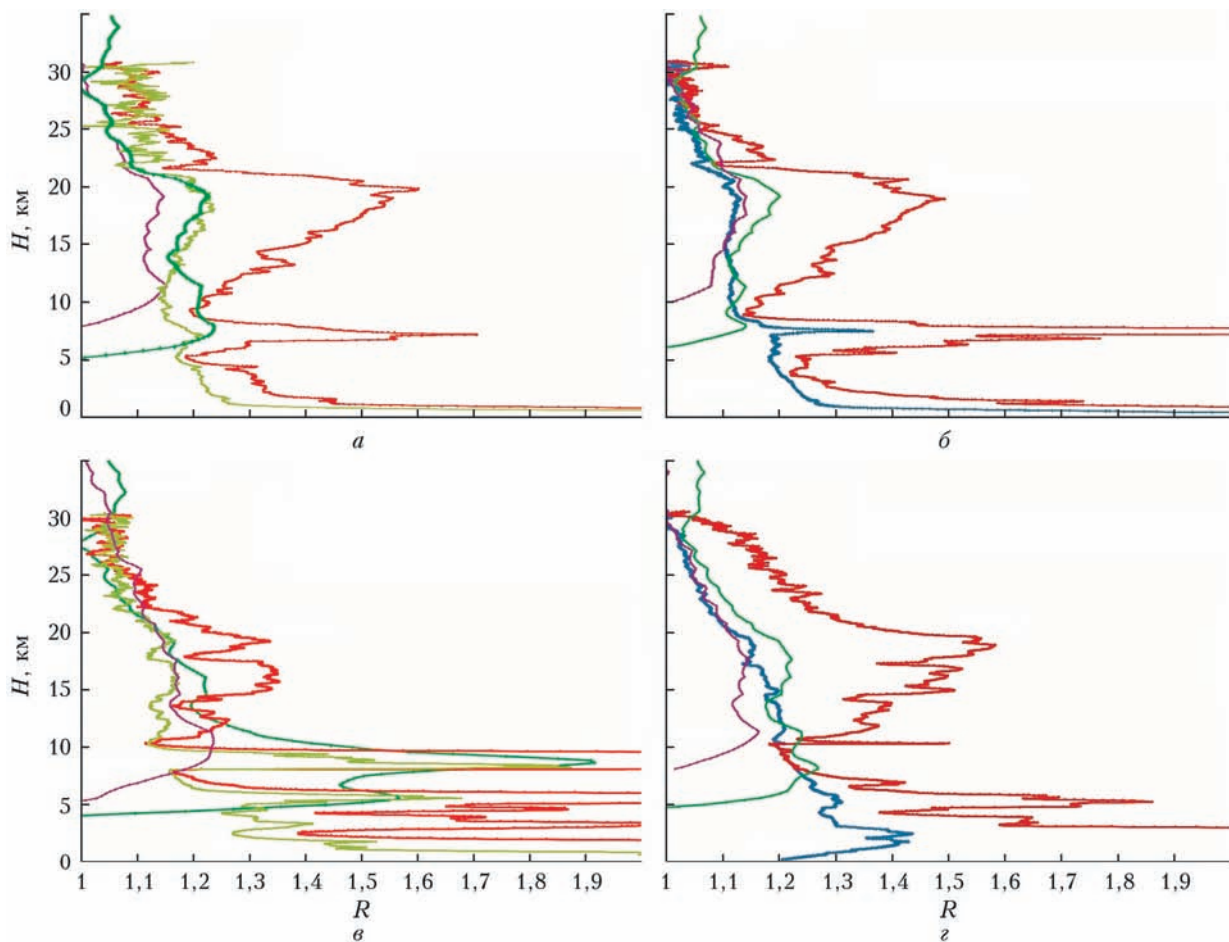


Рис. 2. Вертикальные профили $R(\lambda, H)$: 15.03.2023 г. в 14:00 (а) и 18:00 (б); 16.03.2023 г. в 14:00 (в) и 18:00 (г); фиолетовые ($\lambda = 355$ нм) и темно-зеленые ($\lambda = 532$ нм) кривые — лидарные данные; голубые ($\lambda = 470$ нм), светло-зеленые ($\lambda = 528$ нм), красные ($\lambda = 8502$ нм) и бордовые ($\lambda = 940$ нм) кривые — данные АЗОР. Здесь и на рис. 3 указано время UTC

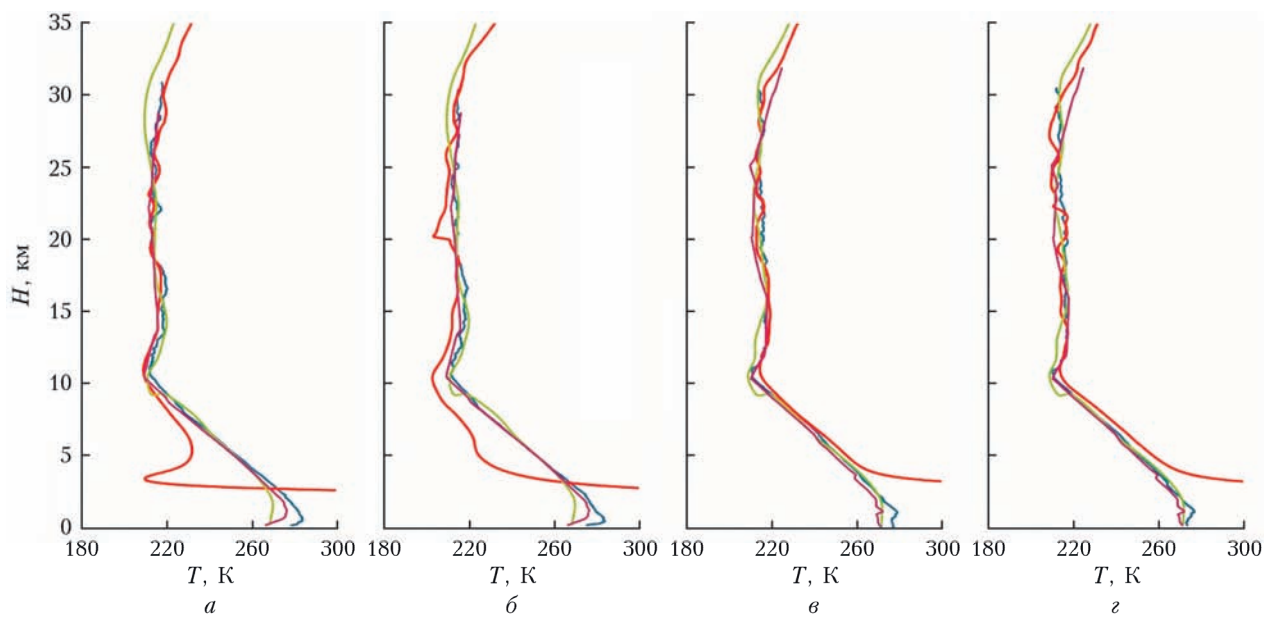


Рис. 3. Вертикальные профили температуры: 15.03.2023 г. в 14:00 (а) и 18:00 (б); 16.03.2023 г. 14:00 (в) и 18:00 (г); синие кривые — температурный датчик АЗОР, красные — лидар, зеленые — спутник AURA, фиолетовые — аэрологический зонд (г. Новосибирск)