

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 2: Взаимосвязь с приземными
метеорологическими параметрами**

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

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

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

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.

Вторая часть статьи посвящена анализу взаимосвязи высот области интенсивного турбулентного обмена и соответствующих им градиентов температуры в пограничном слое атмосферы с приземными значениями скорости ветра и вертикального турбулентного потока тепла. Рассматриваются только случаи инверсий температуры зимой (январь-февраль 2020 г.). Вводится разделение инверсий на два типа (приземные и приподнятые) и четыре формы; для них получена статистика высоты области турбулентного теплообмена. По итогам анализа сделан вывод, что в условиях температурных инверсий отсутствует прямая (хорошо выраженная) связь между высотой слоя интенсивного турбулентного теплообмена и приземными значениями скорости ветра и турбулентного потока тепла.

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

Введение

При моделировании структуры пограничного слоя атмосферы (ПСА) во многих работах для параметризации процессов и полей используются подходы на основе сведений о приземных значениях различных метеорологических параметров. В частности, высота ПСА (обозначим ее H_{PBL}) оценивается с помощью приземных значений вертикального турбулентного потока тепла, дисперсии температуры, скорости ветра или «производных» от нее — скорости трения (динамической скорости), кинетической энергии турбулентности и/или скорости ее диссипации и т.д. (см., например, [1–9] и обзоры литературы в них). Однако практически все исследователи подчеркивают, что в случаях температурных инверсий методика определения H_{PBL} требует улучшения.

Под пограничным слоем подразумевается область, где присутствуют турбулентные потоки тепла

и импульса без четкого разделения пространственно-временной структуры этих факторов. Зоны с интенсивным турбулентным теплообменом (обозначим высоту таких зон, H_m) и с интенсивным переносом импульса (H_R) перекрывают друг друга. При этом для них далеко не всегда справедливо равенство $H_m = H_R$. Понятно, что должно выполняться условие $H_{PBL} = \max\{H_m, H_R\}$. Как правило, имеет место неравенство $H_m < H_R$, и поэтому обычно полагается, что $H_{PBL} = H_R$. Это подтверждают результаты обработки экспериментальных данных, полученных при комплексном исследовании ПСА, например, с использованием лидаров, радиозондов, содаров [8–18]. В частности, лидары контролируют области с повышенным содержанием аэрозоля, перераспределение которого происходит в основном под влиянием ветровой турбулентности. Поэтому лидарные методы обеспечивают оценку $H_{PBL} = H_R$. Результаты работы радиозондов используются, например, для оценок высотных профилей чисел Ричардсона. По их величине определяется уровень, выше которого поток ветра считается ламинарным. Следовательно, и эта методика дает оценки $H_{PBL} = H_R$. Только содары (метеорологические акустические локаторы) в настоящее время способны обеспечить непосредственную оценку H_m .

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

Наиболее оптимальным для прогноза состояния ПСА был бы вариант, когда на основе каких-либо известных приземных значений параметров можно с удовлетворительной точностью восстановить (спрогнозировать) высотно-временные профили интересующих характеристик ПСА, пользуясь установленными с помощью эмпирических (или теоретических) исследований взаимосвязями высотных и приземных данных. Желательно иметь возможность оценивать высоту $H_{PBL} = \max\{H_m, H_R\}$. Однако в настоящее время для условий устойчивой стратификации качество параметризации таких взаимосвязей, по нашему мнению, неудовлетворительное.

Общая цель работы заключается в исследовании турбулентного теплообмена в ПСА в условиях температурных инверсий зимой. В первой части статьи [19] была изложена методическая основа получения данных о высоте H_m и о соответствующих этой высоте градиентах γ_m абсолютной температуры воздуха, а также приведена общая статистика этих параметров. Цель второй части статьи — анализ взаимосвязей величин H_m и γ_m со скоростью ветра V_h и турбулентным потоком тепла Q_t вблизи подстилающей поверхности для проверки возможности использования этих параметров в оценках (прогнозах) H_m и γ_m . При этом не подразумевается, что $H_{PBL} = H_m$, т.е. не следует отождествлять высоту H_m с высотой пограничного слоя. Отметим, что исследование H_m содарами проводилось, например, в [8–13].

Оборудование, места и режимы измерений

Основой для анализа служат экспериментальные данные, полученные с помощью температурно-ветровых комплексов, работавших в январе-феврале 2020 г. в пункте наблюдения «Базовый экспериментальный комплекс» (пункт «БЭК»; естественный ландшафт) Института оптики атмосферы (ИОА) им. В.Е. Зуева СО РАН и на территории Академгородка (окраина г. Томска; урбанизированная территория; пункт «ИОА»). В температурно-ветровой комплекс входили: содар «Волна-4М», температурный профилемер МТР-5, ультразвуковые метеостанции (УЗМ) «Метео-2». Более подробная информация об их технических характеристиках и о режиме работы приведена в [19–23].

Напомним, что анализ для пункта «ИОА» проводился только для периода 08:00–21:00 по местному времени, когда входящий в состав комплекса содар работал в активном режиме. Остальные приборы работали круглосуточно. Всего в этом пункте было обработано 505 ч наблюдений, из которых 284 ч в ПСА в диапазоне 0–1000 м наблюдались инверсии температуры воздуха (приземные или приподнятые). В пункте «БЭК» комплекс мог работать круглосуточно. Общее время, доступное для анализа в этом пункте, составило 888 ч, из которых 611 ч присутствовали температурные инверсии.

Типы и формы температурных инверсий

Прежде чем перейти к анализу взаимосвязей H_m и γ_m с метеорологическими параметрами, рассмотрим более подробно статистику типов и форм температурных инверсий за январь-февраль 2020 г. На рис. 1 приведены модельные профили абсолютной температуры воздуха, соответствующие реальным в рассматриваемый период. Температурные инверсии были разделены на два типа. Тип 1 соответствовал приземным инверсиям (рис. 1, а), а тип 2 — приподнятым (рис. 1, б). В свою очередь, каждый из типов был разделен на четыре формы, обозначенные на рис. 1 цифрами. Далее в тексте встречаются обозначения («индексы») инверсий в виде, например, «24», что означает тип инверсии 2 в форме 4 (график 4 на рис. 1, б).

Статистика разных типов и форм температурных инверсий в пунктах наблюдения приведена

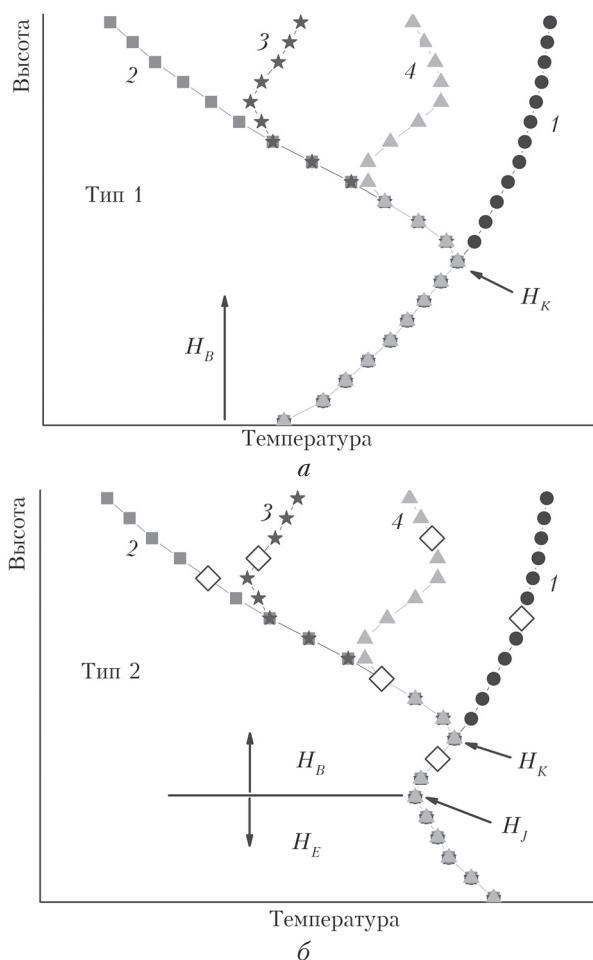


Рис. 1. Модельные профили абсолютной температуры воздуха типа 1 (приземные инверсии) (а) и типа 2 (приподнятые инверсии) (б); цифрами обозначены различные формы инверсии; открытые символы на графиках — примеры положения высоты H_m слоя интенсивного турбулентного теплообмена на профилях температуры; остальные обозначения см. в тексте статьи

в табл. 1. В ней представлены суммарные длительности (часы, округленно) тех или иных форм инверсий.

Таблица 1

Статистика температурных инверсий – суммарные длительности реализации (диагностика по слою 0–1 км)

Тип	Форма				Всего
	1	2	3	4	
<i>Пункт «ИОА» (08:00–21:00)</i>					
1	3	35	1	13	52
2	67	156	7	2	232
<i>Пункт «БЭК» (00:00–24:00)</i>					
1	25	121	22	77	245
2	120	218	6	22	366

Согласно приведенным в табл. 1 результатам в слое 0–1 км доминировали инверсии в форме 2, т.е. однослойные инверсии, ограниченные по высоте (индексы «12» и «22»). Дополнительно укажем, что двухслойные инверсии чаще всего имели место в случае приземных инверсий (индекс «14») и редко встречались в случае приподнятых инверсий (индекс «24»).

Отметим также, что инверсий типа 1 в пункте «ИОА» было существенно меньше, чем в пункте «БЭК». Это обусловлено, по-видимому, двумя причинами. Первая заключается в том, что измерения в пункте «ИОА» велись только с 08:00 до 21:00, когда к началу измерений процессы трансформации приземных инверсий уже активизировались под воздействием прогрева солнцем подстилающей поверхности (покрытой снегом). Результаты для «БЭК» включали в себя и ночные условия, при которых наиболее вероятна реализация приземных инверсий. Вторая причина – влияние антропогенных источников тепла на территории, где расположен пункт «ИОА».

Естественно, что в суточном ходе высотных профилей температуры воздуха один тип инверсии трансформируется в другой, проходя через различные формы, выделенные нами. Детальное изучение таких процессов, безусловно, важно для уточнения алгоритмов прогнозирования состояния ПСА. Однако на этом этапе работы мы не занимались решением вышеупомянутой проблемы, ограничиваясь только анализом «проникновения» турбулентного теплообмена в температурные инверсии. Специфика анализа заключается в том, что рассматриваются зимние условия, когда на подстилающей поверхности наблюдается снежный покров, а ее прогрев солнечным излучением и турбулентный теплообмен в приземном слое имеют свои особенности.

В [19] уже отмечалось значительное число случаев, когда на высоте H_m выполнялось неравенство $\gamma_m \leq 0$, т.е. турбулентный теплообмен или не проникал в инверсию температуры, или полностью «охватывал» ее. Первый случай относится к приподнятым инверсиям (тип 2). На рис. 1, б эта область находится ниже горизонтальной линии (область H_E). Высота нижней границы слоя инверсии

отмечена как H_J . Далее будем полагать, что при инверсиях типа 1 выполняется равенство $H_J = 0$. Верхняя граница нижнего слоя инверсии обозначена на рис. 1 как H_K (для обоих типов инверсии). Рассмотрим три варианта положения высоты H_m на профиле температуры. Под вариантом 1 будем понимать случаи, при которых выполняются неравенства $H_J < H_m < H_K$ ($\gamma_m > 0$), т.е. турбулентный теплообмен «проникает» в температурную инверсию, но не достигает ее верхней границы.

В области H_B , содержащей инверсию, значения $\gamma_m \leq 0$ могут быть отрицательными. Это подразумевает полное перекрытие нижнего слоя инверсии турбулентным теплообменом и выполнение неравенства $H_m \geq H_K$ (вне зависимости от типа и формы инверсии). Обозначим этот случай как вариант 2.

В области H_E (см. рис. 1, б) выполняются неравенства $H_m \leq H_J$ и $\gamma_m \leq 0$, т.е. турбулентный теплообмен не проникает в температурную инверсию – это вариант 3 положения верхней границы области интенсивного турбулентного теплообмена.

Сводка продолжительности тех или иных вариантов положения высоты H_m на профилях температуры в пунктах «ИОА» и «БЭК» приведена в табл. 2. Обратим внимание на то, что в обоих пунктах в случае приземных инверсий (тип 1) варианты 1 и 2 реализовывались в течение примерно одинакового времени. Это означает, что перекрытие приземных инверсий турбулентным теплообменом – обычный факт.

Таблица 2

Продолжительность различных вариантов положения высоты области турбулентного теплообмена H_m в слое 0–1 км (часы, округленно)

Тип/длительность инверсии	Вариант			
	1	2	1 + 2	3
<i>Пункт «ИОА» (08:00–21:00)</i>				
1/52	26	26	52	–
2/232	122	23	145	87
1 + 2/284	148	49	197	87
<i>Пункт «БЭК» (00:00–24:00)</i>				
1/245	122	123	245	–
2/366	151	15	166	200
1 + 2/611	273	138	411	200

Согласно результатам в табл. 2 повторяемость интересовавших нас в первую очередь вариантов 1 и 2 (197 ч в пункте «ИОА» и 411 ч в «БЭК») в целом позволяет провести для них статистически обеспеченный анализ взаимосвязей величин H_m и γ_m с метеорологическими параметрами в приземном слое. Только в пункте «ИОА» случаи приземной инверсии (тип 1) реализовывались относительно редко (всего 52 ч), и выводы по этим случаям могут быть только оценочными.

Результаты и обсуждение

В [19] уже приведен краткий обзор метеорологических ситуаций, в условиях которых проводились измерения с помощью температурно-ветровых

комплексов. Коротко напомним эти результаты. На рис. 2 приведены графики скоростей ветра V_h в пунктах «ИОА» (17 м) и «БЭК» (10 м) и их интегральные функции распределения (ИФР) как по всему периоду, так и только за время присутствия в ПСА температурных инверсий (всех типов и форм). Несмотря на существенное различие в структуре подстилающей поверхности и расстояние между пунктами (более 3 км), статистика скорости ветра в обоих пунктах примерно одинакова (иногда в «БЭК» скорость ветра была больше, чем в «ИОА»).

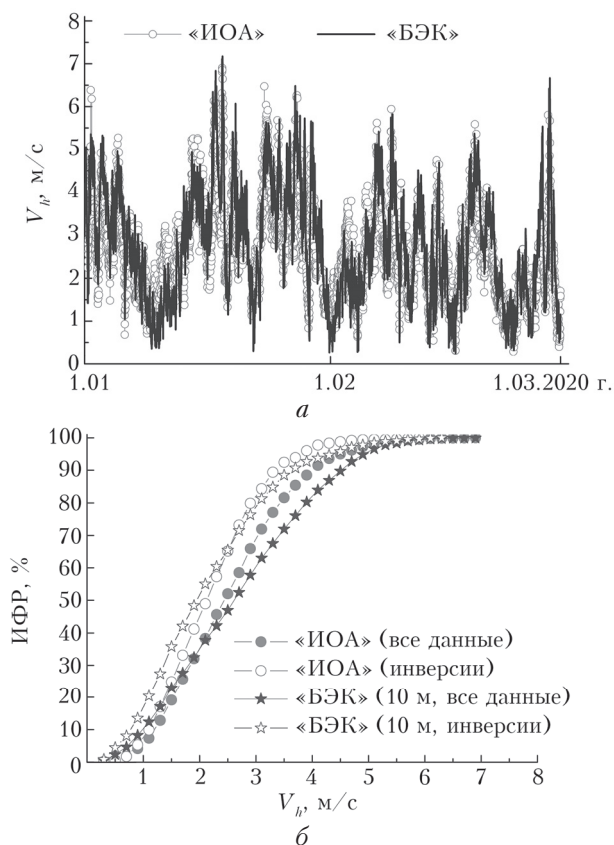


Рис. 2. Скорость ветра в пунктах «ИОА» и «БЭК» (а); интегральные функции распределения скорости ветра в разных условиях (б)

Кратко представим результаты оценок вертикальных турбулентных потоков тепла Q_t , рассчитанных по измерениям с помощью ультразвуковых метеостанций. Напомним, что пункт «ИОА» относится к урбанизированной территории, где в формировании Q_t активную роль играют антропогенные источники тепла. На рис. 3 приведены графики Q_t в пунктах «ИОА» и «БЭК» за весь период, без выделения эпизодов с присутствием в ПСА температурных инверсий. Методика оценок Q_t изложена, например, в [24]. Обратим внимание на то, что суточный ход Q_t не так явно выражен, как это обычно бывает в теплый период года.

Очевидно существенное различие в поведении приземных значений Q_t в сравниваемых пунктах,

которое должно приводить и к отличию профилей температуры в нижней части ПСА, в частности, к зависимости градиентов температуры от величины потока тепла. Этот вывод иллюстрирует рис. 4, на котором показана взаимосвязь «приземного градиента» $\gamma_{50} = [T(50) - T(0)]/50$ (нормированной разности температур между уровнями 0 и 50 м) с величиной Q_t .

Согласно приведенным на рис. 4 результатам в пункте «БЭК» практически отсутствовали случаи,

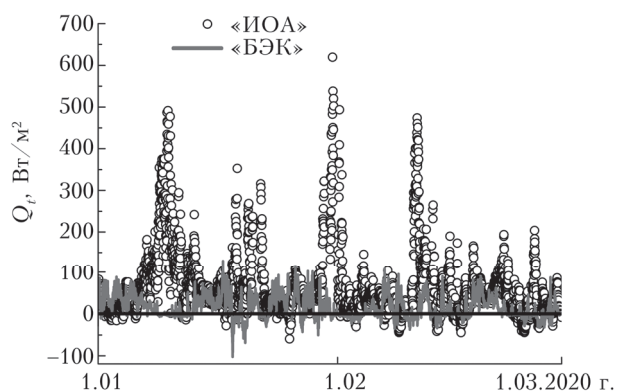


Рис. 3. Вертикальный турбулентный поток тепла в двух пунктах наблюдения

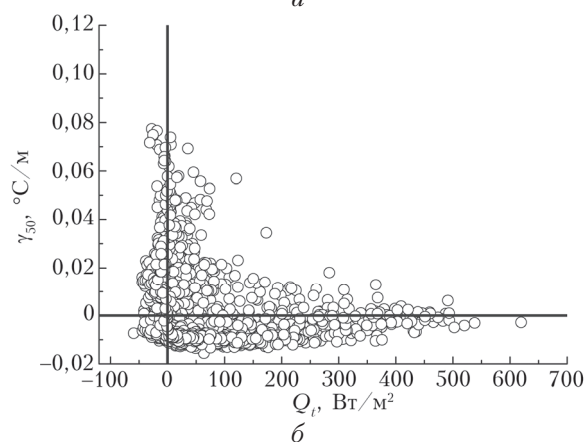
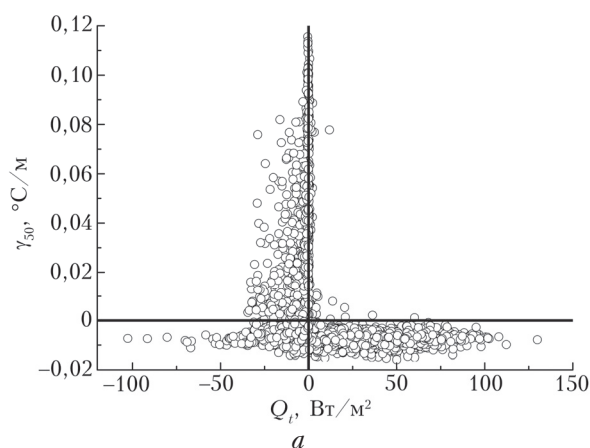


Рис. 4. Взаимосвязь градиента температуры в приземном слое с вертикальным турбулентным потоком тепла в пунктах «БЭК» (а) и «ИОА» (б)

когда при $Q_t > 0$ в нижнем слое атмосферы наблюдалась приземная инверсия температуры ($\gamma_{50} > 0$). В пункте «ИОА», наоборот, было много случаев, когда в условиях приземной инверсии ($\gamma_{50} > 0$) присутствовали значительные положительные потоки Q_t , генерируемые антропогенными источниками тепла. Но этими источниками создавались только *локальные* потоки. В общем же осредненный по некоторой площади вертикальный турбулентный поток тепла, определяющий в целом температуру в слое 0–50 м, был, вероятно, гораздо меньше и не мог разрушить имеющиеся приземные инверсии температуры, уменьшая только градиенты температуры в этом слое. Хотя имел место своего рода «городской остров тепла», как это следует из рис. 6 в [19], где представлены разности температур между «ИОА» и «БЭК» в рассматриваемый период.

Перейдем непосредственно к обзору результатов анализа взаимосвязей высот H_m и соответствующих им градиентов температуры γ_m со скоростями ветра V_h и турбулентными потоками тепла Q_t в приземном слое. Общее представление о взаимосвязи $H_m(V_h)$ для различных типов инверсий и их вариантов в пункте «БЭК» показано на рис. 5, а, б. Графики построены в едином масштабе для лучшего визуального восприятия. Согласно приведенным результатам приземные инверсии (тип 1, рис. 5, а) имели место только при V_h , не превышавших 3 м/с. В свою очередь, приподнятые инверсии

(тип 2, рис. 5, б) могли существовать практически при любых значениях V_h в период наблюдений. Но «проникать» в инверсионный слой турбулентный теплообмен мог только при скоростях ветра менее 4 м/с (за редким исключением). В целом же можно сделать вывод, что несмотря на просматриваемую тенденцию увеличения H_m с увеличением скорости ветра V_h хорошо сформированной зависимости $H_m(V_h)$, поддающейся какой-либо параметризации, нет. Аналогичный вывод справедлив и для пункта «ИОА» (оставим этот вывод без иллюстрации).

Рассмотрим теперь результаты, связанные с зависимостями $\gamma_m(V_h)$ (рис. 5, в, з). Еще раз отметим, что в случае приземной инверсии очень часто имело место полное «перекрытие» инверсионного слоя турбулентным теплообменом (тип 1, вариант 2, рис. 5, в). Речь идет о профилях температуры в формах 2–4 согласно рис. 1, а. При этом турбулентный теплообмен мог проникать и во второй слой инверсии (формы 3 и 4), особенно при реализации профиля температуры в форме 4 (см. табл. 1). Такие же закономерности наблюдались и в пункте «ИОА», где, однако, имеет место слабая статистическая обеспеченность подобных выводов (всего 52 ч наблюдений). Мы считаем полученный результат одним из основных в нашей работе, поскольку обычно полагается, что турбулентный теплообмен существует только под слоем инверсии (как вариант 3 на рис. 5, з) или не очень «глубоко»

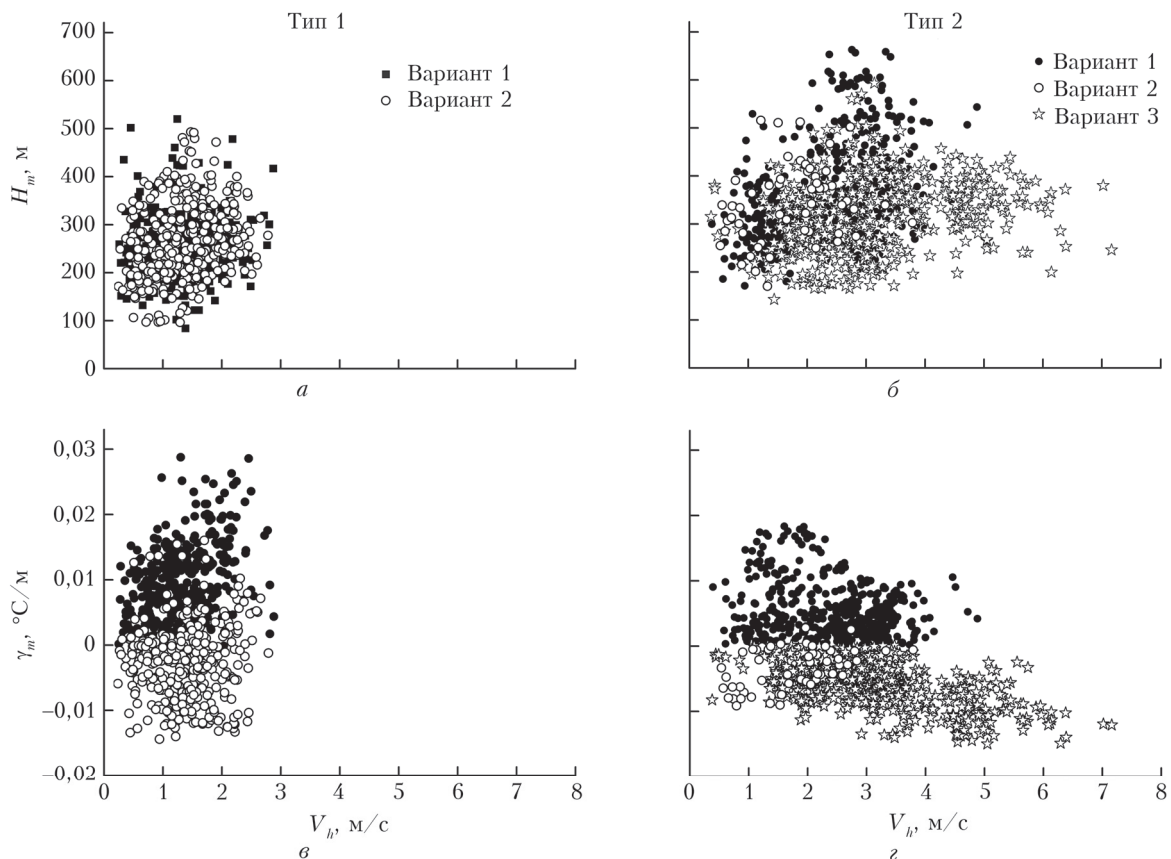


Рис. 5. Зависимость H_m (а, б) и γ_m (в, з) от V_h в приземном слое для приземных (а, в) и приподнятых (б, з) инверсий температуры воздуха в пункте «БЭК»

проникает в него. Естественно, что турбулентный теплообмен должен разрушать слой приземной инверсии (или уменьшать в нем градиенты температуры). Отдельный вопрос о том, как долго может существовать приземная инверсия при полном перекрытии упомянутого слоя турбулентным теплообменом, в настоящей работе не рассматривается.

В случае приподнятых инверсий (тип 2, рис. 5, *з*) повторяемость перекрытия инверсии турбулентным теплообменом существенно меньше. В целом же зависимость γ_m от V_h выражена слабо, если не считать вариант 3 на рис. 5, *з* (турбулентный теплообмен только под слоем приподнятой инверсии). Но подробный анализ этого варианта не вошел в круг наших задач. Можно также отметить некоторую тенденцию увеличения значений γ_m (по абсолютной величине) в диапазоне скоростей примерно 1–3 м/с. То есть при этих скоростях турбулентный теплообмен мог «проникать» в инверсию с более «крутыми» градиентами температуры воздуха.

Подводя итог анализа взаимосвязей H_m и γ_m со скоростью ветра V_h в приземном слое, подчеркнем, что в обоих пунктах эти взаимосвязи выражены слабо и возможность их удовлетворительной параметризации практически отсутствует. Можно предположить, что более существенное влияние на величины H_m и γ_m оказывает скорость ветра (или ее профиль) во всей толще ПСА, а не только в его приземном слое. К подробному решению этой зада-

чи мы планируем перейти в дальнейших работах. Предварительные результаты получены для пункта «ИОА» и готовятся к публикации в [25].

Рассмотрим теперь взаимосвязь H_m и γ_m с приземным вертикальным турбулентным потоком тепла Q_t . Здесь мы также будем в основном оперировать результатами, полученными в «БЭК» (из-за хорошей статистической обеспеченности оценок и круглосуточной работы температурно-ветрового комплекса). Сразу отметим, что приземные инверсии температуры в этом пункте (тип 1) присутствовали только в случае отрицательных или близких к нулю значений Q_t (за исключением единичных эпизодов). При этом H_m практически не зависела от величины потока, изменяясь в пределах (примерно) 100–500 м. Приподнятые инверсии (тип 2) имели место при всех наблюдавшихся значениях потока Q_t . Его увеличение (в положительной области) способствовало росту значений H_m . Хотя четко выраженной связи $H_m(Q_t)$ практически не было. Эти выводы иллюстрирует рис. 6, *а*, *б*. Они приведены в едином масштабе для удобства сравнения.

Взаимосвязь γ_m с Q_t в пункте «БЭК» практически отсутствовала. Можно лишь отметить, что приподнятые инверсии (тип 2) имели место в основном при положительных значениях Q_t , и чем больше было Q_t , тем меньшие значения принимал параметр γ_m «внутри» инверсий (вариант 2 для типа 2), стремясь к пределу при $\gamma_m \approx 0,01$ (°C/м). Эти выводы

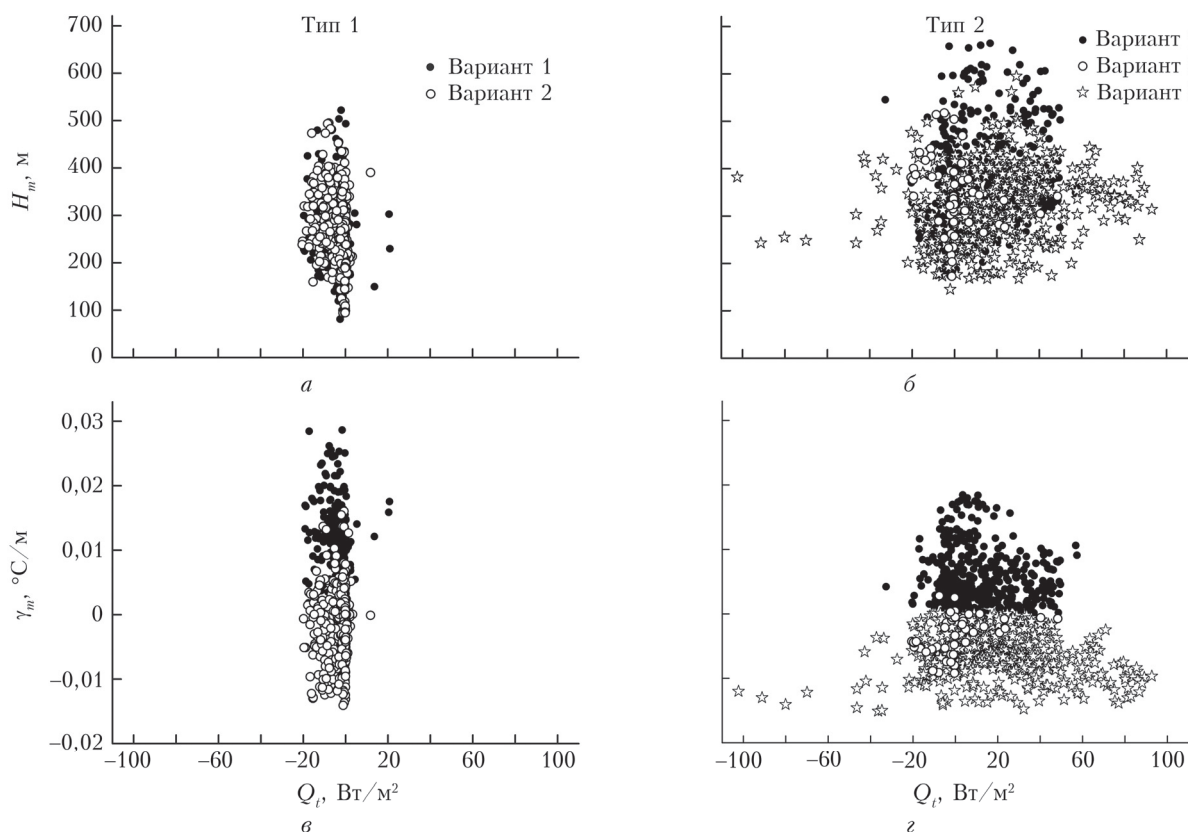


Рис. 6. Зависимость H_m (*а*, *б*) и γ_m (*в*, *з*) от Q_t в приземном слое для приземных (*а*, *в*) и при поднятых (*б*, *з*) инверсий температуры воздуха в пункте «БЭК»

иллюстрирует рис. 6, *в, з*. Обратим внимание на то, что при «больших» (по абсолютным значениям) величинах Q_t наблюдались только приподнятые инверсии варианта 3 (теплообмен происходил лишь под инверсионным слоем). Отсюда следует такой же вывод, как и для взаимосвязи $H_m(Q_t)$: возможность простой параметризации функции $\gamma_m(Q_t)$ в «БЭК» отсутствует.

Поскольку потоки тепла в «БЭК» и «ИОА» существенно отличаются, подобные выводы для пункта «ИОА» иллюстрирует рис. 7, на котором приведены лишь результаты, соответствующие приподнятым инверсиям (тип 2), поскольку для достоверных выводов по приземным инверсиям (тип 1) статистика недостаточна.

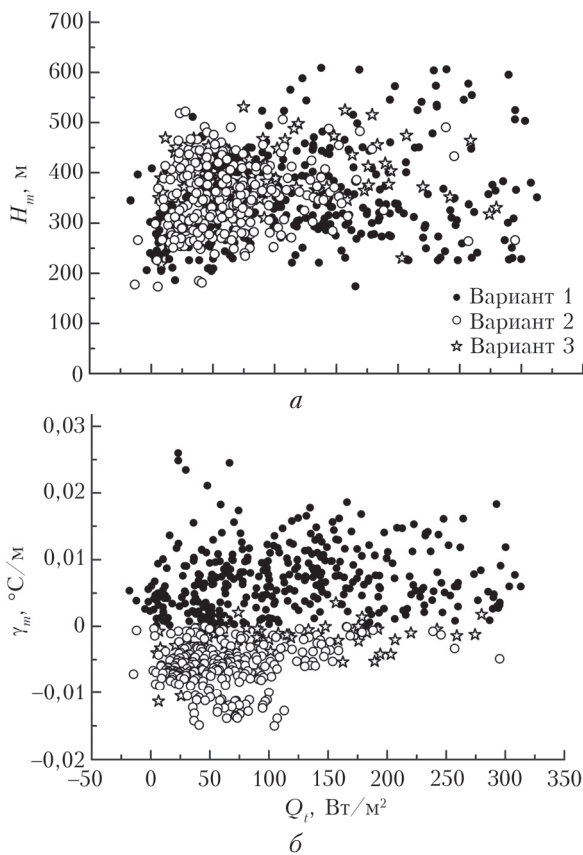


Рис. 7. Зависимость H_m (*а*) и γ_m (*б*) от Q_t в приземном слое пункта «ИОА» в случае приподнятых инверсий (тип 2)

Поскольку «одномерные» взаимосвязи $H_m(V_h)$, $H_m(Q_t)$, $\gamma_m(V_h)$ и $\gamma_m(Q_t)$ выражены не очень четко, можно ожидать, что и «комплексные» взаимосвязи $H_m(V_h, Q_t)$ и $\gamma_m(V_h, Q_t)$ будут выражены слабо. Для пункта «БЭК» графические иллюстрации таких взаимосвязей приведены на рис. 8 (цв. вкладка) в виде двумерных диаграмм. Отображены только те результаты, которые относятся к вариантам 1 и 2 перекрытия инверсий температуры турбулентным теплообменом. Напомним, что отрицательные значения величин γ_m на этих графиках соответствуют случаям полного перекрытия температурной инверсии турбулентным теплообменом.

При подготовке графиков на рис. 8 были исключены некоторые «отсчеты», содержащие «выбросы» значений Q_t . В частности, при построении графиков для приземных инверсий (тип 1, рис. 8, *а, в*) удалены значения $Q_t > 3$ Вт/м² (и соответствующие им скорости ветра), а при построении графиков для приподнятых инверсий (тип 2, варианты 1 и 2, рис. 8, *б, з*) — значения $Q_t > 50$ Вт/м² и $Q_t < -20$ Вт/м². Поскольку из анализа исключено всего несколько отсчетов (их можно увидеть на рис. 6), общая картина «комплексных» взаимосвязей от подобных исключений не изменяется, но графики приобретают более качественный вид.

Диаграммы на рис. 8 подтверждают вывод о том, что в случае приподнятых инверсий наблюдается тенденция увеличения H_m с ростом скорости ветра в приземном слое (см. рис. 8, *б*). При этом Q_t практически не влияет на значения H_m . Тем не менее приведенные графики позволяют выделить тенденции во взаимосвязи $\gamma_m(V_h, Q_t)$: «перекрытие» температурных инверсий турбулентным теплообменом в пункте «БЭК» (области $\gamma_m \leq 0$ на рис. 8, *в, з*) реализуется только при определенных комбинациях величин V_h и Q_t и примерном выполнении неравенства $Q \leq 0$.

Кратко представим результаты для «комплексных» взаимосвязей $H_m(V_h, Q_t)$ и $\gamma_m(V_h, Q_t)$ в пункте «ИОА» (рис. 9, цв. вкладка). В этом случае при подготовке графиков мы объединили оба типа инверсий (за исключением варианта 3 из типа 2). При их подготовке были исключены из рассмотрения значения $Q_t > 300$ Вт/м² и $Q_t < -30$ Вт/м², а также $V_h > 4$ (м/с) и $V_h < 0,9$ (м/с).

Сравнивая результаты на рис. 9 и 8, можно сделать вывод, что взаимосвязи $H_m(V_h, Q_t)$ и $\gamma_m(V_h, Q_t)$ в пунктах «БЭК» и «ИОА» заметно различаются. При этом в «ИОА» также отсутствует возможность простой параметризации этих взаимосвязей.

Подводя итоги анализа зависимости высоты H_m и соответствующих этой высоте градиентов температуры γ_m от скорости ветра V_h и вертикального турбулентного потока тепла Q_t в приземном слое, отметим, что простых форм этой зависимости не существует. Вероятно, формируется включение в анализ других параметров, чтобы найти возможность предсказывать величины H_m и γ_m . Только приземных значений метеорологических параметров для решения этой задачи в рассматриваемых условиях недостаточно. Наши выводы в целом совпадают с выводами, сделанными по результатам работы подобного температурно-ветрового комплекса в Антарктиде [9].

Привлечение данных о структуре полей ветра и температуры в ПСА может существенно улучшить прогноз H_m и γ_m . Пример — рис. 10, *а, в, з*, на которых показаны графики зависимости γ_m от суммы «градиентов» температуры воздуха по слою 0–1 км (обозначим как Σ_γ), вычисляемой по формуле

$$\Sigma_\gamma = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{21} [T(H_i) - T(H_{i-1})],$$

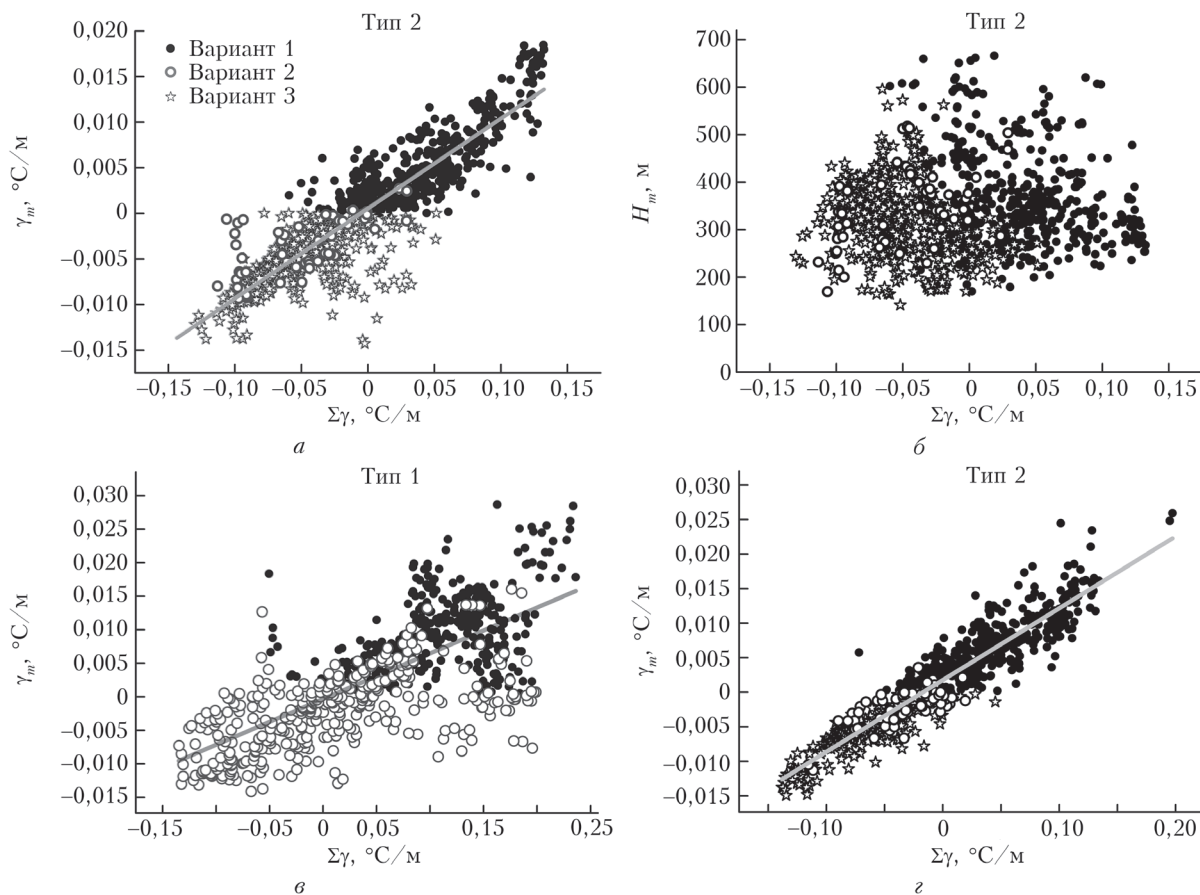


Рис. 10. Зависимость γ_m (а, в, з) и H_m (б) от суммы градиентов температуры в слое 0–1 км в пунктах «БЭК» (а–в) и «ИОА» (з)

где $T(H_i)$ – измеренная (осредненная за 20 мин) температура воздуха на высоте H_i и шаг между высотами составляет 50 м.

В рис. 10, а, в, з мы включили все возможные варианты инверсий, обозначенные разными символами. Напомним, что вариант 2 относится к случаю полного перекрытия температурной инверсии турбулентным теплообменом, и обратим внимание на то, что перекрытие инверсии турбулентным теплообменом происходит в основном в случаях отрицательных значений величины Σ_γ . Очевидно, что зависимость γ_m от Σ_γ достаточно хорошо выражена, хотя есть и значительные отклонения от некоторой «средней линии». «Средняя линия» на рис. 10, а соответствует результату линейной аппроксимации взаимосвязи $\gamma_m^{(2B)}(\Sigma_\gamma) \approx 0,099\Sigma_\gamma$. Здесь и далее верхние индексы обозначают тип инверсии и пункт: «В» – «БЭК», «I» – «ИОА». Для инверсий типа 1 в «БЭК» также наблюдается подобная взаимосвязь (рис. 10, в), причем аппроксимация имеет вид $\gamma_m^{(1B)}(\Sigma_\gamma) \approx 0,068\Sigma_\gamma$. Для «ИОА» при инверсиях типа 2 справедлива аппроксимация вида $\gamma_m^{(2I)}(\Sigma_\gamma) \approx 0,104\Sigma_\gamma$ (рис. 10, з). К сожалению, повторяемость инверсий типа 1 в «ИОА» была невысокой (см. табл. 2), поэтому статистически обеспеченной аппроксимации для этого случая нам получить не удалось.

Судя по приведенным примерам, параметр Σ_γ достаточно эффективен для предсказания γ_m . Одна-

ко он плохо подходит для прогноза H_m . Этот вывод иллюстрирует рис. 10, б, где показана взаимосвязь $H_m^{(2B)}(\Sigma_\gamma)$. Очевидно, что возможность удовлетворительной параметризации этой взаимосвязи отсутствует. Такой же вывод (оставим его без иллюстраций) следует и для $H_m^{(1B)}(\Sigma_\gamma)$, $H_m^{(1I)}(\Sigma_\gamma)$, $H_m^{(2I)}(\Sigma_\gamma)$. По-видимому, «предиктором» для высоты слоя интенсивного турбулентного теплообмена в условиях температурных инверсий будут служить другие параметры. Например, перепад температуры между границами инверсии, сдвиги скорости ветра в инверсиях или другие «внешние» параметры, связанные со средними полями ветра и температуры в ПСА.

Заключение

Кратко изложим основные выводы. Напомним, что основная цель работы состояла в проверке возможности использования данных о скорости ветра и вертикальном турбулентном потоке тепла непосредственно вблизи подстилающей поверхности для предсказания высоты слоя интенсивного турбулентного теплообмена и соответствующего этой высоте градиента температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в условиях температурной инверсии зимой. В результате анализа экспериментальных данных, полученных с использованием температурно-ветровых измерительных комплексов в двух

пунктах (естественный ландшафт и урбанизированная территория), было установлено, что предложить какие-либо приемлемые параметризации интересовавших нас зависимостей не удается. Поэтому можно поставить под сомнение результаты моделирования пограничного слоя атмосферы в условиях устойчивых температурных инверсий зимой на основе только информации о состоянии атмосферы вблизи подстилающей поверхности.

Обратим также внимание на часто встречающиеся эффекты полного перекрытия ограниченных по высоте температурных инверсий турбулентным теплообменом, что практически не учитывается при моделировании пограничного слоя атмосферы.

На наш взгляд, для более адекватного моделирования процессов турбулентного теплообмена в пограничном слое в условиях температурных инверсий необходимо привлекать дополнительную информацию, характеризующую хотя бы в общем виде поля температуры и скорости ветра непосредственно в пограничном слое. Возможно, полезными могут оказаться сведения, полученные только в слое в несколько десятков метров от подстилающей поверхности, а не во всем пограничном слое. Подобный подход мы планируем реализовать в наших дальнейших исследованиях.

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

1. *Seibert P., Beyrich F., Gryning S.E.S.E., Joffre S., Rasmussen A., Tercier P.* Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34, N 7. P. 1001–1027.
2. *Burlando M., Georgieva E., Ratto C.F.* Parameterisation of the planetary boundary layer for diagnostic wind models // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2007. V. 125, N 2. P. 389–397.
3. *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.
4. *Зилитинкевич С.С., Тюряков 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.
5. *Юшков В.П., Курбатова М.М., Варенцов М.И., Лезина Е.А., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Каллистратова М.А.* Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2019. Т. 55, № 5. С. 13–31.
6. *Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.* Исследование устойчивого пограничного слоя с использованием явной алгебраической модели турбулентности // *Теплофизика и аэромеханика.* 2019. Т. 26, № 3. С. 363–380.
7. *Курбацкая Л.И., Курбацкий А.Ф.* Вычислительно-эффективная модель турбулентности для моделирования

рассеяния загрязнений // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 524–528.

8. *Argentini S., Mastrantonio G., Lena F.* Case studies of the wintertime convective boundary-layer structure in the urban area of Milan, Italy // *Bound.-Lay. Meteorol.* 1999. V. 93, N 2. P. 253–267.
9. *Pietroni I., Argentini S., Petenko I., Sozzi R.* Measurements and parametrizations of the atmospheric boundary-layer height at Dome C, Antarctica // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2012. V 143, N 1. P. 189–206.
10. *Piringer M., Joffre S., Baklanov A., Cristen A., Deserti M., De Ridder K., Emeis S., Mestayer P., Tombrou M., Middleton D., Baumann-Stanzer K., Dandou A., Karppinen A., Burzynski J.* The surface energy balance and the mixing height in urban areas – activities and recommendations of COST-Action 715 // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2007. V. 124, N 1. P. 3–24.
11. *Sgouros G., Helmis C.G., Degleris J.* Development and application of an algorithm for the estimation of mixing height with the use of a SODAR-RASS remote sensing system // *Int. J. Remote Sens.* 2011. V. 32, N 22. P. 7297–7313.
12. *Kryza M., Drzeniecka-Osiadacz A., Werner M., Netzel P., Dore A.J.* Comparison of the WRF and sodar derived planetary boundary layer height // *Int. J. Environ. Pollut.* 2015. V. 58, N 1–2. P. 3–14.
13. *Локощенко М.А.* Динамика термической турбулентности в нижней атмосфере Москвы по данным содарного зондирования // *Метеорол. и гидрол.* 2006. № 2. С. 35–46.
14. *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 атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 6. С. 534–537.
15. *Li H., Yang Y., Hu X.M., Huang Z., Wang G., Zhang B., Zhang T.* Evaluation of retrieval methods of daytime convective boundary layer height based on lidar data // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2017. V. 122, N 8. P. 4578–4593.
16. *Brooks I.M.* Finding boundary layer top: Application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2003. V. 20, iss. 8. P. 1092–1105.
17. *Tombrou M., Founda D., Boucouvala D.* Nocturnal boundary layer height prediction from surface routine meteorological data // *Meteorol. Atmos. Phys.* 1998. V. 68, N. 3–4. P. 177–186.
18. *Georgoulas A.K., Papanastasiou D.K., Melas D., Amiridis V., Alexandri G.* Statistical analysis of boundary layer heights in a suburban environment // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2009. V. 104, N 1–2. P. 103–111.
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 атмосф. и океана.* 2020. Т. 33. №10. С. 782–790.
20. *Камардин А.П., Гладких В.А., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Метеорологический акустический доплеровский локатор (содар) «ВОЛНА-4М-СТ» // *Приборы.* 2017. № 4. 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, аппарата, ре-

- зультаты 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. *Гладких В.А., Одинцов С.Л.* Турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы и его влияние на внешний масштаб турбулентности // Изв. вузов. Физика. 2017. № 6. С. 128–134.
25. *Kamardin A.P., Gladkikh V.A., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Trofimov I.V.* Estimation of the height of intense turbulent heat exchange layer in the stably stratified atmospheric boundary layer // Proc. SPIE. 2020 (в печати).

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 2: Relation to the surface meteorological parameters.**

Part 2 of the paper analyzes the relation of the heights of the zone of intense turbulent heat exchange and the corresponding air temperature gradients to the surface values of the wind speed and the vertical turbulent heat flux. Only the cases of temperature inversions in winter (January–February 2020) are considered. The division of inversions into two types (surface and elevated) and four forms is introduced. The statistics of the height of the layer of intense turbulent heat exchange is obtained for various versions (types and forms) of temperature inversions. It is concluded from the analysis that under conditions of temperature inversions (in the winter period) there is no direct (well pronounced) relation between the height of the layer of intense turbulent heat exchange and the surface values of the wind speed and the turbulent heat flux.

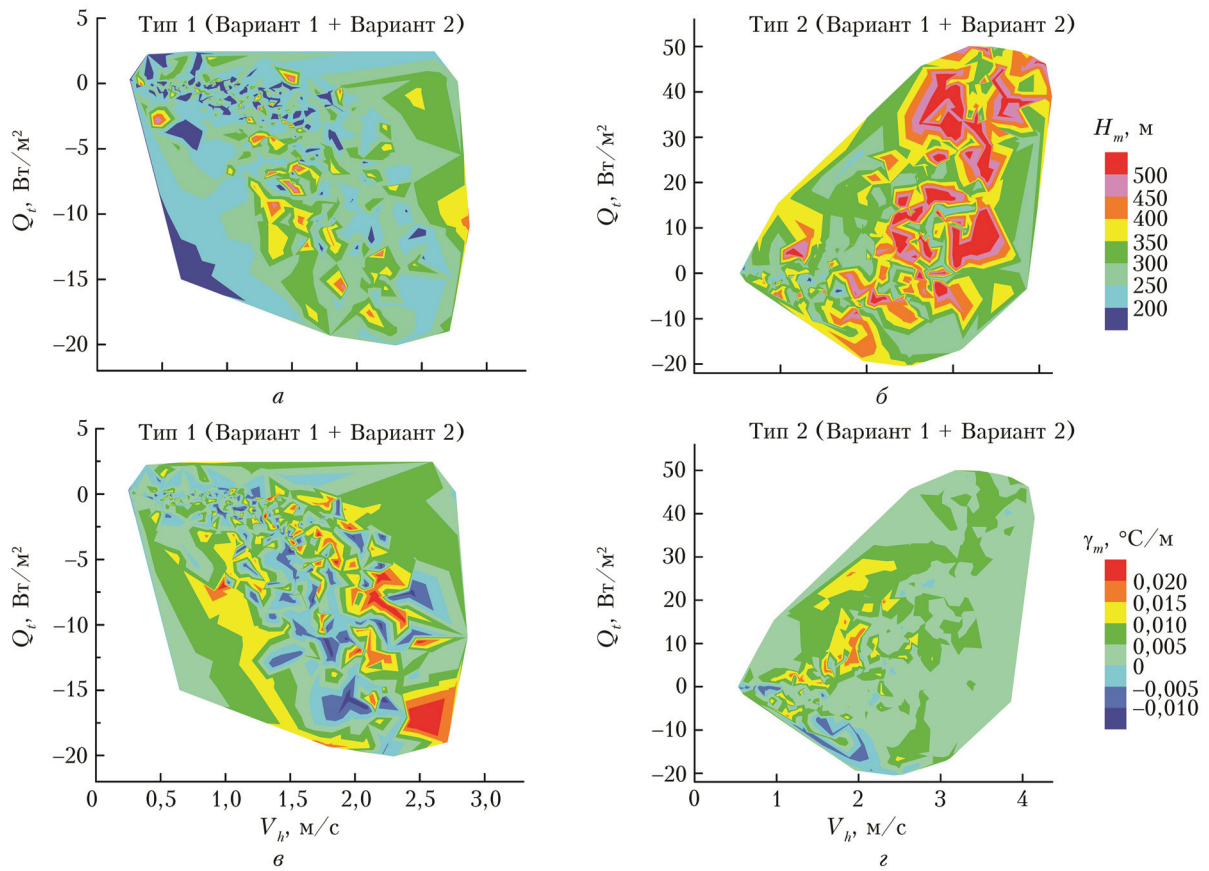


Рис. 8. Двумерные диаграммы зависимости H_m (а, б) и γ_m (в, з) от V_h и Q_t для приземных (а, в) и приподнятых (б, з) инверсий температуры воздуха в пункте «БЭК» (на высоте 10 м)

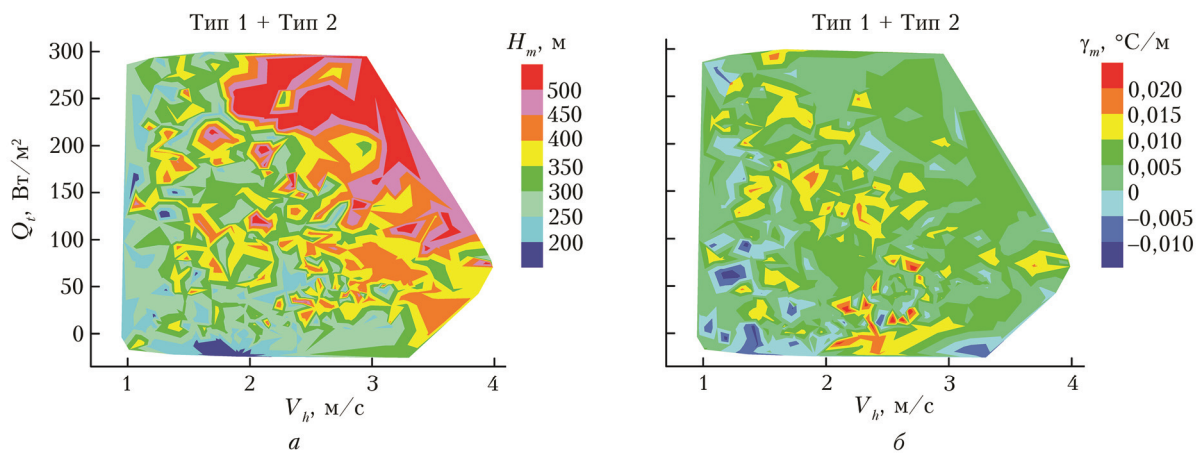


Рис. 9. Двумерные диаграммы зависимости H_m (а) и γ_m (б) от V_h и Q_t в пункте «ИОА»