

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.551.21

Дисперсия температуры воздуха в условиях температурной инверсии

В.А. Гладких, А.П. Камардин, И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов✉*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 01.08.2024;
после доработки 17.09.2024;
принята к печати 18.09.2024

Рассмотрено влияние вертикальных и горизонтальных турбулентных потоков тепла на величину дисперсии температуры воздуха в условиях температурных инверсий различной интенсивности. Показано, что неучет горизонтальных турбулентных потоков тепла в этих условиях может быть причиной существенной недооценки высоты слоя перемешивания существующими моделями.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, инверсия температуры, высота слоя перемешивания, дисперсия температуры, турбулентные потоки тепла; atmospheric boundary layer, temperature inversion, mixing layer height, temperature variance, turbulent heat fluxes.

В условиях инверсии температуры воздуха в пограничном слое атмосферы (ПСА) имеет место существенное расхождение между модельными оценками высоты слоя перемешивания h_S , на которой значения турбулентных потоков тепла и импульса уменьшаются до единиц процентов от приземных значений, и высотой H_m слоя с интенсивным турбулентным теплообменом [1]. Расчеты h_S проводились с использованием моделей из публикаций [2, 3]. Оценки H_m были получены на основе результатов работы акустического метеорологического локатора (содара). Величина сигнала содара с высоты z пропорциональна дисперсии температуры воздуха $\sigma_T^2(z)$ на этой высоте. Профили температуры в ПСА измерялись микроволновым профилемером МТР-5. Приземные значения метеорологических параметров определялись с помощью ультразвуковой метеостанции (УЗМ) на высоте 10 м. Данные приборы входят в состав ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН. Более подробное описание этих приборов можно найти в [1] и процитированной там литературе. Анализ проводился на основе результатов измерений в 2020 и 2021 гг. на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК) ИОА СО РАН, расположенном в пригороде Томска. Данный пункт относится к естественному ландшафту: большая поляна, окруженная лесопосадками высотой до 15–20 м.

В работе [1] показано, что в большинстве случаев $h_S < H_m$ и чем больше интенсивность инверсии (перепад температур ΔT между ее границами), тем сильнее h_S отличается от H_m . При оценках h_S по моделям [2, 3] одним из определяющих параметров является приземный вертикальный турбулентный поток тепла $Q_z = c_p \cdot \rho \cdot \overline{w'T'}$ Вт/м², где $c_p = 1006$ Дж/(кг · К); $\rho = 100 \cdot p / (R_c \cdot T)$ кг/м³ – плотность воздуха, $R_c = 287$ Дж/(кг · К), p – атмосферное давление, гПа, T – средняя температура воздуха, К; $\overline{w'T'}$ – среднее значение (за период времени δt) вертикального турбулентного потока температуры, w' , м/с, и T' , К – турбулентные составляющие вертикального ветра и температуры воздуха соответственно.

В моделях [2, 3] косвенно предполагается, что σ_T^2 на высоте z пропорциональна потоку $Q_z(z)$. Известно, что с увеличением ΔT значение $Q_z(z)$ будет уменьшаться, следовательно, должны уменьшаться $\sigma_T^2(z)$ и h_S . Однако результаты [1] демонстрируют, что высота области «больших» значений $\sigma_T^2(z)$ может существенно превышать высоту h_S . Было высказано предположение, что в условиях инверсии температуры в ПСА $\sigma_T^2(z)$ может зависеть также от горизонтальных турбулентных потоков тепла. Это предположение согласуется с эволюционным уравнением для дисперсии температуры воздуха (см., например, [4, 5]).

Основная цель работы заключалась в оценке взаимосвязи дисперсии σ_T^2 с вертикальным Q_z и горизонтальными Q_u , Q_v турбулентными потоками тепла в условиях температурной инверсии с использованием экспериментальных данных.

* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Павлович Камардин (kar136@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

Мы имели возможность определять эти потоки только в приземном слое на основе результатов работы УЗМ (в пункте БЭК). Предполагаем, что закономерности в приземном слое в определенной степени применимы и на других уровнях ПСА. При решении поставленной задачи по результатам работы профилимера МТР-5 были определены периоды, когда в слое от 0 до 50 м для «градиента» температуры $\gamma_{50} = [T(50) - T(0)]/50$ °С/м выполнялось условие $\gamma_{50} > 0$, т.е. рассматривались приземные инверсии температуры. Потоки тепла Q_u и Q_v определялись по аналогии с приведенной выше формулой для Q_z : $Q_u = c_p \cdot \rho \cdot \overline{u'T'}$ и $Q_v = c_p \cdot \rho \cdot \overline{v'T'}$, где u' и v' , м/с, – турбулентные составляющие продольного и поперечного ветра соответственно. С методикой определения горизонтальных компонентов ветра u' и v' можно ознакомиться в [6]. В итоге в анализ вошло суммарно 4611 ч (из 17544 ч за период измерений 2020–2021 гг.), когда выполнялось условие $\gamma_{50} > 0$ °С/м. Мы не будем разделять результаты ни по сезонам года, ни по времени суток, ни по каким-либо иным условиям. Для этого необходима существенно большая выборка – для соблюдения статистической обеспеченности выводов. Представленные далее оценки величин получены по интервалам времени $\delta t = 30$ мин.

На рис. 1 (цв. вкладка) показана взаимосвязь σ_T^2 с градиентом γ_{50} , потоками Q_z , Q_u и Q_v . Рис. 1 позволяет визуально оценить диапазоны вариаций σ_T^2 в зависимости от величины того или иного параметра. Здесь мы не рассматриваем статистику параметров, приведенных на рис. 1. Отметим только одну особенность: среднее значение σ_T^2 несколько увеличивается с ростом γ_{50} . Это демонстрируют звездочки на рис. 1, а (с указанием стандартных отклонений), соответствующие окончанию интервала осреднения ($\gamma_{50} = 0-0,01$; $0,01-0,02$; $0,02-0,03$ и т.д.). Оценки сделаны только для случаев, когда интервал содержал более 100 отсчетов (более 50 ч наблюдений). Также отметим, что положительные значения Q_z (см. рис. 1, б) имеют место в основном при инверсиях температуры с небольшими градиентами γ_{50} (см. рис. 2, а).

Зависимость потоков Q_z и Q_u от градиента γ_{50} представлена на рис. 2, а (цв. вкладка). Поток Q_v (на графике не приведен) зависит от γ_{50} примерно так же, как и поток Q_z . Очевидно, что по абсолютному значению поток Q_u заметно больше потока Q_z даже при «больших» значениях γ_{50} . Это может служить пояснением к формированию величин H_m и обоснованием для вывода о необходимости включения горизонтальных турбулентных потоков тепла

в методики расчета h_S в условиях температурных инверсий. Совместное влияние потоков тепла на дисперсию температуры приведено на рис. 2, б–г. Графики $\sigma_T^2(Q_z, Q_u)$, $\sigma_T^2(Q_z, Q_v)$, $\sigma_T^2(Q_u, Q_v)$ построены с некоторым сглаживанием. Следует принять во внимание, что по контурам (границам) этих графиков статистическая обеспеченность оценок слабая. Приведенные взаимосвязи $\sigma_T^2(Q_i, Q_j)$ могут быть полезны при разработке обновленных методик оценки высот h_S .

Подводя итог, можно сделать общий вывод о необходимости учета горизонтальных турбулентных потоков тепла в оценках высоты слоя перемешивания при инверсиях температуры воздуха в ПСА. Для более подробного анализа следует увеличить объем экспериментального материала, а также привлечь результаты дополнительных исследований, включая, например, анализ взаимосвязей дисперсии температуры воздуха и потоков тепла со скоростью среднего ветра. Это может помочь в объяснении факта увеличения дисперсии температуры при усилении инверсии температуры.

Список литературы

1. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В.* Высота слоя перемешивания в условиях температурных инверсий: экспериментальные данные и модельные оценки // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 7. С. 549–558. DOI: 10.15372/AOO20220705; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V.* Height of the mixing layer under conditions of temperature inversions: Experimental data and model estimates // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 721–731.
2. *Зилитинкевич С.С., Тюрязков С.А., Троицкая Ю.И., Мареев Е.А.* Теоретические модели высоты пограничного слоя атмосферы и турбулентного вовлечения на его верхней границе // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2012. Т. 48, № 1. С. 150–160.
3. *Steenefeld G.J., van de Wiel B.J.H., Holtslag A.A.M.* Diagnostic equations for the stable boundary layer height: Evaluation and dimensional analysis // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2007. V. 46, N 2. P. 212–225.
4. *Курбацкий А.Ф.* Введение в моделирование турбулентного переноса импульса и скаляра. Новосибирск: ГЕО, 2007. 332 с.
5. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х. Ван Допа.* Л.: Гидрометеоздат, 1985. 352 с.
6. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 3. С. 212–220. DOI: 10.15372/AOO20190307; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L.* Statistics of outer turbulence scales in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 450–458.

V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Air temperature variance under conditions of temperature inversion.

The effect of vertical and horizontal turbulent heat fluxes on the air temperature variance under conditions of temperature inversions of different intensity is considered. It is shown that the neglect of horizontal turbulent heat fluxes under these conditions in the existing models can lead to significant underestimation of the mixing layer height.

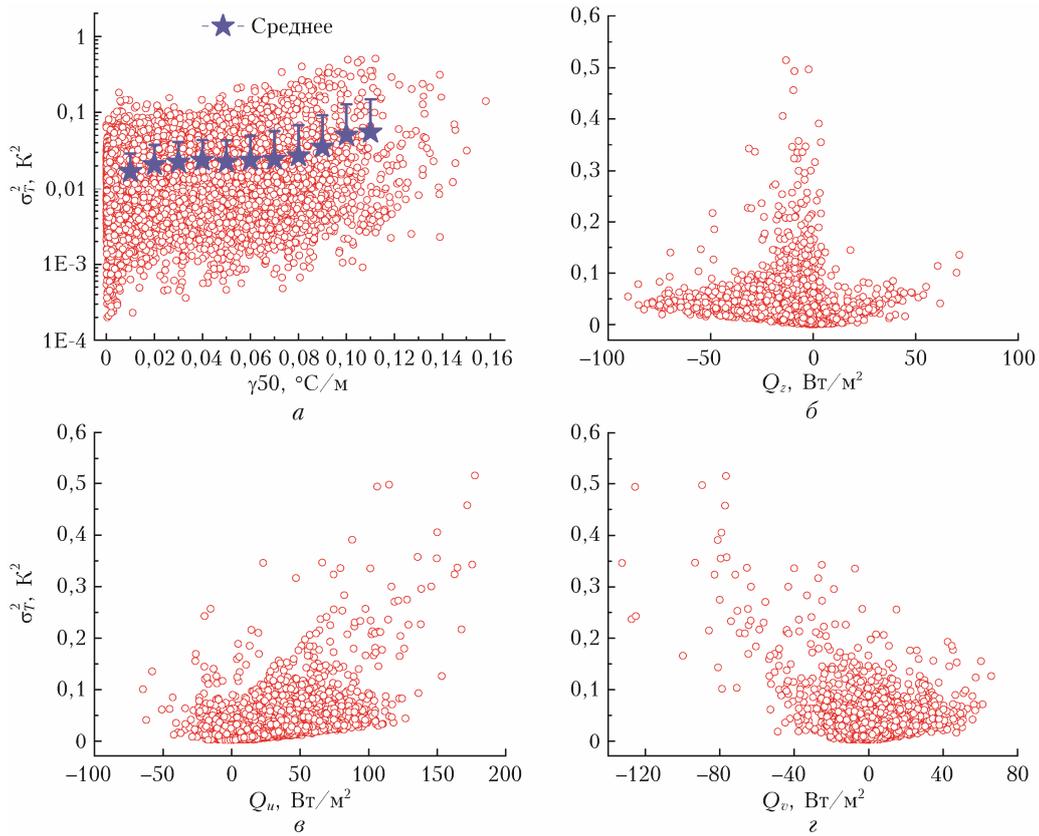


Рис. 1. Зависимость дисперсии температуры воздуха от градиента температуры (а), турбулентных потоков Q_z (б), Q_u (в) и Q_v (г)

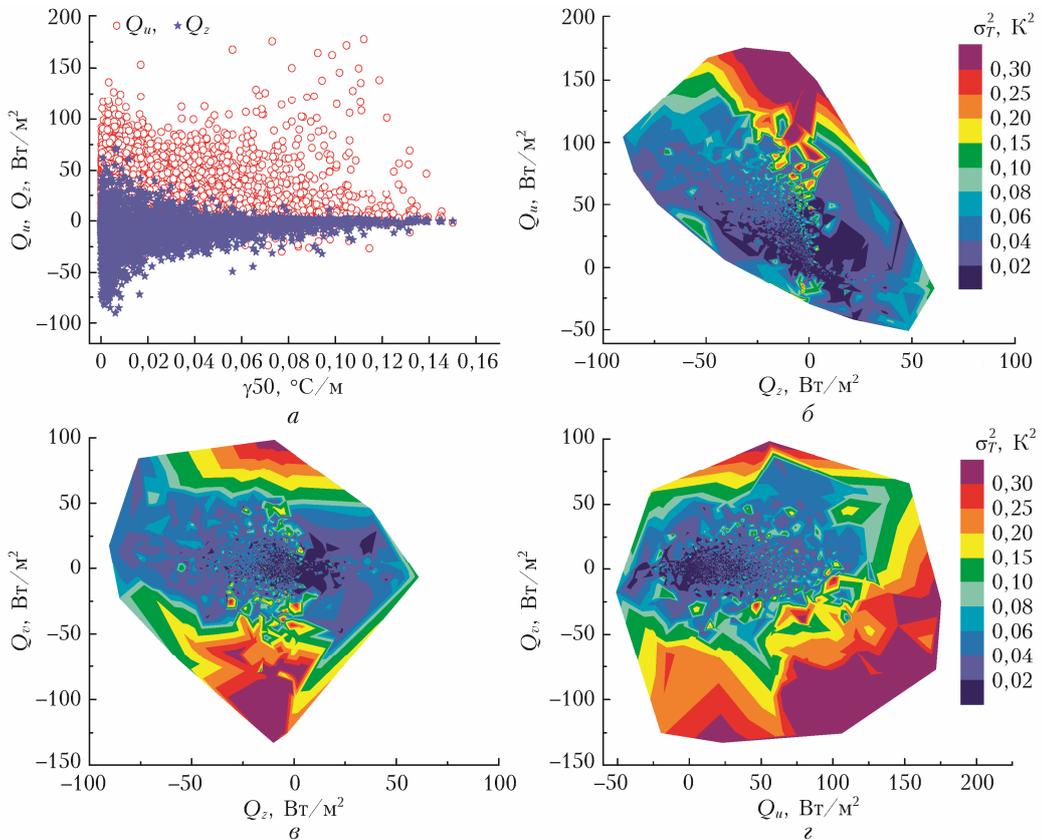


Рис. 2. Зависимость потоков Q_z и Q_u от градиента температуры (а); взаимосвязь σ_T^2 (шкала значений приведена справа от графиков) с Q_z и Q_u (б), Q_z и Q_v (в), Q_u и Q_v (г)