

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.327+551.510.61+534.612

Высота области интенсивного турбулентного теплообмена в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы. Часть 1: Методика оценок и статистика

С.Л. Одинцов^{1,2}, В.А. Гладких¹, А.П. Камардин¹, И.В. Невзорова^{1*}

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

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

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.

Проведен анализ высоты области интенсивного турбулентного теплообмена в пограничном слое атмосферы на основе экспериментальных данных, полученных с помощью акустических метеорологических локаторов (содаров), температурных профиломеров и ультразвуковых анемометров-термометров. Основная цель работы заключается в изучении турбулентного теплообмена в условиях температурных инверсий зимой. Рассматривались результаты, полученные на территории с естественным ландшафтом и на урбанизированной территории в январе-феврале 2020 г. В первой части статьи изложены методика получения экспериментальных данных, статистика температурных инверсий в пограничном слое и высот слоя интенсивного турбулентного теплообмена.

Ключевые слова: инверсия температуры, пограничный слой атмосферы, содар, температурный профиломер, турбулентный теплообмен, ультразвуковой анемометр-термометр; temperature inversion, atmospheric boundary layer, sodar, temperature profilometer, turbulent heat exchange, sonic anemometer/thermometer.

Введение

Диагностика и возможный прогноз размеров и микроструктуры области интенсивного турбулентного теплообмена в пограничном слое атмосферы (ПСА), особенно при устойчивой стратификации, актуальны при решении многих прикладных задач, включая задачи динамической метеорологии и распространения оптического излучения. В первом случае речь идет, в частности, о процессах изменения температуры воздуха (см., например, [1–4] и литературу в них), а во втором – об искажениях оптических полей при их прохождении через турбулентную атмосферу [5–8]. Для успешного решения этих задач необходимы также экспериментальные данные, включающие оценку высот, до которых от приземного слоя распространяется турбулентный теплообмен.

В настоящее время одним из немногих (и лучших, на наш взгляд) инструментов, обеспечивающих дистанционную диагностику микроструктуры температурной турбулентности в ПСА, является акустический метеорологический локатор (содар). Причина этого в том, что амплитуды рассеянных атмосферой зондирующих звуковых сигналов фактически

пропорциональны дисперсии температуры воздуха в ПСА, характеризующей интенсивность турбулентного теплообмена. Микроструктура температурной турбулентности в ПСА в условиях неустойчивой или нейтральной стратификации достаточно хорошо изучена и в целом успешно моделируется. Но при устойчивой стратификации, особенно при длительных температурных инверсиях зимой, процессы турбулентного теплообмена в ПСА требуют дополнительных исследований. Примеры таких исследований, проведенных в уникальных условиях Антарктиды с помощью содара, и полученные результаты опубликованы в [9–11].

Для определения «общей» высоты ПСА (как области с хорошо выраженным суточным ходом процессов массо- и теплообмена) используются также другие приборы и методы. В частности, лазерное зондирование атмосферы ([12–15]), беспилотные летательные аппараты ([2, 16–18]) и различные градиентные методики ([2, 19]). Более подробно ознакомиться с подобными технологиями можно по обзорам литературы в указанных работах. Однако выявить области с повышенными значениями турбулентного теплообмена на основе этих технологий можно только по косвенным признакам. Содары же непосредственно предоставляют необходимую информацию о структуре температурной турбулентности с удовлетворительным пространственно-временным разрешением. Естественно, у содаров

* Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Павлович Камардин (kap136@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru).

есть свои ограничения, связанные, например, с существенным влиянием уровня окружающего шума, иногда не позволяющим в принципе проводить измерения или ограничивающим диапазон доступных для контроля высот.

Общая цель нашей работы заключается в экспериментальном определении высоты H_m области ПСА, где имеются турбулентные неоднородности с большой дисперсией температуры, и анализе ее взаимосвязей с метеорологическими характеристиками, в первую очередь со скоростью ветра и турбулентными потоками тепла в приземном слое.

Основное внимание было уделено случаям инверсионного распределения температуры в ПСА в зимний период. Для измерений использовались температурно-ветровые комплексы Института оптики атмосферы (ИОА) им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск), входящие в Центр коллективного пользования «Атмосфера».

Первая часть статьи посвящена методическим аспектам определения высот H_m и соответствующих этим высотам градиентов температуры γ_m , описанию общей метеорологической ситуации за период обработки, а также статистическим характеристикам указанных величин в условиях температурных инверсий зимой. Во второй части статьи представлены результаты анализа взаимосвязей H_m и γ_m с метеорологическими характеристиками в ПСА.

Оборудование, места и режимы измерений

В качестве исходного экспериментального материала для анализа использовались результаты зондирования ПСА двумя температурно-ветровыми комплексами, в состав которых входили содары серии «Волна-4М» [20], метеорологические температурные профиломеры МТР-5 [21, 22], ультразвуковые метеостанции (УЗМ) «Метео-2» [23]. Эти комплексы были размещены в двух пунктах наблюдения. Первый пункт расположен в микрорайоне Академгородок на окраине Томска (крыша лабораторного корпуса ИОА СО РАН), далее он обозначается как пункт «ИОА». Его можно отнести к урбанизированной территории. Второй — на территории Базового экспериментального комплекса («БЭК») ИОА СО РАН в пригороде Томска (большая открытая поляна, окруженная лесопосадками высотой до 10–15 м). Расстояние между двумя этими пунктами составляет ~ 3 км.

Для анализа турбулентного теплообмена в ПСА в условиях устойчивой стратификации был выбран период с января по февраль 2020 г. включительно, когда в обоих пунктах наблюдения на подстилающей поверхности имелся снежный покров толщиной не менее 0,5 м.

В пункте «ИОА» содар обеспечивал контроль диапазона высот от 45 до 700 м с шагом по времени ~ 7 с. В активном режиме содар работал с 08:00 до 21:00 по местному времени. В пункте «БЭК» содар мог работать круглосуточно, обеспечивая кон-

троль диапазона высот от 45 до 1000 м с шагом по времени ~ 9 с. Необходимо отметить, что в «ИОА» содар, наряду с регистрацией области интенсивного турбулентного теплообмена, измерял высотнo-временные профили вектора ветра. Содар в «БЭК» по ряду технических причин в заданный период регистрировал только области турбулентного теплообмена и лишь в отдельных эпизодах (в отдельные дни) измерял профили вектора ветра.

Приборы МТР-5 круглосуточно измеряли профили температуры воздуха в диапазоне высот от уровня размещения до 1 км с шагом 50 м и шагом по времени 5 мин. В пункте «ИОА» прибор МТР-5 размещался на высоте 17 м (крыша лабораторного корпуса ИОА СО РАН), а в пункте «БЭК» — на высоте ~ 4 м от уровня подстилающей поверхности.

УЗМ круглосуточно измеряли температуру и относительную влажность воздуха, атмосферное давление и три компонента вектора ветра с частотой ~ 10 Гц. В пункте «ИОА» измерения велись на уровне 17 м (5 м от уровня крыши), а в «БЭК» — на уровнях 5 и 10 м от подстилающей поверхности (УЗМ размещались на одной мачте).

За указанный период имели место перерывы в работе отдельных составляющих комплексов, связанные с техническими причинами и метеорологической обстановкой (в частности из-за обильных снегопадов). В итоге в анализ вошло 888 ч работы комплекса в пункте «БЭК» и 505 ч — в пункте «ИОА» (с учетом активной работы содара только в интервале времени 08:00–21:00).

Исходные экспериментальные данные обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения, позволявшего производить комплексный анализ с заданным пространственно-временным осреднением.

Методика определения исследуемых параметров

Изложим методику определения высоты (верхней границы) H_m слоя интенсивного турбулентного теплообмена. Содар регистрирует рассеянные атмосферой на какой-либо высоте (точнее, в некотором слое, размеры которого связаны с длительностью зондирующего импульса) зондирующие акустические сигналы, пропорциональные дисперсии температуры воздуха на этой высоте. По нашим оценкам (см., например, [24, 25]), содары, использующиеся для зондирования ПСА, способны получать сигналы (при умеренном уровне окружающего шума) из тех областей, в которых структурная характеристика температуры воздуха $C_T^2 \geq 10^{-5} \text{ K}^2/\text{m}^{2/3}$. Если использовать формулу [26]:

$$C_T^2 \cdot L_T^{2/3} = 2 \cdot \sigma_T^2,$$

где σ_T^2 — дисперсия температуры воздуха; L_T — внешний масштаб температурной турбулентности, и ориентироваться на оценки L_T в пунктах наблюдения для зимнего периода ($L_T \sim 8 \div 10$ м, см. [27]),

то в контролируемых областях ПСА, где $C_T^2 \geq 10^{-5} \text{ K}^2/\text{M}^{2/3}$, можно оценить дисперсию температуры при $\sigma_T^2 \geq 10^{-5} \text{ K}^2$. То есть содары действительно могли обеспечить достаточную чувствительность для определения области интенсивного турбулентного теплообмена.

Сигналы содаров обычно визуализируются в виде «эхограмм» – высотно-временного распределения их амплитуды. Высота H_m определялась по эхограммам и соответствовала высоте, на которой «полезные» сигналы содара становились сравнимы с уровнем окружающего шума. Полагалось, что интенсивный турбулентный теплообмен начинается от подстилающей поверхности и не имеет каких-либо значительных «разрывов» до H_m . В качестве примера на рис. 1 представлены исходные эхограммы в пунктах «БЭК» и «ИОА», на которые нанесены оценки H_m , полученные как средние значения за интервал времени $\Delta t = 20$ мин. Такой интервал осреднения использовался во всех представленных

далее результатах. Отметим, что при устойчивой стратификации в ПСА могут присутствовать отдельные слои с повышенной дисперсией температуры, расположенные значительно выше H_m и не связанные турбулентным теплообменом с приземным слоем. Погрешности определения H_m , по нашим оценкам, могут составлять до 20–40 м, а при повышенном уровне окружающего шума – несколько больше. Тем не менее мы полагаем, что приводимые в статье оценки H_m обеспечивают общее представление о диапазоне высот интенсивного турбулентного теплообмена в ПСА и о связях этих высот с метеорологическими параметрами.

Также необходимо подчеркнуть, что для дальнейшего анализа были выбраны только те случаи, когда сигналы содаров позволяли провести достаточно надежную оценку H_m . В отдельные интервалы времени (иногда весьма длительные) окружающий шум был неприемлемо сильным и явно «глушил» сигналы содаров. Такие эпизоды исключались из анализа.

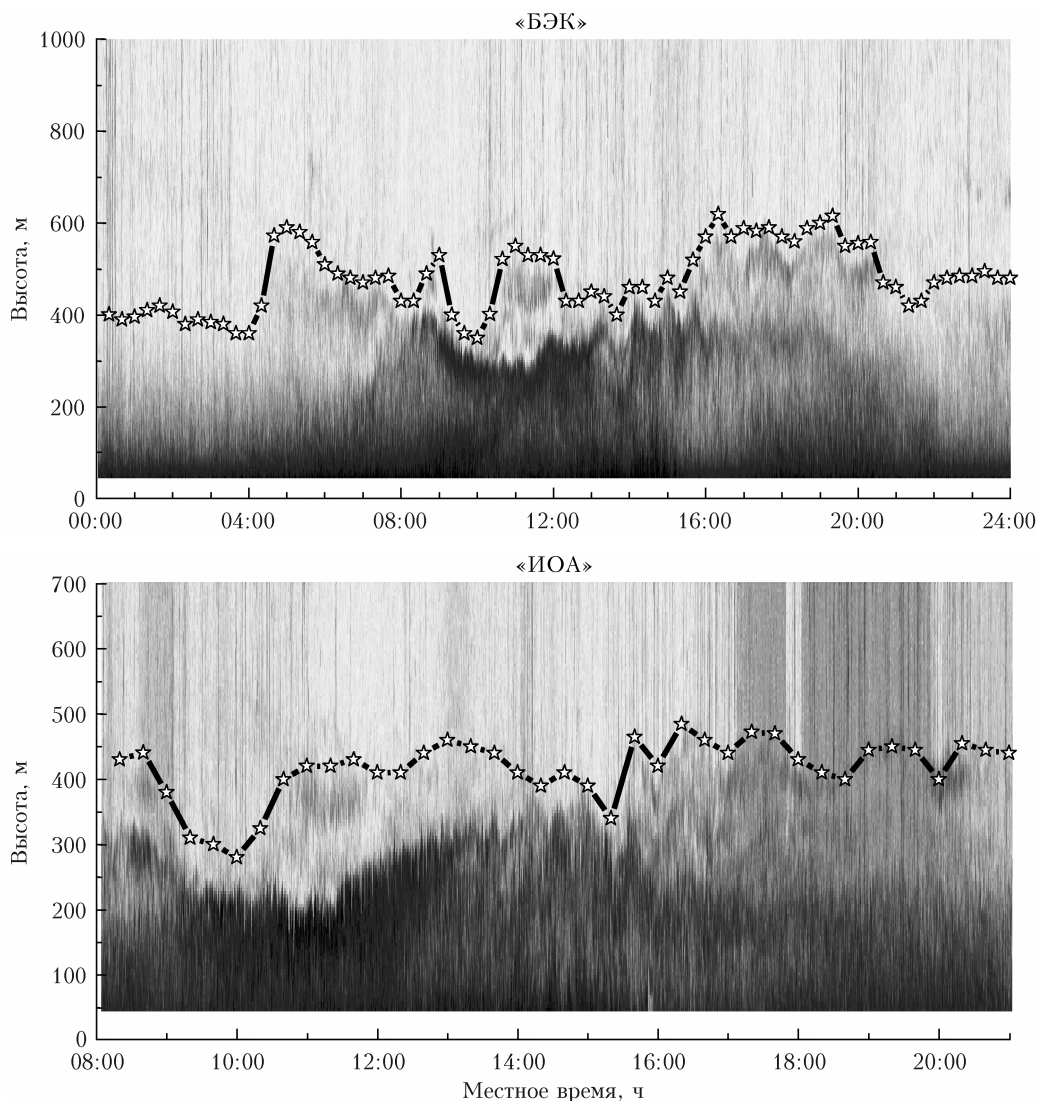


Рис. 1. Примеры исходных эхограмм содаров с нанесенными на них графиками высоты слоя интенсивного турбулентного теплообмена H_m (линии со звездочками) за 30.01.2020 г.

Поскольку в числе прочих мы анализируем градиент γ_m абсолютной температуры воздуха на высоте H_m , приведем методику его оценки. Сначала измеренные (с шагом 50 м) профили температуры $T(H_i)$ усреднялись по заданному интервалу времени Δt . После этого в области высот, включающих H_m , проводилась квадратичная интерполяция осредненных профилей (до шага по высоте $\Delta H = 5$ м). Затем вычислялся «градиент» $\gamma(H_i) = [T(H_i) - T(H_{i-1})] / \Delta H$ (индекс i соответствует некоторой высоте, на которой измерена температура воздуха). За величину γ_m принималось значение $\gamma(H_i)$, если оценка H_m находилась между высотами H_i и H_{i-1} .

Прежде чем перейти к анализу H_m и γ_m , коротко изложим результаты предварительной взаимной калибровки двух приборов МТР-5, размещенных в «ИОА». Эти приборы были установлены рядом (примерно в одном метре друг от друга) и синхронно работали с 13 ноября по 4 декабря 2019 г. Разности измеренных температур на совпадающих высотах приведены на рис. 2, а (цв. вкладка). Высоты на приведенных графиках не идентифицированы, поскольку назначение рисунка – представить только обобщенную картину расхождений температур.

Взаимная калибровка показала, что в целом сравниваемые приборы удовлетворяют своим паспортным характеристикам по погрешностям измерений: $\pm(0,3-0,4)$ °С при адиабатическом профиле температуры и $\pm(0,8-1,2)$ °С при температурных инверсиях. Для двух эпизодов, отмеченных на рис. 2, а и демонстрирующих значительную разность температур, на рис. 2, б, в приведена температура воздуха в пределах 500 м (высоты указаны только для нижних уровней; результаты по прибору, который затем использовался в пункте «ИОА»). Затем один из приборов был установлен в пункте «БЭК».

Ранее (в 2016 г.) нами была проведена сверка высотных профилей температуры воздуха, измеряемых прибором МТР-5 и шарами-пилотами [28]. Результаты сверки оказались вполне удовлетворительными.

По результатам взаимной калибровки приборов МТР-5 мы полагаем, что возможность сопоставления профилей (и градиентов) температур в пунктах «БЭК» и «ИОА» обоснована, в том числе, при интенсивных инверсиях температуры в ПСА.

Метеорологическая ситуация за период анализа

Опишем общую метеорологическую ситуацию, наблюдавшуюся в рассматриваемый период. Воспользуемся для этого результатами, полученными на температурно-ветровом комплексе в пункте наблюдения «БЭК». На рис. 3, а (цв. вкладка) приведены графики осредненной за интервал времени $\Delta t = 20$ мин температуры воздуха в ПСА на разных высотах (до 500 м с шагом 50 м). Отдельные высоты на рис. 3 не идентифицированы, поскольку его цель – продемонстрировать общее изменение и величину «разброса» температуры за анализируемый период в диапазоне высот от приземного слоя до 500 м.

Измеренные с шагом 50 м высотные профили температуры характеризует нормированная на этот шаг разность температур между соседними высотами, которую мы обозначаем как «градиент» температуры $\gamma(H_i)$. Значения градиентов $\gamma(H_i)$ в рассматриваемом диапазоне высот показаны на рис. 3, б. На рисунке приведены периоды, соответствующие условию $\gamma(H_i) > 0$, когда в ПСА присутствовали инверсии температуры (приземные или приподнятые). Отметим, что большие (положительные) значения $\gamma(H_i)$ соответствуют в основном нижним слоям атмосферы. Подобное поведение температуры и ее градиентов наблюдалось и в пункте «ИОА».

Дополним сведения о температурном режиме в период наблюдений данными о приземной скорости ветра и его направлении. Как уже указывалось ранее, по техническим причинам в пункте «БЭК» измерение высотно-временных характеристик ветра в ПСА с помощью содара было возможным лишь в некоторые дни. Поэтому общую картину ветрового режима можно было получить только по приземным измерениям с помощью УЗМ. На рис. 4 показаны графики горизонтальной скорости (V_h) и направления (φ) ветра в «БЭК» на высоте 10 м, осредненные по интервалам времени 20 мин. Направление ветра – азимут угла, откуда он дует.

Таким образом, общую метеорологическую ситуацию за анализируемый период можно охарактеризовать как достаточно динамичную по температуре воздуха с инверсиями, значительными и по интенсивности (перепаду температур), и по длительности

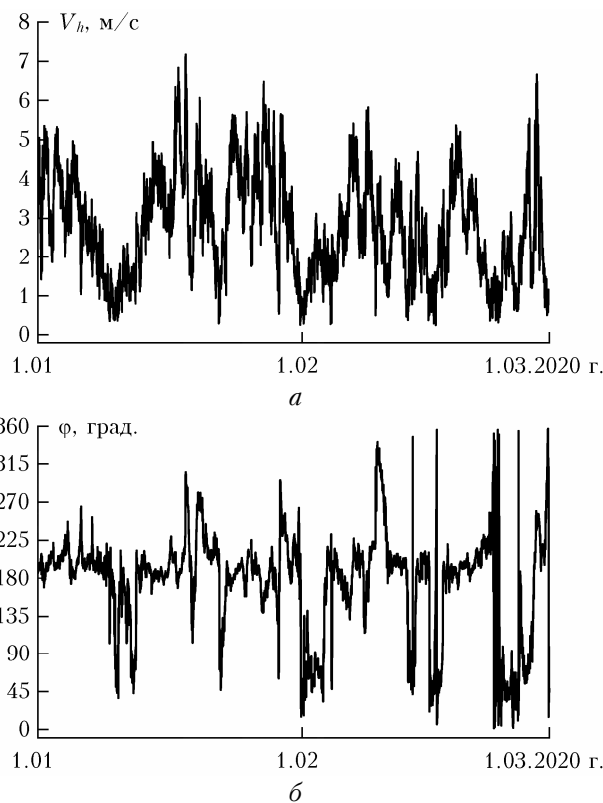


Рис. 4. Скорость (а) и направление (б) ветра на высоте 10 м в пункте «БЭК»

присутствия в ПСА. При этом скорость ветра в приземном слое в некоторых эпизодах приближалась к штилевым значениям и в относительно редких случаях превышала 6 м/с. Направление ветра в целом соответствовало юго-западным румбам, с эпизодической перестройкой на северо-восточные румбы.

Статистика инверсий температуры

Приведем статистику инверсий температуры за январь–февраль 2020 г. Кроме того, уточним некоторые особенности, связанные с положением H_m для разных типов инверсий, и еще раз отметим, что в документации на приборы МТР-5 высота 500 м обозначена как уровень, выше которого погрешности измерений температуры в инверсиях могут достигать $\pm 1,2$ °С. Поэтому величины градиентов температуры и статистику инверсий выше 500 м следует учитывать только как оценочные.

Рассмотрим два типа инверсий: приземную и приподнятую. В первом случае потепление воздуха с ростом высоты происходит непосредственно от уровня размещения МТР-5. Во втором случае от этого уровня температура воздуха сначала убывает, а затем с некоторой высоты начинает расти. Для примера приведем рис. 5, на котором показаны профили температуры в случае приземных и приподнятых инверсий в нескольких вариантах. На графиках данного рисунка большими квадратами обозначены возможные положения высоты слоя интенсивного турбулентного теплообмена H_m , причем специальное обозначение H_{mE} соответствует случаям, когда турбулентный теплообмен «накрывает» инверсионный слой (или находится между слоями многослойной инверсии), а обозначение H_{mB} соответствует ситуации, когда теплообмен не достигает нижней границы приподнятой инверсии.

Из 888 ч наблюдений, которые анализировались в пункте «БЭК», приземные или приподнятые инверсии температуры присутствовали в слое до 1000 м на протяжении 611 ч. В пункте «ИОА» из 505 ч наблюдений (для 08:00–21:00 по местному времени, когда работал содар) инверсии имели место суммарно 284 ч. Мы полагаем, что выводы о влиянии инверсий температуры в ПСА на высоту слоя интенсивного турбулентного теплообмена, сделанные по этим интервалам времени, можно считать достаточно адекватными. Более детально статистика различных форм температурных инверсий в ПСА приведена во второй части статьи.

Коротко представим результаты сопоставления температур в нижней части ПСА в пунктах наблюдения за январь–февраль 2020 г. Для этого на рис. 6 (цв. вкладка) показаны разности температур $\delta T = T_{\text{ИОА}} - T_{\text{БЭК}}$, измеренных приборами МТР-5, в сопоставимые интервалы времени (на уровнях до 300 м с шагом по высоте 50 м, без идентификации высот), а также приведена зависимость δT от времени суток на высотах 0 и 300 м. Напомним, что уровень 0 м в пункте «ИОА» соответствует высоте ~ 17 м над подстилающей поверхностью, а в «БЭК» — ~ 4 м.

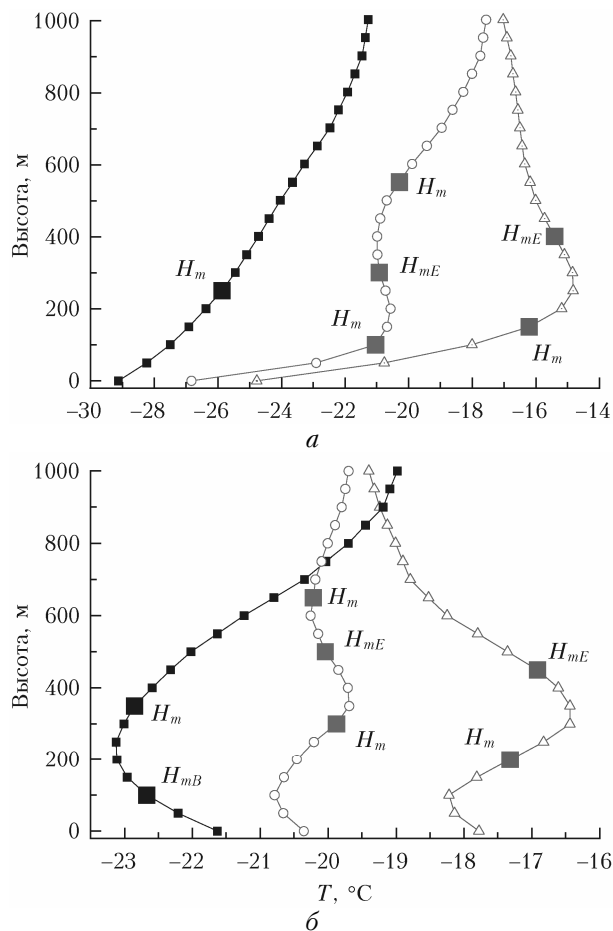


Рис. 5. Профили температуры воздуха в случае приземной (а) и приподнятой (б) инверсий; большие квадраты на графиках показывают условные положения границ области интенсивного турбулентного теплообмена

Более полный анализ разностей температур с точки зрения исследования «городского острова тепла» мы планируем провести в дальнейшем с использованием накапливаемых в настоящее время экспериментальных данных. Сейчас приведенный на рис. 6 материал только показывает различия в условиях формирования турбулентного теплообмена в нижней части ПСА зимой.

Статистика высот H_m и градиентов γ_m в условиях температурных инверсий

Обратимся теперь непосредственно к анализу величин H_m и γ_m в условиях температурных инверсий. Диапазон изменения этих параметров можно охарактеризовать с помощью интегральной функции распределения (ИФР) и плотности распределения (ПР). ИФР и ПР H_m приведены на рис. 7 для пунктов «БЭК» (инверсии температуры наблюдались в слое до 1000 м в течение 611 ч) и «ИОА» (по 284-часовой выборке).

При сравнении повторяемости H_m в «БЭК» и «ИОА» в сопоставимый период суток (08:00–21:00) можно сделать вывод, что в пункте «ИОА»

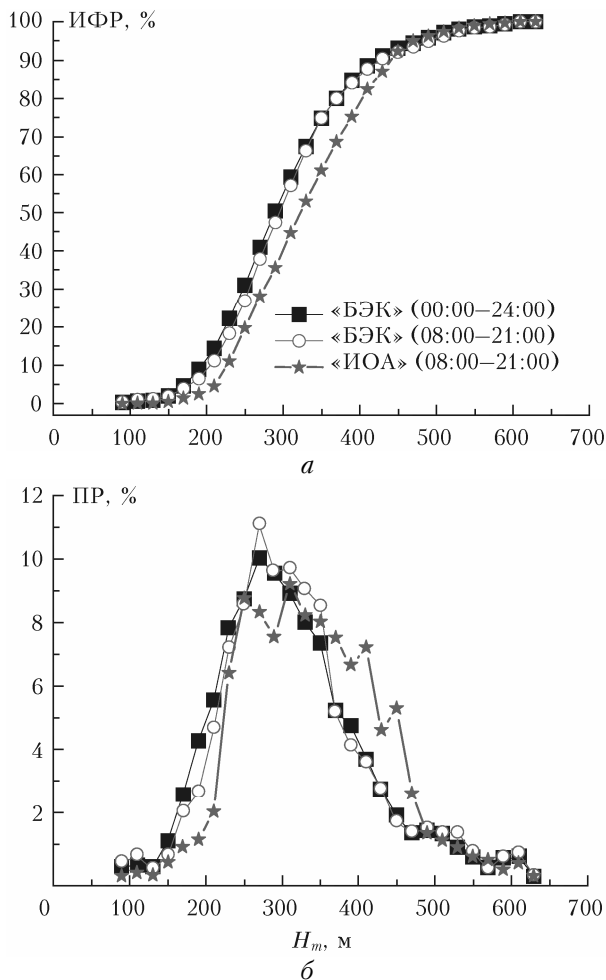


Рис. 7. Интегральные функции распределения (а) и плотности распределения (б) высот H_m в пунктах «БЭК» и «ИОА»

турбулентный теплообмен в среднем достигал несколько больших высот, чем в «БЭК» (медианное значение H_m в пункте «ИОА» — 330 м, в «БЭК» — 305 м).

Рассмотрим теперь статистику градиентов температуры γ_m , которые соответствуют H_m (только при наличии температурных инверсий!). Графики ИФР и ПР параметра γ_m для обоих пунктов наблюдения приведены на рис. 8. Обратим внимание на то, что в обоих пунктах имеется много случаев (45–50%), когда градиенты $\gamma_m \leq 0$. Это означает, что турбулентный теплообмен или не превышал нижней границы приподнятой инверсии, или полностью перекрывал область инверсии (приземной или приподнятой). Суммарная длительность полного перекрытия инверсии турбулентным теплообменом существенно различалась в сравниваемых пунктах: 49 ч в «ИОА» и 138 ч в «БЭК». В случаях многослойных инверсий (такие тоже имели место) под «полным перекрытием» мы подразумеваем перекрытие нижнего слоя. Более подробно эти варианты будут рассмотрены во второй части статьи.

Отметим также бимодальность плотности распределения γ_m в обоих пунктах (рис. 8, б). Причем

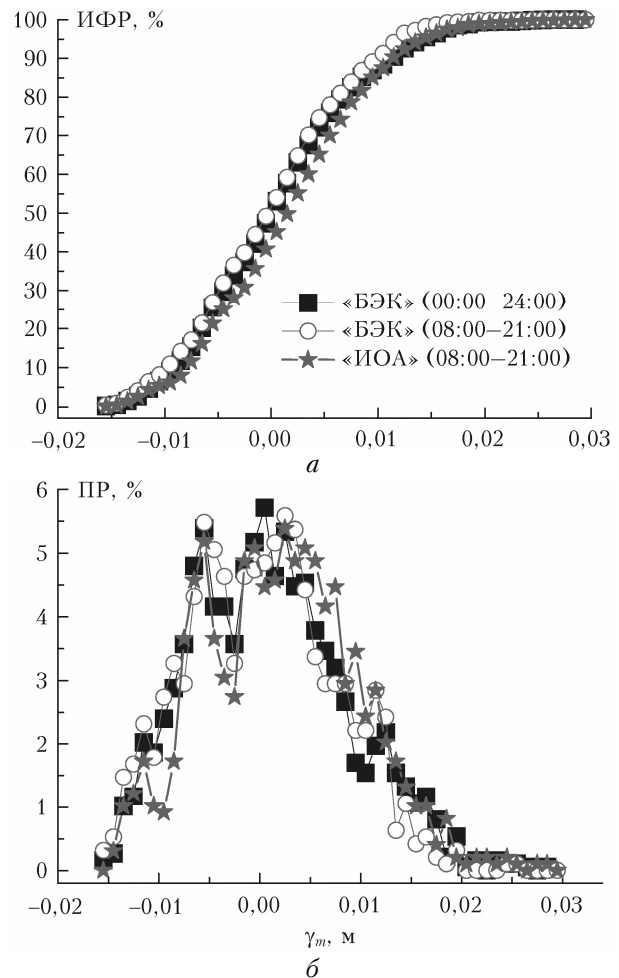


Рис. 8. Интегральные функции распределения (а) и плотности распределения (б) градиентов температуры γ_m на высотах H_m в пунктах «БЭК» и «ИОА»

положение одного из локальных максимумов находится в области отрицательных значений γ_m , а второго — в области положительных. Условия, приводящие к бимодальности ПР γ_m , нами пока не исследовались.

Как уже указывалось ранее, погрешности определения градиентов температуры выше 500 м могут быть достаточно большими. Однако, судя по графикам ИФР на рис. 7, а, количество высот $H_m > 500$ м и соответствующих им значений γ_m было всего несколько процентов. Поэтому мы полагаем, что общая статистика γ_m вполне достоверна.

В качестве иллюстрации случаев «полного перекрытия» температурной инверсии турбулентным теплообменом приведем рис. 9, подготовленный по результатам работы температурно-ветрового комплекса в пункте «БЭК» (см. профиль температуры для отсчета времени 00:40). Естественно, такие случаи реализуются в основном в ситуациях с небольшими перепадами температур между границами инверсии.

В завершение статистического анализа положение верхней границы слоя интенсивного турбулентного теплообмена в ПСА и соответствующих

этой границе градиентов температуры воздуха считаем полезным представить графики взаимосвязи $\gamma_m(H_m)$ в условиях инверсии температуры воздуха. На рис. 10, а показана эта взаимосвязь для «БЭК», полученная за периоды 08:00–21:00 (открытые символы) и 00:00–08:00/21:00–24:00 (сплошные символы). Очевидно, что явного различия в поведении

$\gamma_m(H_m)$ в разное время суток нет. Функция $\gamma_m(H_m)$ для «ИОА» приведена на рис. 10, б (за период 08:00–21:00). Общая форма «облаков» экспериментальных данных на рис. 10, а, б для сравниваемых пунктов примерно совпадает, что говорит о подобии процессов формирования взаимосвязей $H_m \leftrightarrow \gamma_m$ в этих пунктах.

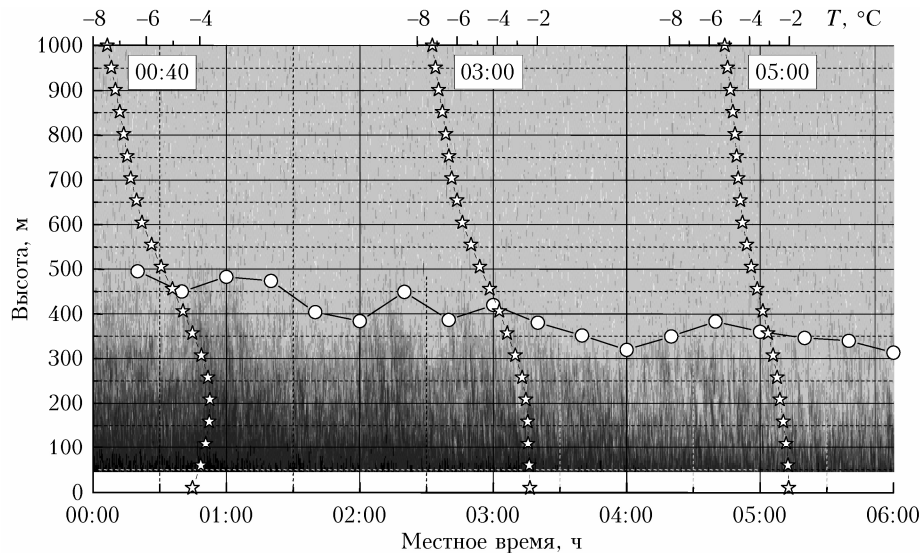


Рис. 9. Эхограммы содара с оценками высоты H_m (точки) и высотные профили температуры воздуха (звездочки) в отдельные интервалы времени; пункт «БЭК» 28.02.2020 г.

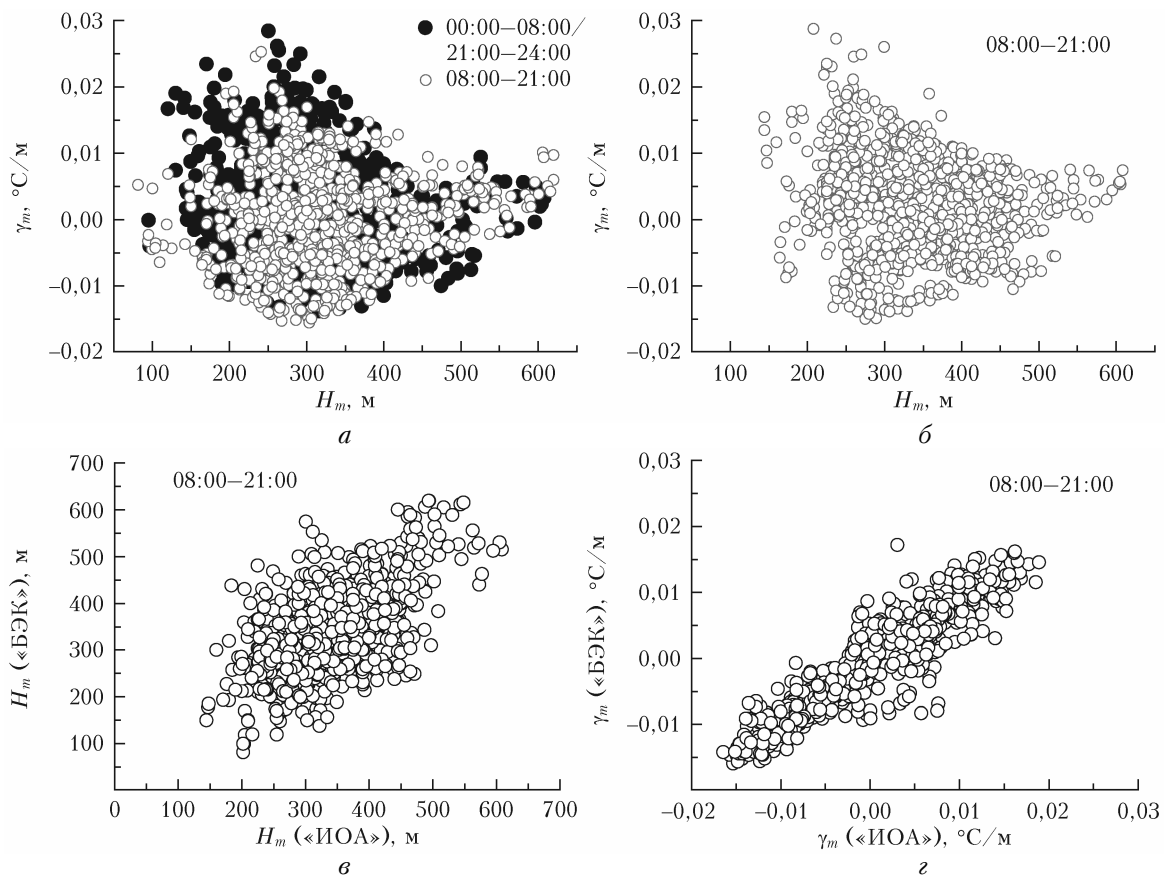


Рис. 10. Взаимосвязь высот H_m и градиентов γ_m в пунктах «БЭК» (а) и «ИОА» (б); согласованность высот H_m (в) и градиентов γ_m (г) между пунктами «ИОА» и «БЭК»

Мы также считаем важной информацию о степени согласованности оценок H_m и γ_m в «ИОА» и «БЭК» в совпадающие интервалы времени (08:00–21:00). Она представлена на рис. 10, в, г. Причем на графики нанесены оценки H_m и γ_m , полученные не только в условиях температурных инверсий, но и по всей совокупности экспериментальных данных в сопоставимые интервалы времени. Очевидна достаточно высокая степень корреляции H_m и γ_m в сравниваемых пунктах. Обратим внимание на то, что диапазон изменения градиентов γ_m на рис. 10, г несколько меньше, чем на рис. 10, а, б, потому что в отдельные периоды какой-либо из содаров температурно-ветровых комплексов не работал и сопоставление было невозможным.

Заключение

Подведем основные итоги первой части статьи. Прежде всего, отметим, что использованные для дистанционной диагностики атмосферы температурно-ветровые комплексы в составе содаров «Волна-4М», температурных профиломеров МТР-5 и УЗМ «Метео-2» являются достаточно эффективными инструментами для изучения процессов турбулентного теплообмена в ПСА. Полученные с помощью этих комплексов результаты позволили оценить высоту слоя интенсивного турбулентного теплообмена H_m , измерить и проанализировать профили температуры воздуха в ПСА, определить соответствующие высоте H_m градиенты температуры воздуха γ_m . Основное внимание было уделено случаям инверсии температуры воздуха в ПСА.

Анализ полученных за январь – февраль 2020 г. экспериментальных данных в двух различных по типу подстилающей поверхности пунктах наблюдения (урбанизированная территория и естественный ландшафт) показал, что в слое ПСА до высоты 1 км инверсии температуры воздуха присутствовали в ~65% времени (до высоты 500 м – в ~50% времени). При этом во время работы содара, по результатам которого определялись значения H_m , суммарная продолжительность инверсий в слое до 1 км составила 611 ч в пункте «БЭК» и 284 ч в пункте «ИОА». Мы полагаем, что такой продолжительности работы комплексов в условиях температурных инверсий в зимнее время достаточно для анализа и формулирования выводов по статистике H_m и γ_m .

Установлено, что при инверсиях температуры (без разделения по типам) в 90% случаев высота области интенсивного турбулентного теплообмена не превышала 430–440 м в обоих пунктах наблюдения. При этом в ~10% времени она была менее 200–220 м. «Полное перекрытие» инверсий турбулентным теплообменом наблюдалось 49 ч в пункте «ИОА» и 138 ч в пункте «БЭК». В свою очередь, градиенты γ_m , соответствующие H_m , в 90% времени не превышали значения $+0,01$ °C/м и в целом были меньше, чем $+0,03$ °C/м.

Сравнение H_m и γ_m в двух пунктах наблюдения в сопоставимые интервалы времени показало, что они достаточно близки друг другу, хотя в некоторых

случаях имеется заметное расхождение. Характеристикой различия величин H_m могут служить их медианные значения за период наблюдений в условиях температурных инверсий: 330 м в пункте «ИОА» и 305 м в пункте «БЭК».

Результаты анализа взаимосвязей высот H_m и градиентов γ_m с метеорологическими характеристиками в приземном слое атмосферы представлены во второй части статьи.

Экспериментальные данные получены с привлечением оборудования ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН. Измерение характеристик атмосферы выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-71-20042). Разработка методических аспектов проведенных исследований поддержана Минобрнауки России (проект № АААА-А17-117021310152-4).

1. Зилитинкевич С.С., Тюрков 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.
2. Dai C., Wang Q., Kalogiros J.A., Lenschow D.H., Gao Z., Zhou M. Determining boundary-layer height from aircraft measurements // Bound.-Lay. Meteorol. 2014. V. 152, N 3. P. 277–302.
3. Kurbatskii A.F., Kurbatskaya L.I. Investigation of a stable boundary layer using an explicit algebraic model of turbulence // Thermophys. Aeromechanics. 2019. V. 26, N 3. P. 335–350.
4. Holdsworth A.M., Monahan A.H. Turbulent collapse and recover in the stable boundary layer using an idealized model of pressure-driven flow with a surface energy budget // J. Atmos. Sci. 2019. V. 76, N 5. P. 1307–1327.
5. Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Лукин В.П., Томин В.Е. Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 12. С. 994–1000; Shikhovtsev A.Yu., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Lukin V.P., Tomin V.E. Method for estimating the altitudes of atmospheric layers with strong turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 3. P. 295–301.
6. Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Большасова Л.А., Лукин В.П. Особенности формирования наклонных волнового фронта на апертуре телескопа при различных вертикальных профилях оптической атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 10. С. 819–823; Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Bol'basova L.A., Lukin V.P. Features of the formation of wavefront slopes on the telescope aperture at different vertical profiles of optical atmospheric turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 2. P. 141–145.
7. Аксенов В.П., Дудоров В.В., Колосов В.В. Атмосферная сингулярная оптика: от дислокаций волнового фронта до синтеза вихревых лазерных пучков // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 792–798; Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V. Singular atmospheric optics: From wavefront dislocations to synthesis of vortex laser beams // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 1. P. 109–115.
8. Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V. Determination of the structure characteristic of refractive index of optical waves in the atmospheric boundary layer with remote acoustic sounding facilities // Atmos. 2019. V. 10, iss. 11 (711).
9. Casasanta G., Pietroni I., Petenko I., Argentini S. Observed and modelled convective mixing-layer height

- at Dome C, Antarctica // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2014. V. 151, N 3. P. 597–609.
10. *Petenko I., Argentini S., Casasanta G., Genthon C., Kallistratova M.* Stable surface-based turbulent layer during the polar winter at Dome C, Antarctica: Sodar and *in situ* observations // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2019. V. 171, N 1. P. 101–128.
 11. *Van der Linden S.J.A., Edwards J.M., Van Heerwaarden Ch.C., Vignon E., Genthon C., Petenko I., Baas P., Jonker H.J.J., Van de Wiel B.J.H.* Large-eddy simulations of the steady wintertime Antarctic boundary layer // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2019. V. 173, N 2. P. 165–192.
 12. *Kokkalis P., Alexiou D., Papayannis A., Rocadenbosch F., Soupiona O., Raptis P.-I., Mylonaki M., Tzani C.G., Christodoulakis J.* Application and testing of the Extended–Kalman–Filtering technique for determining the planetary boundary-layer height over Athens, Greece // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 176, N 1. P. 125–147.
 13. *Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Терпугова С.А., Банак В.А., Смалыхо И.Н., Фалиц А.В., Рассказчикова Т.М., Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б.* Структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным аэрозольного и доплеровского лидаров в период прохождения атмосферных фронтов // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 679–688; *Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Penner I.E., Samoilovala S.V., Terpuгова S.A., Banakh V.A., Smalikhov I.N., Falits A.V., Rasskazchikova T.M., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B.* Structure of aerosol fields of the atmospheric boundary layer according to aerosol and doppler lidar data during passage of atmospheric fronts // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 18–32.
 14. *Huang M., Gao Z., Miao S., Chen F., LeMone M.A., Li J., Hu F., Wang L.* Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using doppler lidar data during SURF-2015 // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2017. V. 162, N 3. P. 503–522.
 15. *Камардин А.П., Коханенко Г.П., Невзорова И.В., Пеннер И.Э.* Совместные исследования структуры пограничного слоя атмосферы на основе лидарных и содарных измерений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 6. С. 534–537.
 16. *Hemingway B.L., Frazier A.E., Elbing B.R., Jacob J.D.* High-resolution estimation and spatial interpolation of temperature structure in the atmospheric boundary layer using a small unmanned aircraft system // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 175, N 3. P. 397–416.
 17. *Baserud L., Reuder J., Jonassen M.O., Bonin T.A., Chilson P.B., Jiménez M.A., Durand P.* Potential and limitations in estimating sensible-heat-flux profiles from consecutive temperature profiles using remotely-piloted aircraft systems // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2020. V. 174, N 1. P. 145–177.
 18. *Balsley B.B., Lawrence D.A., Fritts D.C., Wang L., Wan K., Werne J.* Fine structure, instabilities, and turbulence in the lower atmosphere: High-resolution *in situ* slant-path measurements with the DataHawk UAV and comparisons with numerical modeling // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2018. V. 35, N 3. P. 619–642.
 19. *Danchovski V.* Summertime urban mixing layer height over Sofia, Bulgaria // *Atmos.* 2019. V. 10, iss. 1 (36).
 20. *Камардин А.П., Гладких В.А., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Метеорологический акустический доплеровский локалатор (содар) «Волна-4М-СТ» // *Приборы.* 2017. № 4 (202). С. 37–44.
 21. *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.
 22. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
 23. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7. С. 21–25.
 24. *Камардин А.П., Одинцов С.Л.* Высотные профили структурной характеристики температуры воздуха в пограничном слое атмосферы по содарным измерениям // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 709–714; *Kamardin A.P., Odintsov S.L.* Height profiles of the structure characteristic of air temperature in the atmospheric boundary layer from sodar measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 33–38.
 25. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В.* Использование результатов акустической диагностики пограничного слоя атмосферы для оценки влияния турбулентности на характеристики лазерного пучка // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1008–1016; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Results of acoustic diagnostics of atmospheric boundary layer in estimation of the turbulence effect on laser beam parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 553–563.
 26. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
 27. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 3. С. 212–220; *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.
 28. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В.* Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Показатель преломления // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 821–828. *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Estimates of the refractive index and regular refraction of optical waves in the atmospheric boundary layer: Part 1, Refractive index // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 437–444.

S.L. Odintsov, V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, I.V. Nevzorova. **Height of the zone of intense turbulent heat exchange in the stably stratified atmospheric boundary layer. Part 1: Estimation technique and statistics.**

The height of the zone of intense turbulent heat exchange in the atmospheric boundary layer is analyzed from experimental data obtained with acoustic meteorological lidars (sodars), temperature profilometers, and sonic anemometers/thermometers. The main purpose of the work is to study the turbulent heat exchange under conditions of temperature inversions in the winter season. The results obtained at a territory with natural landscape and an urban territory in January–February 2020 are considered. Part 1 of the work describes the technique used to obtain experimental data and the statistics of temperature inversions in the boundary layer and heights of the layer of intense turbulent heat exchange. The relation of these heights and the corresponding air temperature gradients to the surface values of the wind speed and the vertical turbulent heat flux are analyzed in Part 2.

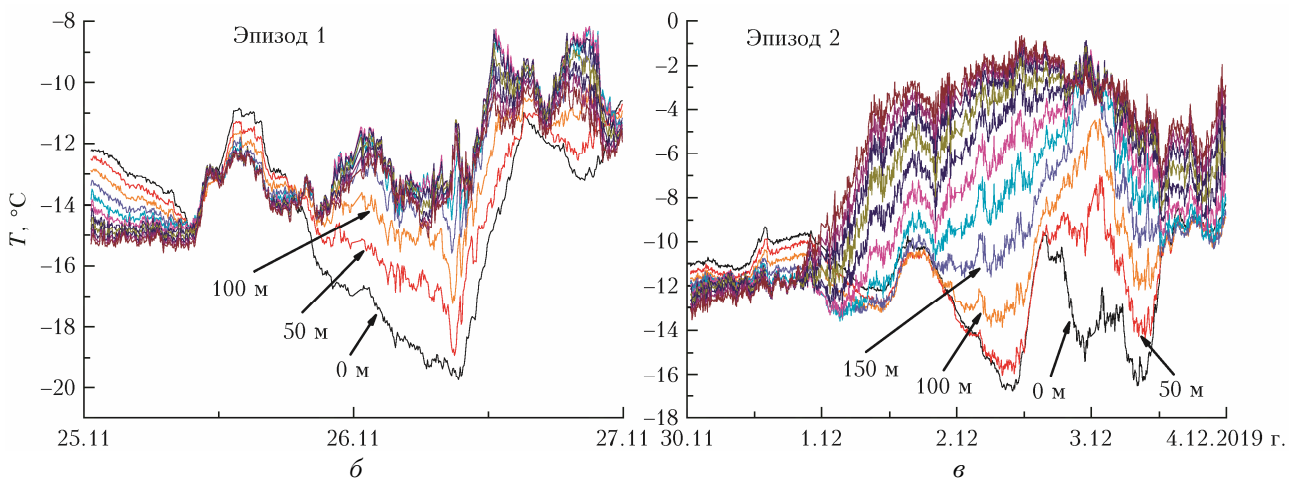
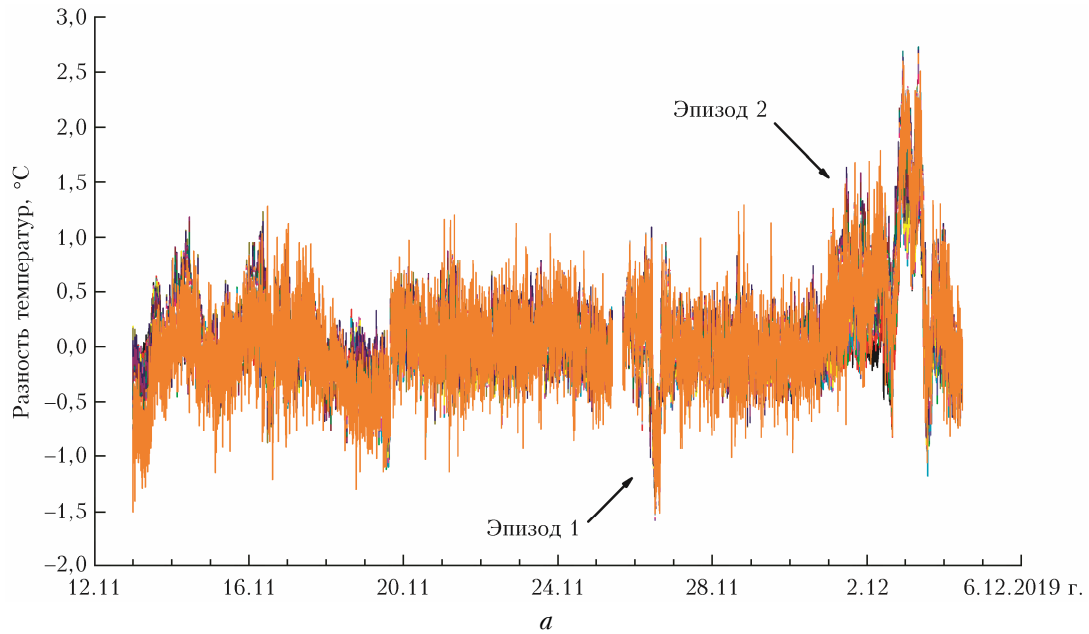


Рис. 2. Разность температур, измеренных приборами МРТ-5 при взаимной калибровке в пункте «ИОА» (а); температура воздуха для эпизодов 1 (б) и 2 (в) на разных высотах

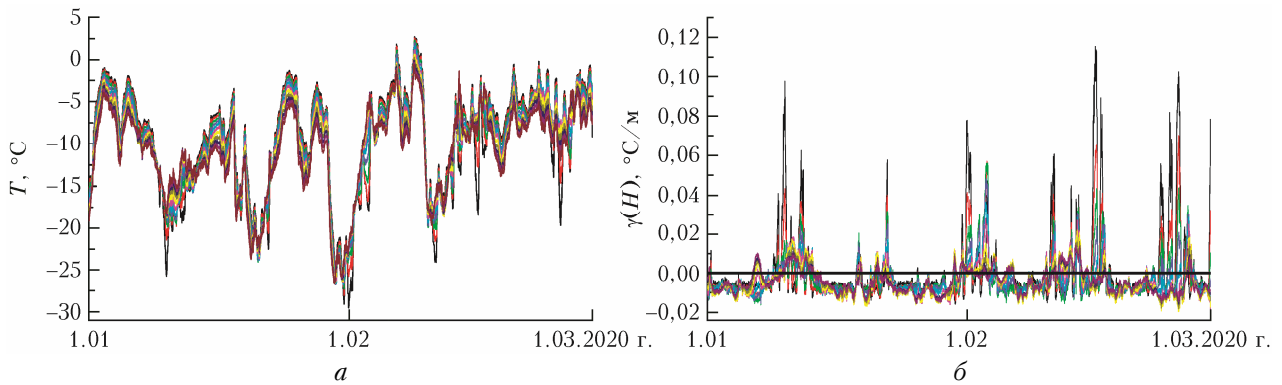


Рис. 3. Температура воздуха (а) и ее градиенты (б) до высоты 500 м, измеренные МРТ-5 в пункте «БЭК»; горизонтальная линия соответствует нулевому значению градиента

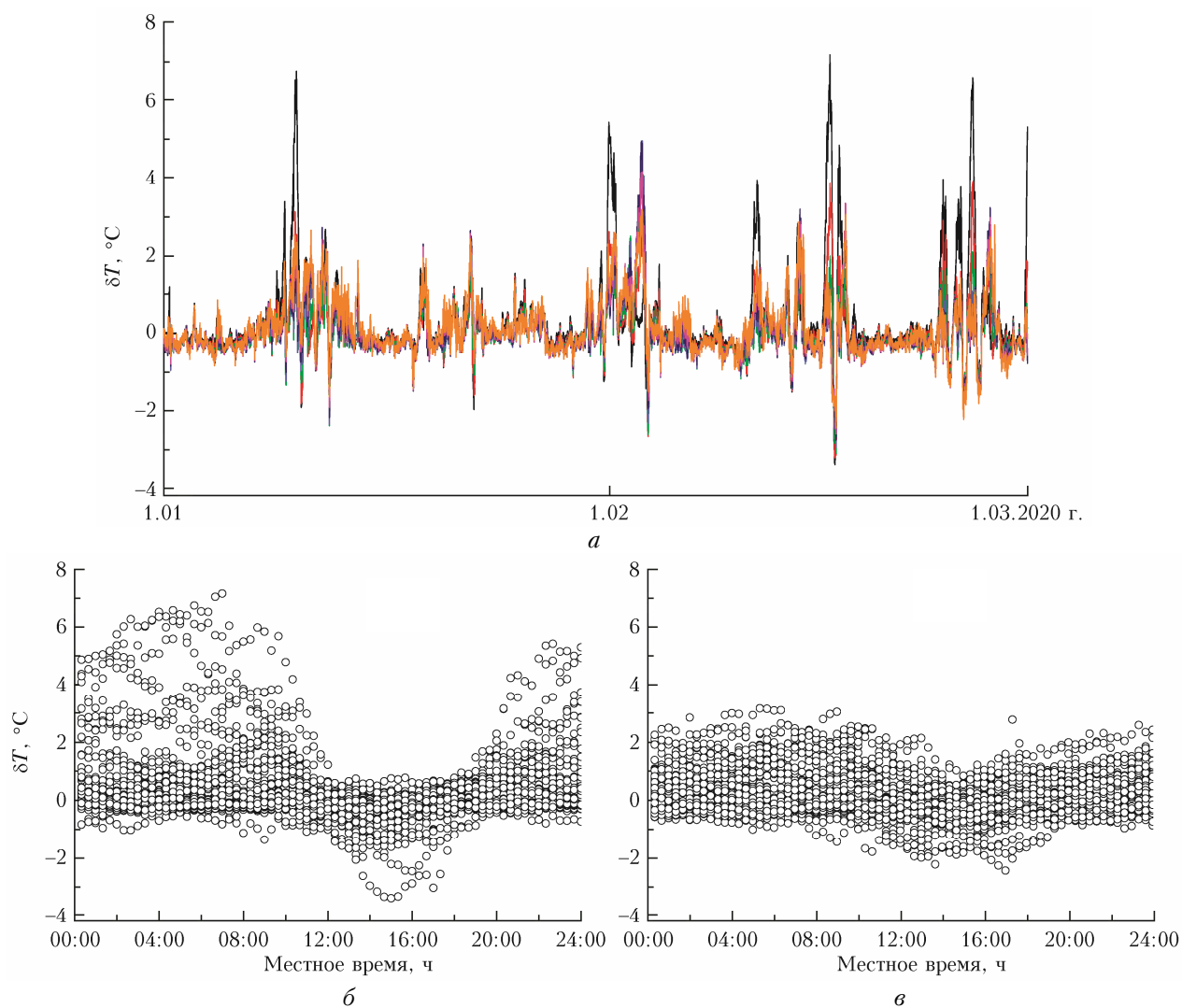


Рис. 6. Разность температур между пунктами «ИОА» и «БЭЖ» в пределах высот до 300 м (*a*); суточный ход разности температур на высотах 0 (*б*) и 300 м (*в*)