

СРАВНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ НАД ТОМСКОМ ПО ДАННЫМ ЛИДАРНЫХ И АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Брюханов И.Д.^{1,2**}, Маричев В.Н.^{1*}, Бочковский Д.А.^{1***}, Балугин Н.В.^{3****}, Животенюк И.В.²,
Дорошкевич А.А.², Стыкон А.П.², Ни Е.В.², Локтюшин О.Ю.², Манохин Д.²

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный, Россия

e-mail: *marichev@iao.ru, **plyton@mail.tsu.ru, ***moto@iao.ru ****horst2007@yandex.ru

Глобальные климатические изменения всё более существенны, и потому требуют выполнения мониторинга вертикального распределения температуры атмосферы, что играет ключевую роль в изучении термодинамических процессов. В Томске регулярное аэрологическое зондирование не выполняется, что затрудняет анализ температурного профиля. Представлены результаты апрельских и ноябрьских экспериментов 2024 г. с одновременными измерениями лидарами малой станции высотного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и Томского государственного университета, а также аэрозольными зондами обратного рассеяния ЦАО Росгидромета. Лидарные наблюдения дополнены аэрологическими запусками, обеспечивая непрерывный мониторинг. Совмещение методов позволяет выявлять аномалии, улучшать климатические модели и прогнозировать экстремальные погодные явления, что особенно важно для Западной Сибири.

В условиях глобального изменения климата мониторинг температурного профиля атмосферы приобретает особую значимость. 2024 г. стал самым тёплым за всю историю регулярных метеорологических наблюдений, начавшихся в 1850 г.: средняя температура воздуха достигла 1,29°C, что на 13,9°C превышает средний уровень XX века. Этот показатель на 0,10°C выше предыдущего рекорда, установленного в 2023 году. Все десять самых жарких лет за 175 лет наблюдений пришлось на крайнее десятилетие (2015–2024 гг.). В Северном полушарии температура поверхности в 2024 году достигла рекордных значений – на 1,67°C выше средней. В целом, 2024 год установил новый температурный рекорд, превысив средний показатель XX века на 0,90°C [1]. Оценки глобальных климатических изменений стимулируют постановку и выполнение исследований, направленных на определение зон регионов, в которых прогнозируются изменения климата. Согласно модельным расчётам [2], к середине XXI века в Западной Сибири ожидается существенное потепление атмосферного воздуха.

Наиболее надёжным источником информации о метеорологической обстановке на различных высотах является аэрологическое зондирование. В Томске на регулярной основе такие измерения не выполняются, что затрудняет анализ термодинамических процессов в атмосфере. Ближайшие станции, выполняющие систематические запуски радиозондов, находятся в Новосибирске (WMO 29634; примерно 210 км от Томска) и Колпашево

(WMO 29231; примерно 240 км от Томска) [3, 4]. В таких условиях лидарные измерения являются важным инструментом для получения оперативных данных о температуре атмосферного воздуха. Совместные лидарно-аэрологические измерения открывают возможности взаимного дополнения обоих методов, что обеспечивает всепогодность наблюдений и непрерывность рядов данных [5]. Такой подход особенно значим в контексте изучения глобального потепления, поскольку изменения температурного профиля влияют на атмосферную циркуляцию, образование облаков и устойчивость стратификации. Западная Сибирь – регион, чувствительный к изменениям климата. Данные о температурном профиле необходимы для уточнения климатических моделей, прогнозирования экстремальных погодных явлений и изучения процессов теплообмена. Развитие лидарного мониторинга в Томске компенсирует отсутствие регулярного аэрологического зондирования и способствует более точному анализу изменений климата.

В 2023–2024 гг. выполнялись одновременные измерения температуры с использованием лидара малой станции высотного зондирования атмосферы (МСВЗА) института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА СО РАН; для высот 7–50 км), высотного матричного поляризационного лидара (ВМПЛ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ; для высот 3–12 км) и аэрозольных зондов обратного рассеяния (АЗОР) центральной аэрологической обсерватории (ЦАО Росгидромета; для высот 0–30 км). Отметим особо: радиозонд поднимается под действием силы Архимеда, на высоте около 30 тысяч метров резиновая оболочка лопается, и оборудование зонда спускается на парашюте, выполняя второй цикл измерений. На рисунке 1 представлена карта с отметками точек стояния обоих лидаров, а также координатные точки в восходящей части траектории полёта АЗОР (запущен 28.11.2024 г. в 21:00 местного времени).

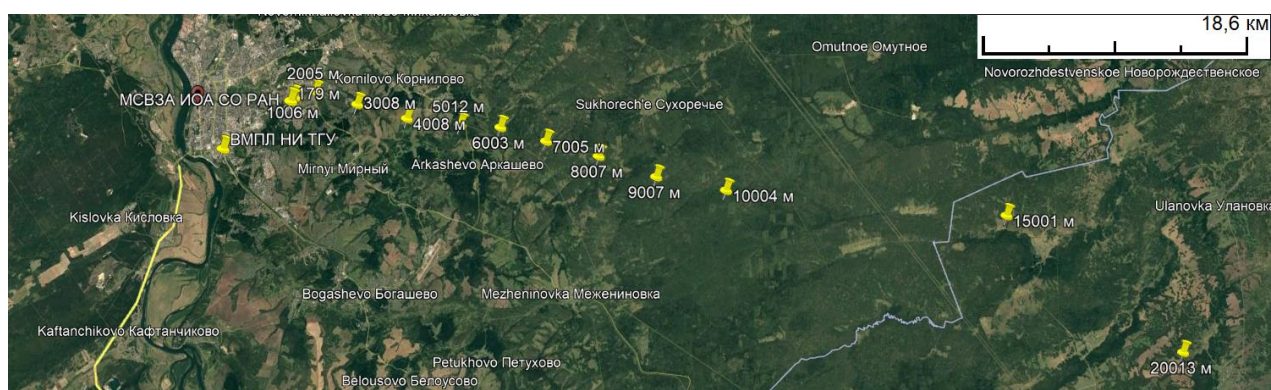


Рисунок 1 – Фрагмент карты Томска и окрестностей; местоположения лидаров ИОА СО РАН и НИ ТГУ, а также точки восходящей части траектории полёта АЗОР ЦАО (запуск в 21:00 местного времени 28.11.2024 г.; числа – значения высоты в метрах)

Рисунок 2 демонстрирует местоположения АЗОР в подъёмной части траектории относительно точек стояния обоих лидаров и метеорологических станций Новосибирска и Колпашево. Удаление зонда от МСВЗА и ВМПЛ в высшей точке полёта составило примерно 65 и 68 км соответственно.

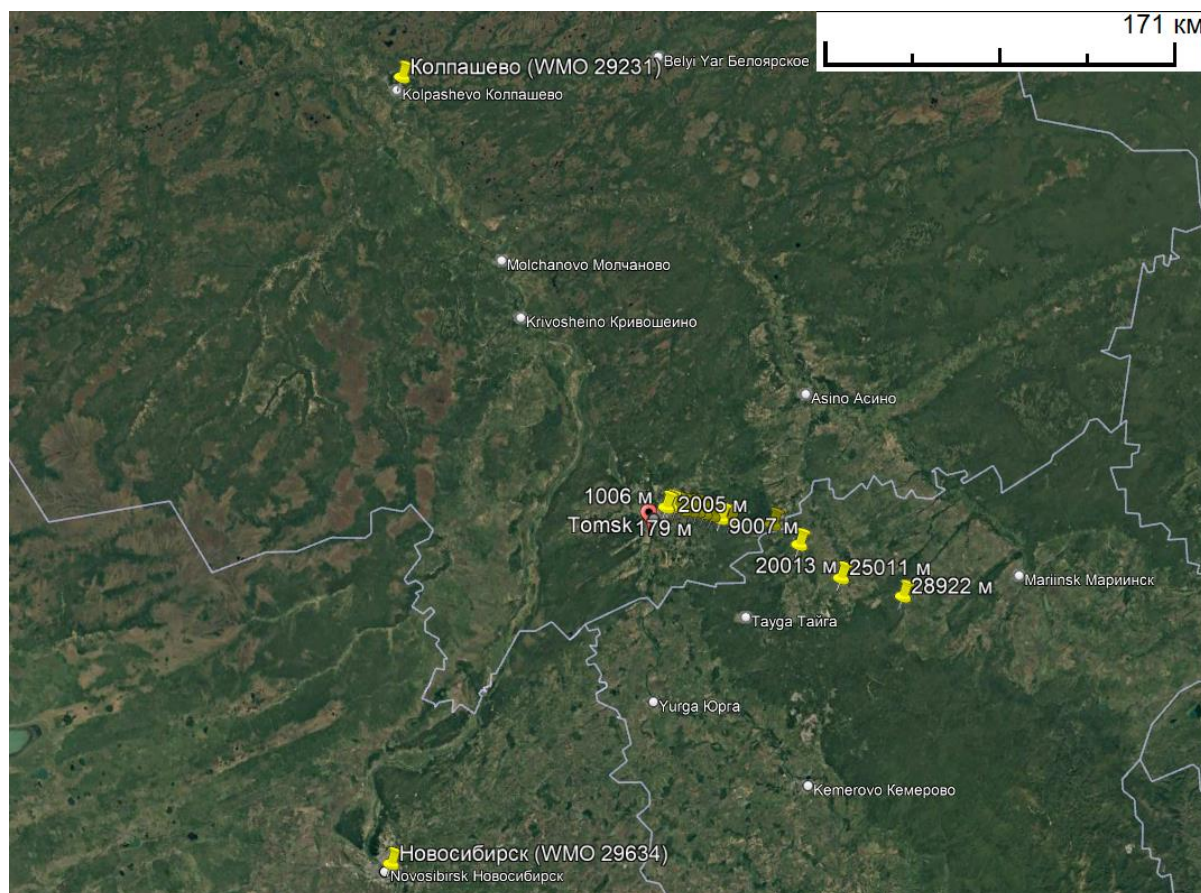


Рисунок 2 – Фрагмент карты Западной Сибири; местоположения лидаров ИОА СО РАН и НИ ТГУ, а также точки восходящей части траектории полёта АЗОР ЦАО (запуск в 21:00 местного времени 28.11.2024 г.; числа – значения высоты в метрах)

На рисунке 3 представлены вертикальные профили температуры атмосферного воздуха, полученные в апреле 2024 г. в измерениях на лидарах МСВЗА ИОА СО РАН и НИ ТГУ, а также АЗОР ЦАО и аэрологических зондов Росгидромета (использованы данные станции Новосибирска, как наиболее близко расположенной к Томску). Примечательна близость кривых на графиках. Вместе с тем, налицо отклонение данных радиозондов станции Новосибирска (чёрные кривые) относительно остальных на высотах 10–15 км. Далее будем использовать даты и время в UTC.

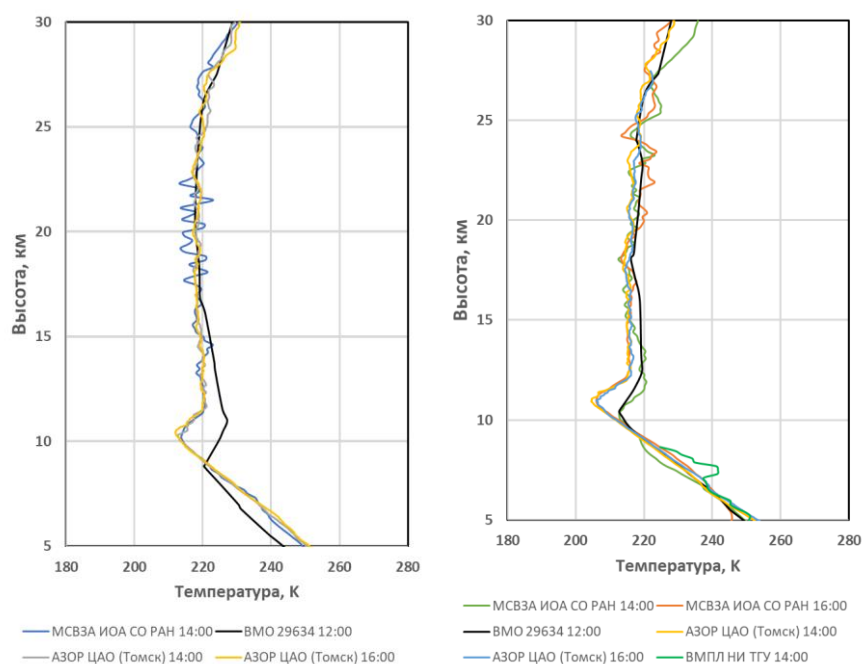


Рисунок 3 – Вертикальные профили температуры по данным измерений на лидарах ИОА СО РАН и НИ ТГУ, АЗОР ЦАО, а также станции аэрологического зондирования Новосибирска (ВМО 29634) 25 (слева) и 26 апреля (справа) 2024 г.

Рисунки 4–6 иллюстрируют аналогичные вертикальные профили по данным измерений 26–28 ноября 2024 г. Примечательно заметно меньшее отклонение данных станции Новосибирска (голубая кривая) относительно результатов других измерений.

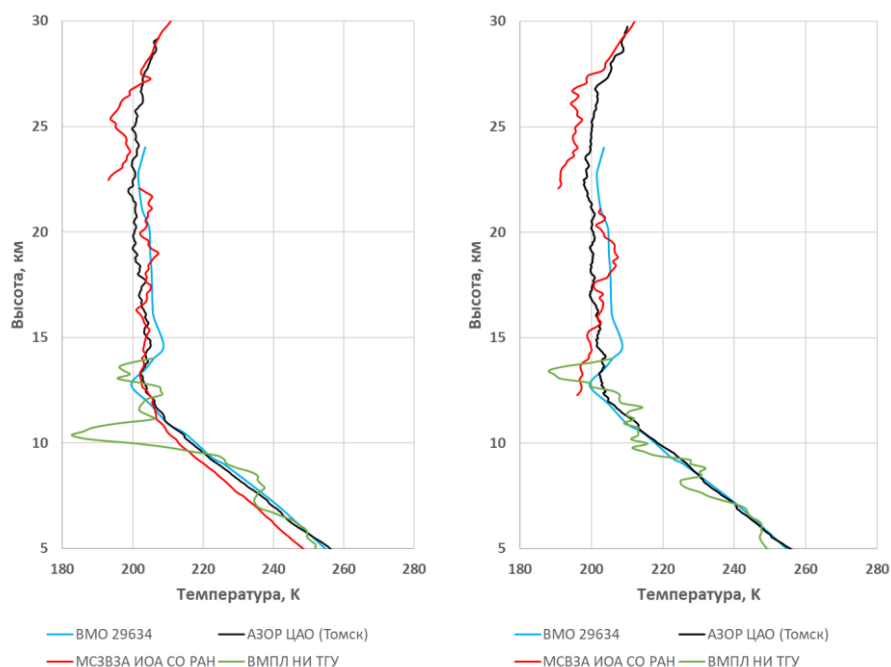


Рисунок 4 – Вертикальные профили температуры по данным измерений на лидарах ИОА СО РАН и НИ ТГУ, АЗОР ЦАО, а также станции аэрологического зондирования Новосибирска (ВМО 29634) 26 ноября 2024 г. в 14:00 (слева) и 18:00 (справа)

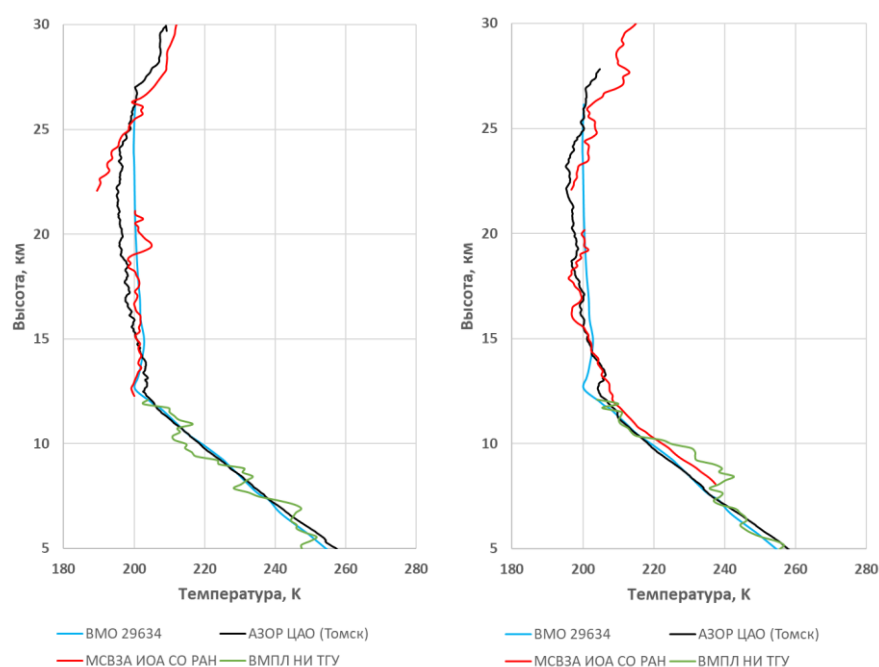


Рисунок 5 – Вертикальные профили температуры по данным измерений на лидарах ИОА СО РАН и НИ ТГУ, АЗОР ЦАО, а также станции аэрологического зондирования Новосибирска (ВМО 29634) 27 ноября 2024 г. в 14:00 (слева) и 18:00 (справа)

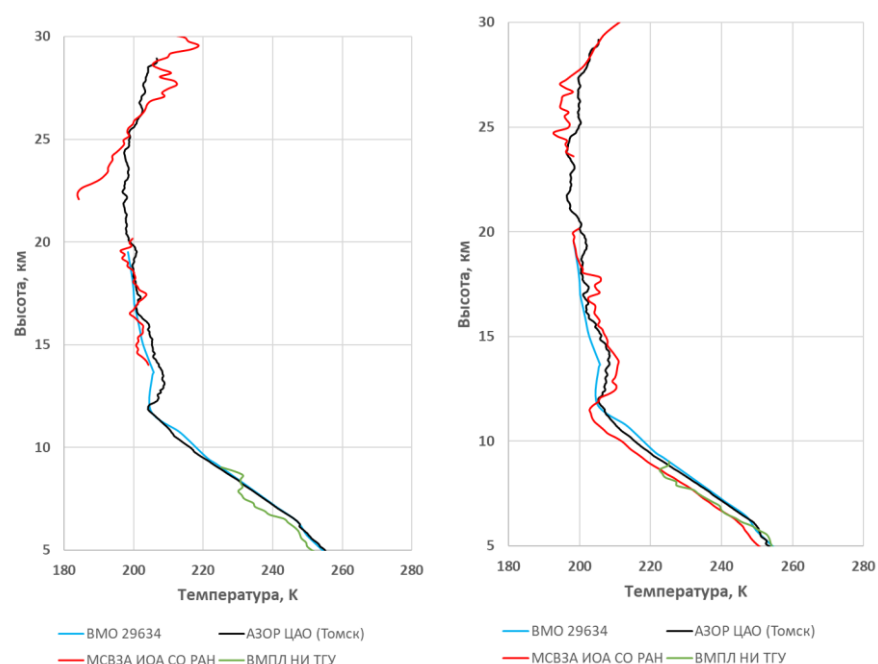


Рисунок 6 – Вертикальные профили температуры по данным измерений на лидарах ИОА СО РАН и НИ ТГУ, АЗОР ЦАО, а также станции аэрологического зондирования Новосибирска (ВМО 29634) 28 ноября 2024 г. в 14:00 (слева) и 18:00 (справа)

Подчеркнём согласованность данных лидарных и радиозондовых измерений, отмеченную ранее в работе [5]. Представленные результаты позволяют сопоставлять и анализировать вместе

данные лидаров МСВЗА ИОА СО РАН и НИ ТГУ. Отработана методика и модернизировано программное обеспечение для восстановления вертикальных профилей температуры на основе данных ВМПЛ НИ ТГУ. Отмечена высокая информативность совместных измерений лидарами и АЗОР ЦАО. Использование данных радиозондов, запускаемых непосредственно в Томске, подтвердило корректность восстановления вертикальных профилей температуры на основе данных измерений на лидарах, расположенных в Томске.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИОА СО РАН.

1. NOAA National Centers for Environmental Information, Global Climate Report, Annual 2024; URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201705> (дата обращения: 06.03.2025 г.).

2. Лагутин А.А., Волков Н.В., Мордвин Е.Ю. Влияние глобальных климатических изменений на климат Западной Сибири в первой половине XXI в. // Вычислительные технологии. 2018. Т.23, №4. С. 83–94.

3. Центральная аэрологическая обсерватория (Научно-технический центр радиозондирования). URL: <http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/locator.htm> (дата обращения: 06 марта 2025 г.).

4. University of Wyoming. Wyoming Weather Web. URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 06 марта 2025 г.).

5. Маричев В.Н., Брюханов И.Д., Бочковский Д.А., Балугин Н.В., Животенюк И.В., Ни Е.В., Дорошкевич А.А. Лидарно-лидарно-радиозондовый эксперимент 2023 г. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс] : Материалы XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г. – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. – С. E174–E178002E