

УДК 551.553

DOI 10.17513/use.38296

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИГОВ ВЕТРА С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ И СКОРОСТЬЮ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

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

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, e-mail: glvl@iao.ru

В статье рассматривается потенциальная возможность оценки вертикальных сдвигов скорости ветра в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы по скорости ветра в приземном слое и по профилям температуры воздуха. Для анализа использованы результаты, полученные за период с 2020 по 2022 г. с помощью микроволнового температурного профилимера, акустического метеорологического локатора (содара) и ультразвукового анемометра-термометра. Основное внимание при анализе экспериментальных данных уделено случаям температурных инверсий большой интенсивности (с большим перепадом температуры между границами инверсии). Рассмотрены сдвиги ветра в диапазоне высот от 10 до 100 м (с гарантированным измерением ветра содаром в условиях инверсий большой интенсивности). Отмечена тенденция уменьшения скорости приземного ветра и увеличение вертикального сдвига скорости с увеличением интенсивности инверсий. В частности, при скорости ветра в приземном слое атмосферы, близкой к штилю, скорость ветра в более высоких слоях достигала относительно больших значений, приводя к существенным вертикальным сдвигам. В итоге формулируется вывод, что имеется потенциальная возможность оценить вертикальные сдвиги скорости ветра в условиях инверсий температуры воздуха в нижней части пограничного слоя атмосферы по измерениям только приземной скорости ветра.

Ключевые слова: атмосфера, инверсия температуры, сдвиг скорости ветра, приземный слой, пограничный слой

CORRELATION BETWEEN VERTICAL WIND SHEARS AND THE INTENSITY OF TEMPERATURE INVERSIONS AND WIND SPEED IN THE SURFACE LAYER

Kamardin A.P., Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, e-mail: glvl@iao.ru

The paper analyzes the functional feasibility of assessing vertical shears of the wind velocity in the stably stratified atmospheric boundary layer from the wind speed in the atmospheric surface layer and air temperature profiles. The results obtained for the period of 2020-2022 with a microwave temperature profiler, an acoustic meteorological lidar (sodar), and an ultrasonic anemometer-thermometer are used for the analysis. The experimental data are analyzed with the emphasis at the events of high-intensity temperature inversions (with a large temperature drop between the inversion limits). Wind shears in the vertical range from 10 to 100 m (in which the wind can be reliably measured by the sodar under conditions of high-intensity inversions) are considered. A tendency for a decrease in the surface wind speed and an increase in the vertical wind shear with an increase in the intensity of inversions was noted. In particular, when the wind speed in the atmospheric surface layer was close to calm, the wind speed in the higher layers reached relatively high values, leading to significant vertical shears. Thus, we can conclude that vertical wind shears under conditions of air temperature inversions in the lower part of the atmospheric boundary layer can be potentially assessed from measurements of the surface wind speed only.

Keywords: atmosphere, temperature inversion, wind shear, atmospheric surface layer, atmospheric boundary layer

Введение

Оценка и возможность прогноза вертикальных сдвигов скорости ветра в нижней части пограничного слоя атмосферы (ПСА) – важная задача во многих областях хозяйственной деятельности. Актуальность ее решения подтверждается и публикационной активностью в отечественной печати в этом направлении за последние годы. Не претендуя на полноту обзора, отметим лишь ряд публикаций по данной тематике. Одной из важных задач является оперативная оценка сдвигов ветра (вертикальных в том числе) для обеспечения безопасности взлета/посадки воздушных судов. С этой целью рассматриваются существующие ме-

тодики определения сдвигов ветра (например, в [1-3]) и возможности их совершенствования (например, в [4-6]). Конкретные требования для таких работ можно найти, например, в [7; 8]. Актуальны проблемы влияния сдвига ветра на высотные сооружения, при подборе ветроэнергетических установок [9-11] и в других направлениях научной и практической работы.

Для практических приложений полезной может быть методика оценки вертикальных сдвигов ветра, основанная на результатах работы простейших средств измерений, размещаемых вблизи подстилающей поверхности и не связанных с излучением звуковых, оптических или радиоволн. На-

пример, с использованием стандартных («чашечных») анемометров и пассивных средств измерения температурных профилей (микроволновых профиломеров). В рамках этой задачи авторов интересовали, в первую очередь, случаи устойчивой температурной стратификации ПСА с большой интенсивностью температурных инверсий. Предварительные результаты по ее решению представлены в [12]. Авторы считают необходимым отметить статью [13], где проведен анализ сдвигов скорости ветра, измерявшихся содаром в условиях устойчивой стратификации, но без их конкретной «привязки» к приземным значениям скорости.

Цель исследования – рассмотреть возможность оценки вертикальных сдвигов ветра в нижней части пограничного слоя атмосферы при инверсиях температуры воздуха большой интенсивности с использованием результатов измерения скорости ветра только в приземном слое.

Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи использовались измерения метеорологических параметров в пункте наблюдения «Базовый экспериментальный комплекс» (БЭК) ИОА СО РАН в пригороде Томска (большая открытая поляна, окруженная лесопосадками). Профили скорости ветра и температуры воздуха получены с помощью содара «Волна-4М» [14], ультразвуковой метеостанции (УЗМ) «Метео-2» [15] и температурного профиломера МТР-5 [16]. При анализе рассматривалась скорость ветра на высотах 10 м (УЗМ), 50, 75 и 100 м (содар). Температура воздуха $T(H)$ измерялась до высоты $H=1$ км с шагом по времени 5 мин. и с шагом по высоте 50 м. Потенциальные погрешности ее измерения с помощью МТР-5 подробно обсуждаются, например в [17]. Камеральная обработка профилей температуры, включавшая интерполяцию профилей, обеспечивала определение высот верхней (H_U) и нижней (H_L) границ инверсии, а также значения температуры на этих высотах (брался только нижний слой инверсии при многослойных инверсиях). Все величины при обработке усреднялись по 30-минутным интервалам времени.

Для исследования был выбран период с 2020 по 2022 г. Методика обработки данных по температуре воздуха и выделения случаев инверсий температуры различных форм и типов опубликована в [18]. В этой статье приведена статистика инверсий за

указанный период и критерий, по которому выделялись случаи сильных инверсий, т.е. инверсий с большим перепадом температур $\Delta T_{inv} = T(H_U) - T(H_L)$ (инверсии большой интенсивности). В соответствии с [18], под сильными инверсиями подразумеваются случаи $\Delta T_{inv} \geq 10,3^\circ\text{C}$ (конкретно для пункта БЭК). В представленном далее материале фигурируют и результаты, когда $\Delta T_{inv} < 10,3^\circ\text{C}$. Но эти случаи обязательно относятся к эпизодам с реализацией условия $\Delta T_{inv} \geq 10,3^\circ\text{C}$ (суммарной длительностью не менее трех часов в сутки).

Измерение параметров ветра с помощью содара было возможно только в тех областях ПСА, где имелись достаточно большие дисперсии температуры воздуха. Известно, что сильные инверсии температуры подавляют турбулентный теплообмен – одну из причин возникновения случайных неоднородностей в температурном поле. Данный фактор ограничивает высотный диапазон измерения параметров ветра с помощью содара. В этой связи в анализ включался диапазон высот до 100 м, в котором ветер мог быть гарантированно измерен. Более подробно материал о связи области с существенной дисперсией температуры воздуха с температурной стратификацией в пункте наблюдения, следовательно, и с возможностью измерения ветра содаром, опубликован в [19-21].

Согласно [18], сильные инверсии температуры за период анализа реализовывались в основном в зимнее время. В теплое время года такие инверсии хотя и встречались, но редко, и их можно отнести к случайным и непродолжительным событиям. Поэтому дальнейший материал относится только к зимнему времени.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве иллюстрации состояния атмосферы в периоды, выбранные для анализа, приведен рис. 1 с измерениями 22.01.2022. На рис. 1а показана эхограмма содара (амплитуда регистрируемых содаром звуковых сигналов, рассеянных в ПСА). Графики скорости ветра на высотах 10 м (по УЗМ), 50, 75 и 100 м, а также интенсивность инверсии ΔT_{inv} показаны на рис. 1б. Температурный режим в этот день, включая положение границ инверсии, приведен на рис. 1в. «Негладкое» поведение верхней границы инверсии в период примерно с 6 до 10 часов местного времени обусловлено переходом от двухслойной инверсии к однослойной при «разрушении» нижнего слоя.

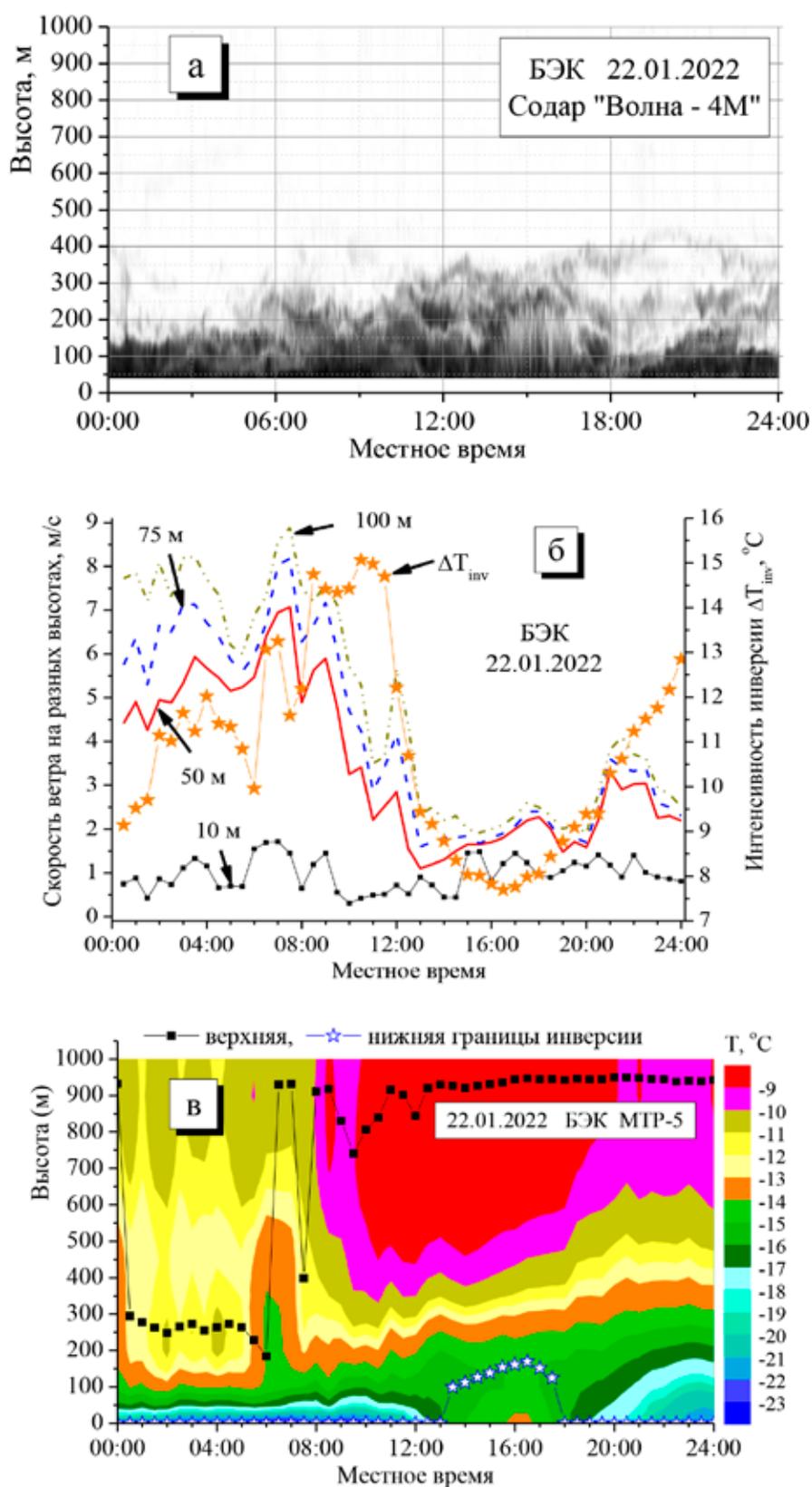


Рис. 1. Состояние атмосферы в периоды, выбранные для анализа:
 а) эхограмма содара; б) скорость ветра на разных высотах и интенсивность инверсии;
 в) высотно-временное распределение температуры воздуха в пункте БЭК 22.01.2022

Экспериментальные данные, аналогичные данным рисунка 1, являлись основой для анализа. Как уже указывалось выше, задача заключалась в оценке взаимосвязи разности скоростей $\Delta V(H/10) = V(H) - V(10)$ на высотах $H=50, 75$ и 100 м со скоростью $V(10)$ на высоте 10 м, а также с интенсивностью инверсии ΔT_{inv} . Всего в анализ было включено 744 часа (31 день) наблюдений за период $2020-2022$ гг. (и только в зимнее время). Из них 276 часов относились к случаю сильных инверсий температуры ($\Delta T_{inv} \geq 10,3^\circ\text{C}$). Отмечено, что в этот набор данных включались все типы инверсий, без разделения их на приземные и приподнятые, ограниченные по высоте или достигавшие уровня 1 км. Отметим также, что далеко не всегда высотные профили скорости ветра в этих условиях были близки к линейной форме, как это обсуждалось, например, в результатах работы [13].

На рис. 2 продемонстрировано, какие значения величин ΔT_{inv} и $V(10)$ наблюдались в выбранные дни и как эти величины взаимосвязаны. Явно просматривается тенденция уменьшения скорости приземного ветра с увеличением интенсивности инверсий. При этом в случае сильных инверсий скорость приземного ветра была в основном менее 3 м/с (вертикальная линия на графике соответствует границе $10,3^\circ\text{C}$).

Общее описание экспериментальных данных дополнено графиками суточного хода величин ΔT_{inv} и $\Delta V(H/10)$ в выбранные дни для анализа. Этот материал представлен на рис. 3 (ограничимся иллюстрацией только суточного хода разности $\Delta V(100/10)$; другие разности имеют подобную форму, но с меньшими значениями). Обращено внимание на то, что в нескольких эпизодах скорость ветра на уровне 10 м была больше, чем на уровне 100 м, т. е. $\Delta V(100/10) < 0$.

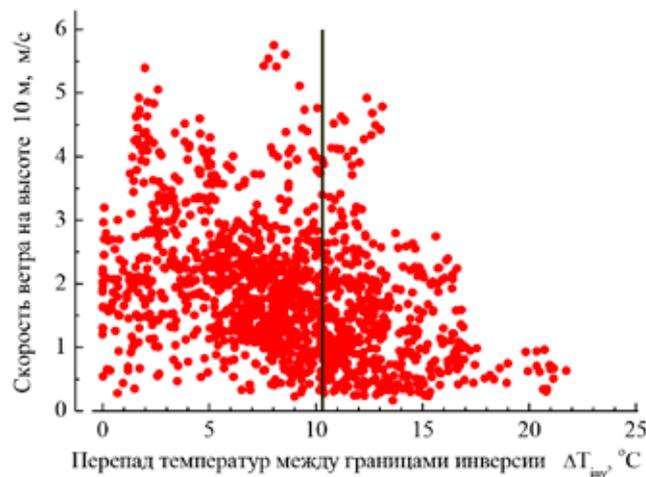


Рис. 2. Взаимосвязь интенсивности инверсий и скорости ветра на высоте 10 м

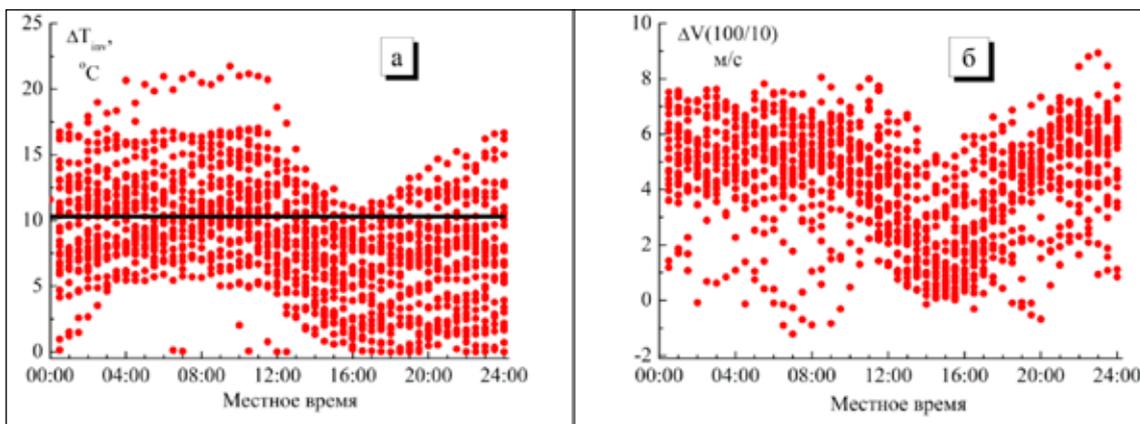


Рис. 3. Суточный ход: а) ΔT_{inv} ; б) $\Delta V(100/10)$. Горизонтальная линия на рисунке (а) соответствует границе, выше которой начинается область сильных инверсий

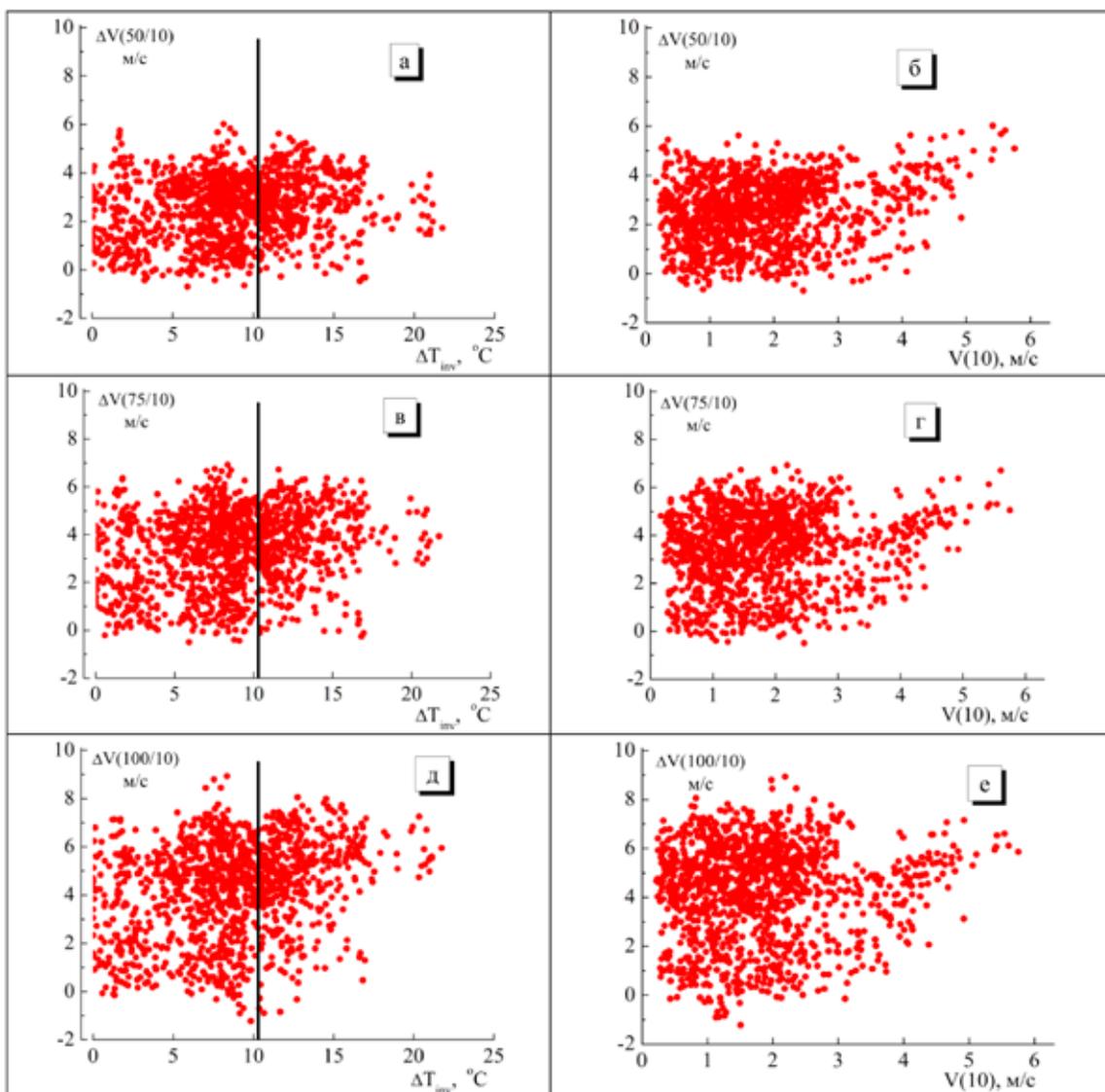


Рис. 4. Взаимосвязь сдвигов ветра $\Delta V(H/10)$ с интенсивностью инверсий (а, в, д) и со скоростью ветра на высоте 10 м (б, г, е)

Поскольку одной из задач являлась оценка взаимосвязей

$$\Delta V(H/10) = V(H) - V(10) \Leftrightarrow \Delta T_{inv}$$

$$\text{и } \Delta V(H/10) \Leftrightarrow V(10),$$

то на рис. 4 приводятся «облака» соответствующих экспериментальных данных. На графиках $\Delta V(H/10) \Leftrightarrow \Delta T_{inv}$ (рис. 4 а, в, д) вертикальными линиями нанесена «граница» сильных инверсий температуры.

Согласно результатам на рис. 4, какх-либо отчетливо выраженных закономерностей в рассматриваемых взаимосвязях нет. Только в случаях сильных инверсий просматривается увеличение $\Delta V(H/10)$ с увеличением ΔT_{inv} . Однако следует принять во внимание, что с увеличением ΔT_{inv} наблюдает-

ся тенденция уменьшения скорости $V(10)$ в приземном слое. Это приводит к выводу, что необходимо рассмотреть взаимосвязь $\Delta V(H/10)$ одновременно с ΔT_{inv} и с $V(10)$. Такая взаимосвязь демонстрируется на рис. 5 с помощью 2D-графиков. Данные графики представлены в одинаковом формате для более наглядной иллюстрации.

В соответствии с результатами на рис. 5, очевидно, что в случаях сильных инверсий (граница обозначена вертикальной линией) с увеличением ΔT_{inv} даже при скоростях ветра на уровне 10 м, близких к шторму, сдвиги ветра $\Delta V(H/10) = V(H) - V(10)$ могут быть значительными. Они вполне сравнимы со сдвигами при относительно сильном ветре в приземном слое в случае небольшой интенсивности инверсий ΔT_{inv} .

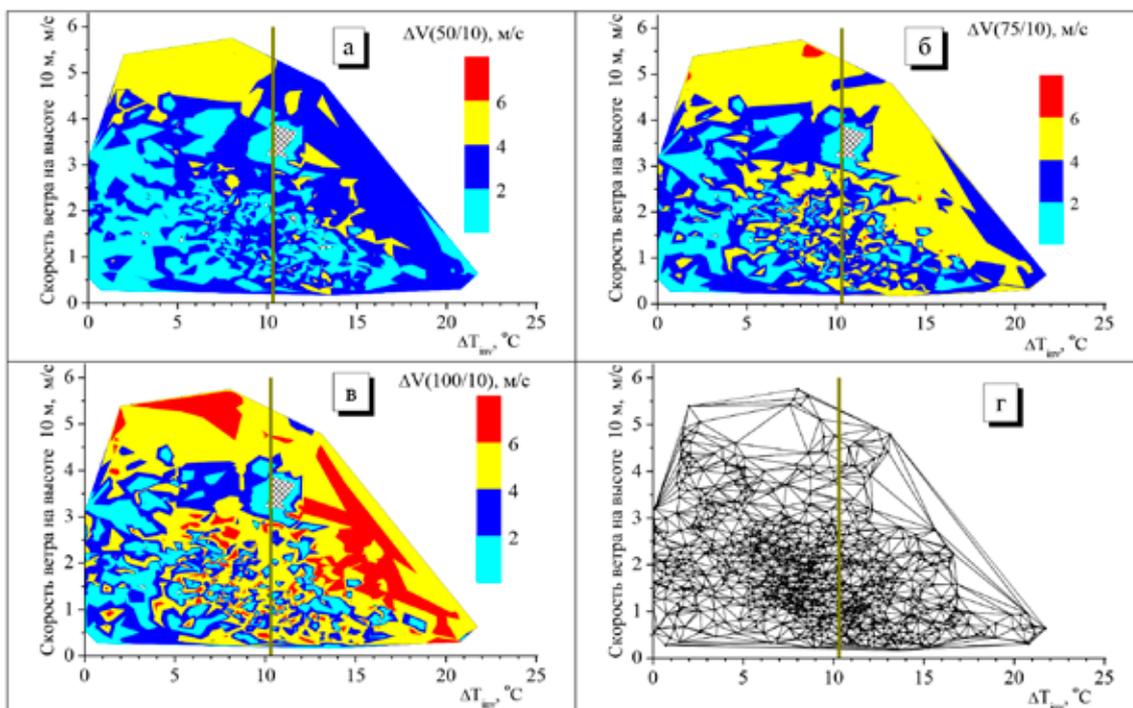


Рис. 5. Взаимосвязь вертикальных сдвигов скорости ветра на разных высотах одновременно с интенсивностью инверсий ΔT_{inv} и скоростью ветра на высоте 10 м. На рисунке (г) показана «сетка», по которой построены графики (а, б, в)

Статистическую обеспеченность результатов, представленных на рис. 5 а-в, комментирует рис. 5г, где показана «сетка», связывающая между собой точки выборки $\Delta V(H/10)\{\Delta T_{inv}, V(10)\}$, по которым построены графики на рис. 5 а-в. Понятно, что по границам этих графиков статистическая обеспеченность не всегда достаточна.

Представленные на рис. 5 графики являются фактически итогом проверки возможности использования приземных значений скорости ветра в условиях температурных инверсий для оценки вероятных величин вертикальных сдвигов ветра в нижней части ПСА. Тенденция очевидна – увеличение интенсивности инверсии при фиксированном значении скорости ветра на высоте 10 м приводит в целом к увеличению вертикальных сдвигов ветра. Однако «строгой» взаимосвязи $\Delta V(H/10)\{\Delta T_{inv}, V(10)\}$, подходящей для аналитической аппроксимации, нет. Наблюдается высокая степень «мелкомасштабной» вариативности результатов. По-видимому, в анализ необходимо включать какие-либо дополнительные параметры, которые можно получить в приземном слое (например, дисперсию скорости ветра) и/или дополнительные характеристики температурных профилей (например, средний градиент температуры в инверсии).

Выводы

Завершая изложение полученных результатов, авторы напоминают, что рассматривались только те эпизоды (суточные измерения), когда в пограничном слое атмосферы хотя бы на некоторое время (не менее трех часов) образовывались инверсии температуры воздуха большой интенсивности. В итоге можно сделать следующие выводы.

- Скорость приземного ветра обычно уменьшалась с увеличением интенсивности температурных инверсий в ПСА.

- Даже при скорости ветра в приземном слое атмосферы, близкой к штилю, скорость ветра в более высоких слоях достигала относительно больших значений, приводя к большим вертикальным сдвигам.

- С увеличением интенсивности температурных инверсий наблюдается тенденция увеличения вертикальных сдвигов скорости ветра в ПСА.

- Имеется потенциальная возможность проводить оценку вертикальных сдвигов скорости ветра в нижней части устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы по измерениям только приземной скорости ветра и высотных профилей температуры воздуха.

Естественно, что сделанные выводы относятся к конкретному месту проводившихся измерений (и в зимнее время). Но можно предположить, что отмеченные закономерности будут характерны и для других районов измерений с подобной текстурой подстилающей поверхности и климатическим режимом.

Авторы напоминают, что представленные выше результаты получены для случаев температурных инверсий в ПСА без разделения их на типы – приземные или приподнятые. Возможно, включение в анализ и этого фактора позволит уточнить структуру взаимосвязи $\Delta V(H/10)\{\Delta T_{inv}, V(10)\}$. Кроме того, полезным может быть расширение числа рассматриваемых в качестве предикторов параметров, оценка которых доступна для стандартных анемометров и температурных профиломеров. Например, направление ветра, дисперсия скорости приземного ветра, средний градиент температуры в инверсиях и т. п.

Авторы отмечают, что использовались результаты по скорости ветра только до высоты 100 м, гарантированно измерявшейся содаром в условиях сильных температурных инверсий. Возможно, использование других технических средств, обеспечивающих в данных условиях диагностику поля ветра с необходимым пространственно-временным разрешением до более высоких уровней (например, лидаров), позволит улучшить методику оценки вертикальных сдвигов ветра при инверсиях температуры по измерениям скорости ветра только в приземном слое.

Список литературы

1. Синицын И.А., Галаева К.И. Разработка метода и алгоритмов оценки сдвигов ветра и турбулентности в метеорологическом радиолокационном комплексе аэродромной зоны // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 64-73.
2. Нестерова А.О., Волобуева О.В. Влияние сдвига ветра на полёты воздушных судов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S2. С. 145-149.
3. Мануйлов С.А. Обеспечение безопасности полетов при воздействиях неблагоприятных метеорологических условий на воздушное судно // Проблемы безопасности полетов. 2021. № 10. С. 21-44. DOI: 10.36535/0235-5000-2021-10-4.
4. Степаненко М.Э., Сохбатова Г.В., Заболотников В.А. Анализ существующей технологии определения сдвигов ветра в зоне ответственности ОРВД в задачах совершенствования метеорологического обеспечения полетов // Цифровая наука. 2023. № 5. С. 13-18.
5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 109-118.
6. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Радиолокационный метод распознавания неоднородностей векторного поля скорости ветра // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 113-120. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-113-120.
7. Богаткин О.Г., Еникеева В.Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. 232 с.
8. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. СПб.: РИТМУ, 2009. 339 с.
9. Исаев С.А., Мясун Д.Д., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Г. Моделирование влияния сдвига ветра на снижение лобового сопротивления энергоэффективного высотного сооружения с использованием дросселирующего эффекта // Математическое моделирование. 2021. Т. 33, № 7. С. 5-17. DOI: 10.20948/mm-2021-07-01.
10. Фабричная К.А., Абдрахимова Н.С., Альтапов С.Р. Особенности моделирования каркаса здания с учетом податливости узлов сопряжения при ветровых воздействиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4(38). С. 255-261.
11. Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кениг Т. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18-29. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-6-18-29.
12. Камардин А.П., Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Оценка взаимосвязи сдвигов ветра в нижнем слое атмосферы с интенсивностью температурных инверсий // Аэрозоли Сибири. XXX Рабочая группа: Тезисы докладов. [Электронный ресурс]. URL: https://symp.iao.ru/files/symp/sa/30/ru/abstr_15936.pdf (дата обращения: 12.05.2024).
13. Юшков В.П. Сдвиг скорости ветра при устойчивой стратификации и масштабы теории подобия // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 37-51.
14. Камардин А.П., Гладких В.А., Одинцов С.Л., Фёдоров В.А. Метеорологический акустический доплеровский локатор (содар) «ВОЛНА-4М-СТ» // Приборы. 2017. № 4 (202). С. 37-44.
15. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7. С. 21-25.
16. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
17. Юшков В.П. Что может измерять температурный профиломер? // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 76-88.
18. Камардин А.П., Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Статистика инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы над г. Томском // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 9. С. 742-753. DOI: 10.15372/AOO20230906.
19. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Высота области интенсивного турбулентного теплообмена в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы. Часть 1: Методика оценок и статистика // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 782-790. DOI: 10.15372/AOO20201006.
20. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Высота области интенсивного турбулентного теплообмена в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы. Часть 2: Взаимосвязь с приземными метеорологическими параметрами. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 11. С. 880-889. DOI: 10.15372/AOO20201109.
21. 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 атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 7. С. 549-558. DOI: 10.15372/AOO20220705.