

УДК 536.5+551.5

Статистика инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы над г. Томском

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

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

Поступила в редакцию 29.03.2023 г.;
после доработки 13.06.2023 г.;
принята к печати 27.07.2023 г.

Представлены результаты анализа характеристик инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы (повторяемость, тип, интенсивность, мощность) до высоты 1 км на основе экспериментальных данных за 2020–2022 гг., полученных с помощью метеорологических температурных профиломеров МТР-5. Профили температуры воздуха измерялись одновременно в пункте с естественным ландшафтом (пригород г. Томска) и над урбанизированной территорией (окраина г. Томска, Академгородок). Установлено, что инверсии температуры фиксировались примерно в половине времени наблюдений. Приводится статистика разных форм и типов инверсии в зависимости от сезона года. Рассмотрена взаимосвязь интенсивности инверсий с метеорологическими параметрами в приземном слое атмосферы. Отмечено существенное влияние направления ветра на интенсивность инверсий.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, инверсия температуры, скорость ветра, направление ветра, кинетическая энергия турбулентности, турбулентный поток тепла; planetary boundary layer, temperature inversion, wind speed, wind direction, turbulence kinetic energy, turbulent heat flux.

Введение

Важным фактором, определяющим различные процессы в пограничном слое атмосферы (ПСА), является распределение температуры воздуха по высоте. Термическая стратификация ПСА влияет на распределение аэрозольных и газовых примесей, рефракцию оптических и акустических волн. Особый интерес представляют случаи, когда в ПСА присутствуют инверсии температуры — рост температуры с высотой или во всем слое ПСА, или только в некоторой его части.

Изучению характеристик инверсий температуры в ПСА в последние годы был посвящен ряд исследований на территории Российской Федерации. Например, в [1–6] приводится статистика инверсий в различных регионах для интерпретации ситуаций с повышенным уровнем загрязнения воздуха. Изучение характеристик инверсий как климатического фактора также является актуальной задачей. Она рассматривается, например, в [6–14]. Отметим определенный интерес к специфической проблеме —

исследованию профилей температуры воздуха в условиях глубоких открытых карьеров [15–17]. Это связано с вероятностью существенного накопления загрязняющих примесей в карьерах при температурных инверсиях. Влияние рефракции на распространение лазерного излучения при различных профилях температуры в ПСА, включая инверсии, рассматривалось в работах [18–21]. Подобные исследования проводятся и за рубежом (см., например, [22–24]).

Цель нашей работы — исследование характеристик инверсий температуры в слое атмосферы от подстилающей поверхности до высоты 1 км. Решались следующие задачи: 1) получение статистических данных о характеристиках инверсий (повторяемость, тип, интенсивность, мощность), 2) анализ взаимосвязи характеристик инверсий с метеорологическими параметрами в приземном слое (скорость и направление ветра, кинетическая энергия турбулентности, вертикальный турбулентный поток тепла), 3) сравнение результатов в двух различных по типу подстилающей поверхности пунктах наблюдения (в рамках первых двух задач).

Далее под термином «мощность инверсии» будет пониматься разность высот между верхней и нижней границами инверсии, а под термином «интенсивность инверсии» — перепад температур между границами инверсии.

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

Приборы и пункты измерений

Для анализа использовались температурные профили в диапазоне высот до 1 км, полученные в двух пунктах наблюдений: Академгородок (окраина г. Томска, урбанизированная территория) и Базовый экспериментальный комплекс (БЭК) ИОА СО РАН в пригороде Томска (естественный ландшафт; примерно 3 км к востоку от Академгородка). Измерения проводились температурными профиломерами МТР-5 [25–27] в непрерывном режиме с шагами по высоте 50 м и времени 5 мин. Согласно техническим паспортам данных приборов точность измерения температурного профиля при инверсиях составляет 0,8 °C в диапазоне высот 0–500 м и 1,2 °C на более высоких уровнях. Отметим статью [28], где на основе экспериментальных данных рассмотрены вопросы точности работы таких приборов и даны рекомендации по их оптимальному размещению при сетевых измерениях. Результаты проверки работы МТР-5 в Академгородке (далее пункт ИОА) опубликованы в [29, 30]. В пункте БЭК прибор размещался на высоте 4 м над подстилающей поверхностью, а в ИОА — на высоте ~ 17 м.

В работах [3, 6, 8, 9] также применялись приборы МТР-5. Это позволило авторам сделать статистически более обоснованные выводы о характеристиках инверсий в ПСА по сравнению с радиозондовыми наблюдениями (обычно измерения проводились несколько раз в сутки в установленные сроки). В [2] мощность инверсий определялась с помощью содара (акустического метеорологического локатора).

Кроме результатов работы температурных профиломеров МТР-5 мы использовали для анализа экспериментальные данные, полученные с помощью ультразвуковых метеостанций «Метео-2» [31] (в пункте БЭК — на высоте 10 м, в пункте ИОА — на высоте 17 м). Измерялись компоненты вектора ветра, температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление. Частота измерений составляла 10 Гц.

Температурные инверсии анализировались по экспериментальным данным за 2020–2022 гг. Суммарно в обработку включено 25 749 ч наблюдений в пункте БЭК и 26 087 ч в пункте ИОА. Статистика инверсий (повторяемость и типы) за 2020 г. рассматривалась нами ранее в [32].

В настоящей работе все величины получены как средние значения за интервал времени 30 мин. Такой интервал был выбран для минимизации влияния возможных отдельных «выбросов» тех или иных параметров.

Типизация профилей температуры при инверсиях

Воспользуемся типизацией инверсий, введенной в [32, 33]. На рис. 1 приведены модельные профили возможных распределений температуры. «Форма 1» (○) отвечает случаю, когда инверсия температуры распространяется до верхней границы контролируемого слоя (1 км), а «Форма 2» —

случаю, когда инверсия (■) распространялась только до некоторой высоты $H_U < 1$ км. В свою очередь «Тип 1» соответствует приземной инверсии (○), а «Тип 2» — приподнятой (●) (ее нижняя граница на высоте H_L). Например, «Тип 1/Форма 1» — инверсия (приземная), наблюдаемая от подстилающей поверхности до верхней границы слоя, а «Тип 2/Форма 2» — инверсия (приподнятая), которая начинается на некоторой высоте H_L и заканчивается на высоте $H_U < 1$ км. Следует сделать два замечания. Во-первых, вполне возможно, что инверсия распространяется выше уровня 1 км, до которого прибор МТР-5 измеряет температуру. В этом случае мы все равно будем полагать $H_U = 1$ км. Во-вторых, в контролировавшемся диапазоне высот возможна реализация многослойных инверсий (★ и ▲ на рис. 1). Но эти реализации мы также относим к «Форме 2» и используем оценки H_L и H_U только для самого нижнего из инверсионных слоев.

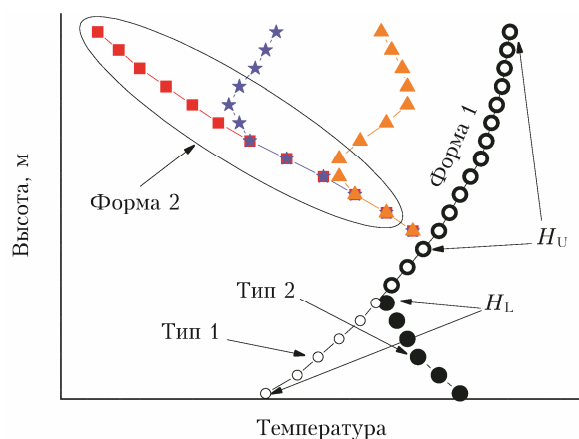


Рис. 1. Модельные профили температуры воздуха до 1000 м (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

Далее рассматриваются интенсивность инверсии $\Delta T = T(H_U) - T(H_L)$, ее мощность $\Delta H = H_U - H_L$, а также средний градиент температуры в слое инверсии $D = \Delta T / \Delta H$. При оценках границ инверсии и соответствующих им температур использовалась кубическая сплайновая интерполяция профилей.

Дополнительным условием для выделения инверсий являлось выполнение неравенства $\Delta T \geq 0,1$ °C, что отчасти устраняет из анализа неточности, возникающие при проведении измерений и вследствие интерполяции температурных профилей. Приведенное неравенство было задано после предварительного анализа экспериментальных данных.

Статистика инверсий

Для общего представления о повторяемости и интенсивности инверсий за 2020–2022 гг. приведем рис. 2, где показаны значения ΔT в обоих пунктах наблюдения. В этот период инверсии регистрировались (без разделения по типу и форме) в пункте БЭК 13 725 ч (~ 53% от времени наблюдений), а в пункте ИОА — 12 480 ч (~ 48%).

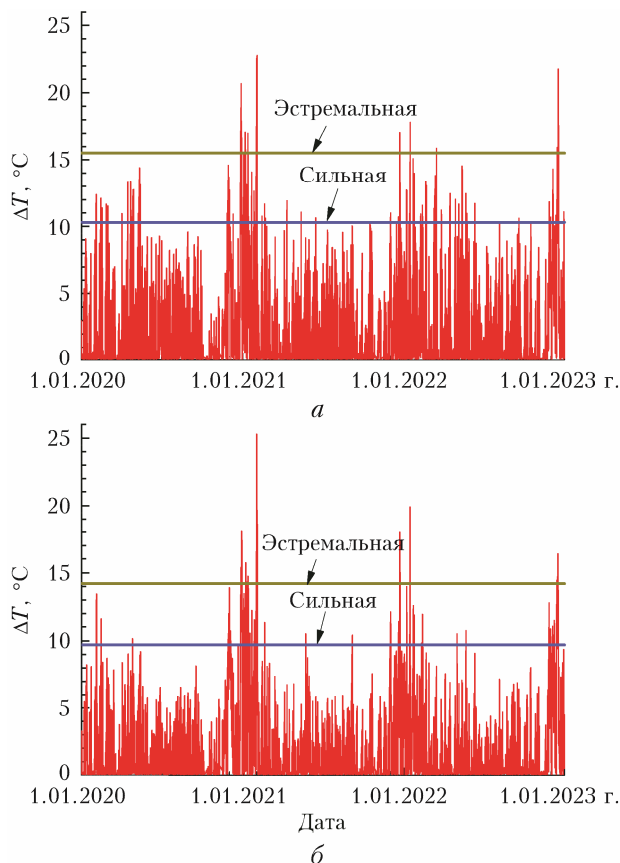


Рис. 2. Интенсивность температурных инверсий в пунктах БЭК (а) и ИОА (б)

Согласно рис. 2 в пункте БЭК интенсивность инверсий в целом выше, чем в пункте ИОА. Естественно, что в зимнее время значения ΔT достигают больших величин, чем в теплое время года.

Поскольку тип инверсии (приземная или приподнятая) зависит в основном от турбулентного теплообмена атмосферы с подстилающей поверхностью, то статистика типов должна быть привязана к сезону года и времени суток. Форма инверсии (достигает или нет верхняя граница инверсии 1 км) была связана в основном с сезоном года. В частности, «Форма 1» реализовывалась фактически только зимой. В теплый период она практически не регистрировалась. Это относится к обоим пунктам наблюдения.

Рассмотрим теперь мощность инверсий ΔH (рис. 3). Наиболее мощными инверсии бывают в холодный период, перекрывая в отдельных случаях весь контролировавшийся слой до 1 км (рис. 3, а, б). Представление годового хода ΔH в виде «облака» отдельных точек (соответствующих 30-минутным интервалам измерений) позволяет визуально оценить как общее поведение данной величины, так и некоторую ее «пестроту».

Понятно, что может иметь место и суточный ход ΔH . Однако он явно выражен только в летнее время, что демонстрирует пример на рис. 3, г в пункте БЭК. Зимой суточный ход ΔH выражен слабо (рис. 3, в). «Облако» значений ΔH на рис. 3, в

охватывает практически всю область рисунка без выраженного суточного хода. Подобные результаты характерны и для пункта ИОА.

Для общего представления о длительности инверсий температуры различного типа и форм за период наблюдений приведем табл. 1. Результаты разделены по сезонам.

Согласно табл. 1 в холодный период (с ноября по март) инверсии температуры фиксировались несколько чаще, чем в теплый (апрель — октябрь включительно). При этом контролировавшийся слой атмосферы (до 1 км) полностью перекрывался инверсией (Т1Ф1) только в 1–2% времени и только зимой. Отметим также, что верхняя граница инверсий была ниже 1 км («Форма 2») в 77–78% времени от суммарного присутствия инверсий в слое до 1 км.

Основной статистической характеристикой инверсий будем считать интегральные функции распределения (ИФР) интенсивности и мощности инверсий. На рис. 4, а приведены ИФР интенсивности ΔT , показанной на рис. 2, а на рис. 4, б — ИФР мощности ΔH , показанной на рис. 3, а, б.

На основе ИФР было принято решение считать «сильными» инверсии, интенсивность которых превышала уровень 95% ИФР (БЭК — $\Delta T = 10,3^\circ\text{C}$; ИОА — $\Delta T = 9,7^\circ\text{C}$). Кроме того, была выделена область экстремальных инверсий, интенсивность которых превышала уровень 99% ИФР (БЭК — $\Delta T = 15,5^\circ\text{C}$; ИОА — $\Delta T = 14,2^\circ\text{C}$). Эти уровни показаны на рис. 2 горизонтальными линиями.

Рассмотрим теперь статистику среднего градиента температуры D в слое инверсии. Для этого вычислялись ИФР величины D для различных типов и форм инверсий. Их суммарная длительность представлена в табл. 1. Введем еще градацию по верхней границе инверсии: H_U менее 600 м для пункта БЭК и H_U менее 300 м для пункта ИОА. Эти случаи интересны тем, что позволяют оценить вероятность «быстрого» роста температуры с высотой в самых нижних слоях атмосферы. Такие распределения температуры должны, в частности, приводить к существенному накоплению загрязняющих примесей в приземном слое. На рис. 5, а приведены ИФР параметр D в пункте БЭК, а на рис. 5, б — в пункте ИОА.

Значения D для случаев Т1Ф1 и Т2Ф1 не превосходят $\sim 0,02$ ($^\circ\text{C}/\text{м}$) в обоих пунктах наблюдения. Это означает, что если инверсия достигала 1 км, то средний градиент температуры не превышал указанной величины. Понятно, что на отдельных интервалах высот градиенты температуры могут существенно превышать значения D , характеризующие только средний градиент по всему слою инверсии.

Иная картина наблюдается для Т1Ф2 и Т2Ф2, когда верхняя граница инверсии расположена ниже 1 км. В этом случае величина D может быть значительной, превышая уровень $\sim 0,04$ ($^\circ\text{C}/\text{м}$) в обоих пунктах наблюдения. Обратим внимание на вариант для пункта ИОА (урбанизированная территория), когда верхняя граница инверсии H_U не превышала 300 м (рис. 5, б). В приподнятой инверсии величина D

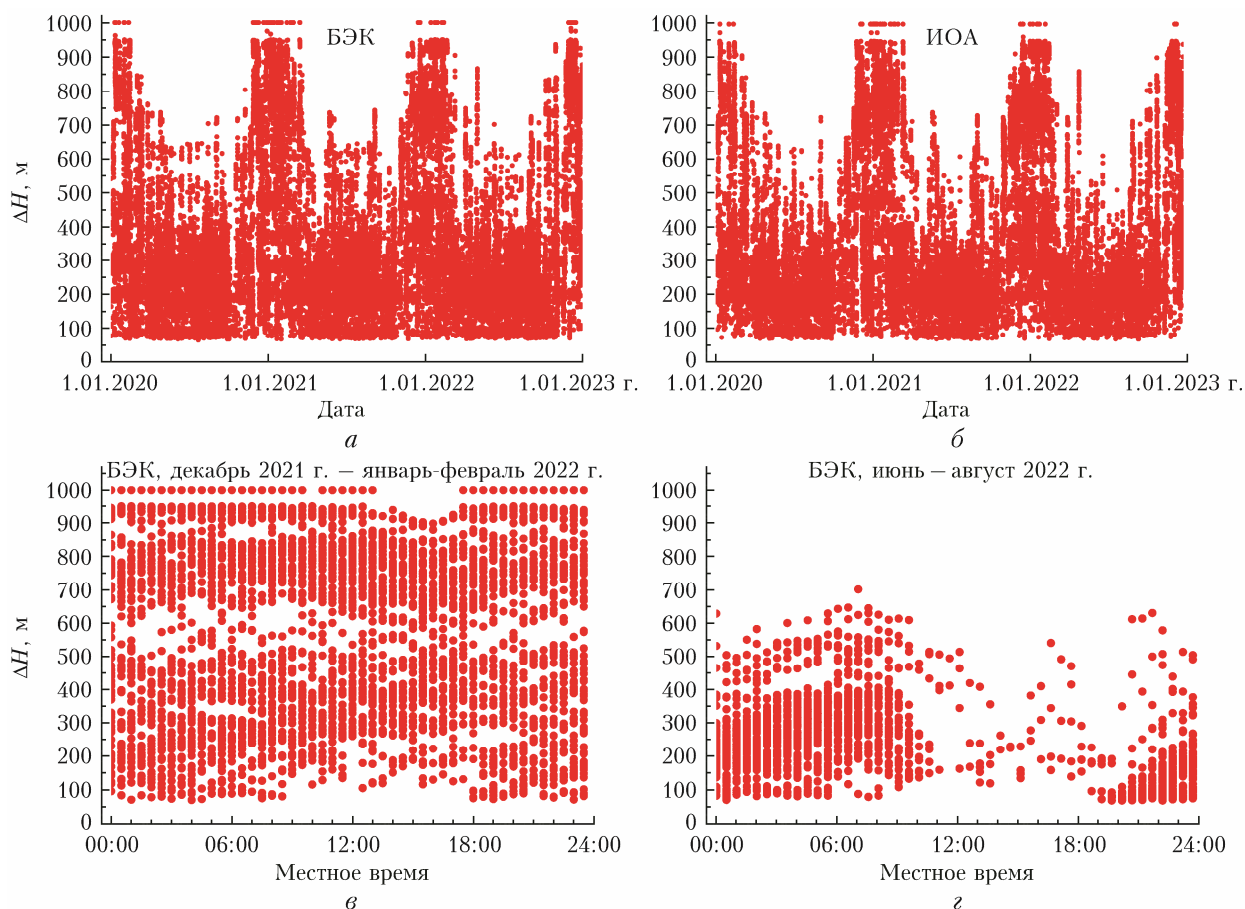


Рис. 3. Мощность температурных инверсий в пунктах БЭК (а) и ИОА (б); суточный ход мощности инверсий в пункте БЭК зимой (в) и летом (г) без разделения по типам инверсий

Т а б л и ц а 1

Суммарная длительность (ч) различных видов инверсий (2020–2022 гг.)

Пункт	Период, мес	Приземные		Приподнятые		Суммарно
		T1Ф1*	T1Ф2	T2Ф1	T2Ф2	
БЭК	XI–III	263,5	1843,5	2798	2538,5	7443,5
	IV–V	0	1449,5	14,5	343,5	1807,5
	VI–VIII	0	2386	0	472,5	2858,5
	IX–X	0	1245,5	2	368	1615,5
	Всего (часы/%)	263,5/2	6924,5/50	2814,5/21	3722,5/27	13725/100
ИОА	XI–III	171	1557	2595	2994,5	7317,5
	IV–V	0	1064,5	14,5	408	1487
	VI–VIII	0	1766	0	488	2254
	IX–X	0	965	3	453	1421
	Всего (часы/%)	171/1	5352,5/43	2612,5/21	4343,5/35	12479,5/100

* T1Ф1 – Тип 1, Форма 1.

не превосходила уровень $\sim 0,01$ °C/м, в то время как в приземных инверсиях величина D при H_U менее 300 м достигала значений $\sim 0,04$ °C/м). Можно предположить, что для приземной инверсии с условием H_U менее 300 м наиболее значительный рост температуры с высотой был в приземном слое атмосферы. Более детальный анализ градиентов температуры воздуха в инверсиях проводился нами ранее при изучении турбулентного теплообмена в устойчиво стратифицированном ПСА в зимние месяцы 2020 г. [32].

Коротко изложим результаты оценок среднего градиента температуры D при сильных (и экстремальных) инверсиях. Выделив эти периоды (см. рис. 2), мы построили рис. 6, где показана взаимосвязь ΔT с параметром D . Очевидно, что в пункте БЭК величина D сильных инверсий была в целом больше, чем в пункте ИОА. В области экстремальных инверсий значения D были несколько больше в пункте ИОА. При этом в обоих пунктах преобладают случаи приземных инверсий с верхней границей менее 1 км (вариант T1Ф2).

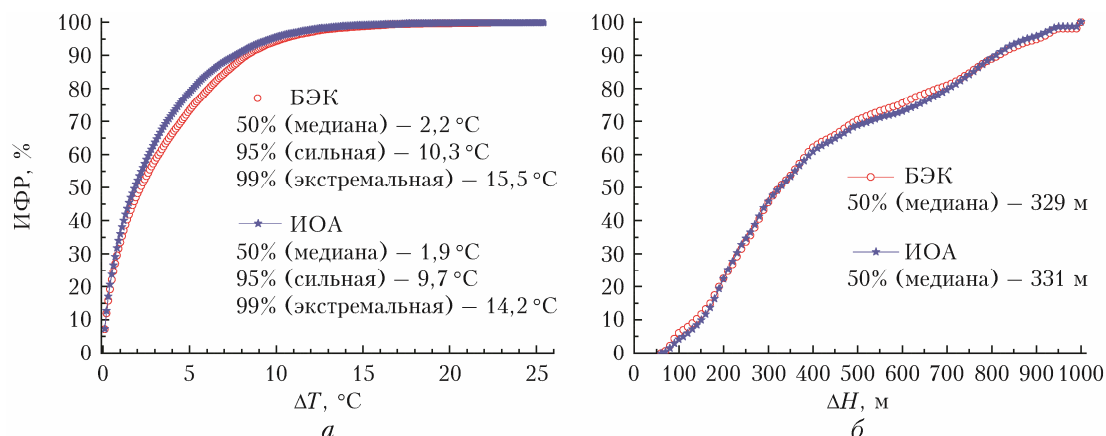


Рис. 4. ИФР интенсивности инверсий (а) и их мощности (б) в пунктах БЭК и ИОА суммарно за 2020–2022 гг. (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

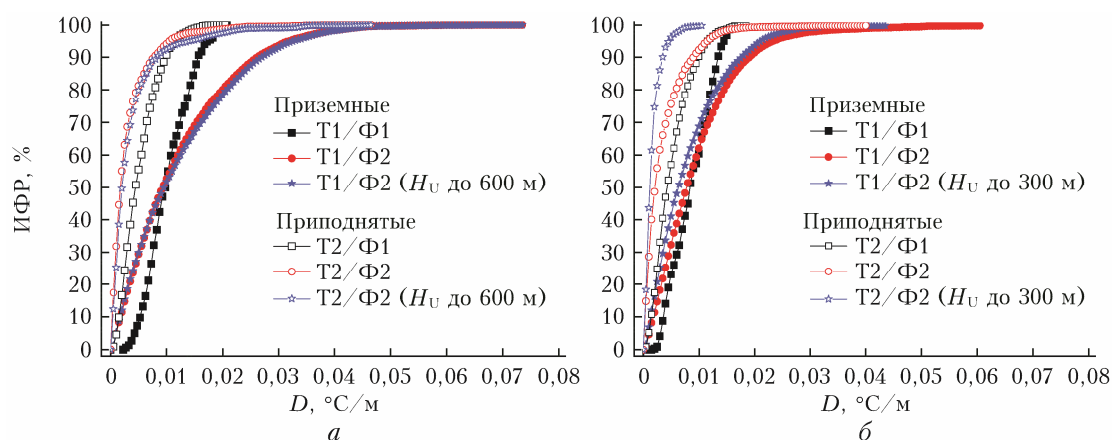


Рис. 5. ИФР параметра D в пунктах БЭК (а) и ИОА (б) отдельно по их типам и формам (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

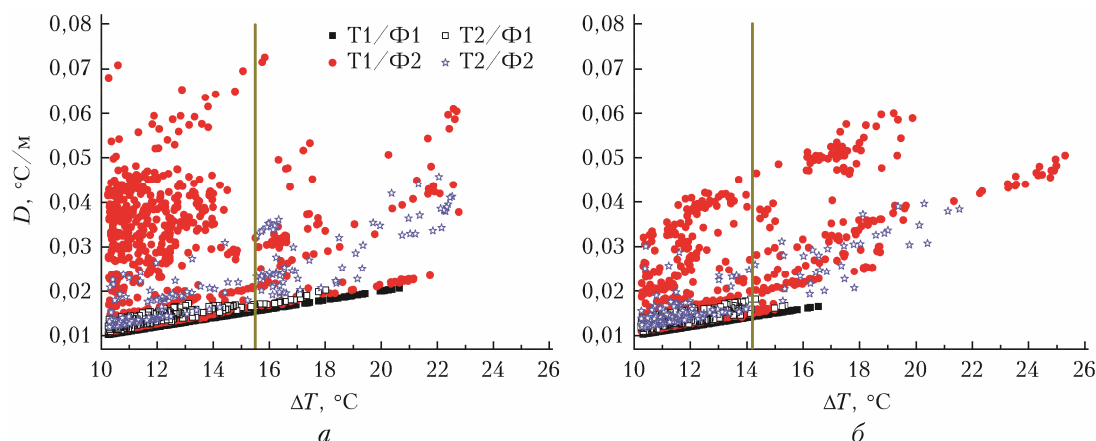


Рис. 6. Взаимосвязь величин ΔT и D в пунктах БЭК (а) и ИОА (б) в случае сильных инверсий. Вертикальные линии на графиках соответствуют «пороговым» значениям экстремальных инверсий (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

Проведем теперь краткое сопоставление со статистикой инверсий, опубликованной другими авторами. Понятно, что образование и разрушение инверсий в различных климатических районах может существенно различаться. Поэтому будут различаться и характеристики инверсий (тип, форма, интенсивность, мощность), включая их статистику. Тем не менее мы считаем такое сопоставление полезным.

Прежде всего, сравним статистику продолжительности инверсий, полученную в пункте БЭК (естественный ландшафт), со статистикой [6] в аэропорту Богашево вблизи г. Томска (примерно в 13 км к юго-востоку от пункта БЭК; естественный ландшафт с неплотной застройкой), полученную за период с сентября 2012 г. по май 2013 г. Измерение температурных профилей в пункте Богашево

проводилось с помощью прибора МТР-5. В табл. 2 приведена ежемесячная продолжительность инверсий (приземных и приподнятых; без разделения на типы) в периоды измерений. Согласно приведенным в ней результатам, годовой ход продолжительности приземных и приподнятых инверсий для сравниваемых пунктов имел в рассмотренные периоды в целом однотипный характер. Только

помесячная продолжительность инверсий в 2012–2013 гг. (пункт Богашево) была несколько больше, чем средние за три года (2020–2022 гг.) оценки в пункте БЭК. Годовой ход мощности и интенсивности инверсий в пункте Богашево также был подобен годовому ходу этих характеристик в пункте БЭК (см. рис. 7, а, б для приземных инверсий).

Таблица 2

Длительность (ч) инверсий температуры в пограничном слое атмосферы

Пункт	Год	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Приземные													
Богашево	2012	—	—	—	—	—	—	—	—	301	248	135	278
	2013	351	230	227	319	157	—	—	—	—	—	—	—
БЭК	2020	116	193	91	292	246	224	278	345	263	43	133	116
	2021	222	111	88	211	210	223	301	289	231	205	43	70
	2022	283	164	185	213	279	207	256	268	285	219	92	205
	Среднее	207	156	121	239	245	218	278	300	260	156	89	130
Приподнятые													
Богашево	2012	—	—	—	—	—	—	—	—	55	238	382	480
	2013	385	435	430	162	79	—	—	—	—	—	—	—
БЭК	2020	281	246	214	40	54	23	41	32	35	78	280	584
	2021	481	435	235	89	60	71	55	112	52	55	328	528
	2022	357	358	193	63	53	43	39	58	73	78	309	512
	Среднее	373	346	214	64	55	46	45	67	53	70	305	541

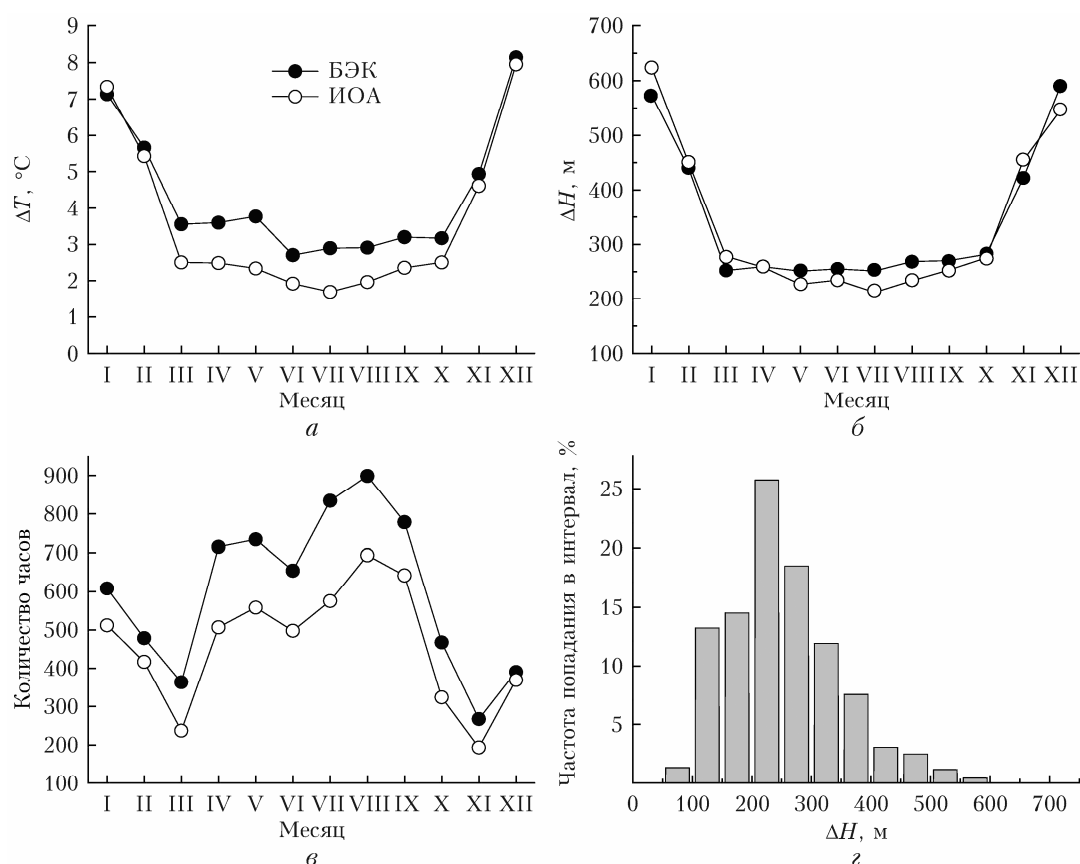


Рис. 7. Средний годовой ход интенсивности (а), мощности (б) и повторяемости (в) приземных инверсий в пунктах БЭК и ИОА (2020–2022 гг.); гистограмма мощности приземных инверсий (г) в летние месяцы в пункте ИОА (2020–2022 гг.)

Сравним далее характеристики приземных инверсий (без разделения по формам) в пунктах БЭК и ИОА с другими регионами России. По измерениям в Перми [3] (2013–2016 гг., прибор МТР-5), Смоленске и Мурманске [12] (2011–2015 гг., радиозондирование; 00:00 и 12:00 UTC) годовой ход интенсивности и мощности приземных инверсий по форме близок к аналогичным оценкам для пунктов БЭК и ИОА (суммарно за 2020–2022 гг.), представленным на рис. 7, *а, б*. Только в летние месяцы ΔT в г. Перми меньше примерно на 0,5–1,0 °C, чем в пункте ИОА, и на 1,5–2,0 °C меньше, чем в пункте БЭК. Годовой ход мощности инверсий в сравниваемых пунктах однотипен. Только в Мурманске зимой значения ΔH в приземных инверсиях существенно меньше (300–400 м, 00:00 UTC).

Годовой ход повторяемости приземных инверсий (продолжительность в течение месяца) в пунктах БЭК и ИОА показан на рис. 7, *в* (для пункта БЭК см. также табл. 2). Близкая по форме (с локальными минимумами весной и осенью) повторяемость наблюдалась и в Санкт-Петербурге [4] (2006–2014 гг.), хотя была представлена в днях, а не в часах. Иной годовой ход среднесуточной повторяемости приземных инверсий наблюдался в Астрахани [10] (1988–2019 гг.). Для него характерно отсутствие локальных минимумов весной и осенью – имеет место достаточно «гладкая» кривая с максимумом в июле–августе.

Также отметим схожесть гистограмм распределения мощности приземных инверсий в теплый период в пункте ИОА (рис. 7, *г*) и на площадке метеорологической обсерватории МГУ [2] (Москва, 2016 г.). Основное различие заключается в том, что в результатах [2] мода гистограммы сдвинута в область 150–200 м.

Гистограмма для пункта БЭК существенно отличается от гистограммы на рис. 7, *г*. В пункте БЭК частота попадания ΔH в интервал 100–400 м примерно одинакова (~15%).

Взаимосвязь характеристик инверсий с метеорологическими параметрами

Рассмотрим как связана интенсивность инверсий (ΔT) со скоростью (V_h) и направлением (φ) ветра (направление – азимут, откуда дует ветер). Напомним, что используются измерения V_h и φ только в приземном слое (на высоте 10 м от подстилающей поверхности в пункте БЭК и 17 м в пункте ИОА). В анализ не включались редкие события, когда средняя (за 10 мин) скорость ветра превышала (округленно) 7 м/с. Такие события за период обработки наблюдались в пункте БЭК всего 62 ч за три года.

Взаимосвязь ΔT и V_h приведена на рис. 8. В частности, на рис. 8, *а, б* показаны гистограммы распределения (в часах) V_h суммарно за период обработки, а на рис. 8, *в, г* – гистограммы V_h в периоды присутствия инверсий температуры. Непосредственно взаимосвязь $\Delta T \Leftrightarrow V_h$ приведена на

рис. 8, *д, е* (горизонтальными линиями на графиках указаны уровни, соответствующие сильным и экстремальным инверсиям). Согласно рис. 8, *д* в пункте БЭК наблюдается явная тенденция повышения интенсивности инверсий с уменьшением скорости ветра в приземном слое. В пункте ИОА (рис. 8, *е*) подобная тенденция просматривается только для приподнятых инверсий и практически отсутствует в случаях с приземной. Более того, сильные и экстремальные инверсии в этом пункте не фиксировались при $V_h < 0,5$ м/с. Возможно, это обусловлено слабой статистической обеспеченностью оценок для малых скоростей ветра (рис. 8, *г*).

Рассмотрим теперь взаимосвязь интенсивности инверсий с направлением ветра. На рис. 9, *а, б* приведены гистограммы распределения φ (в часах) суммарно за период обработки, а на рис. 9, *в, г* – гистограммы φ при инверсиях температуры. Непосредственно взаимосвязь $\Delta T \Leftrightarrow \varphi$ показана на рис. 9, *д, е*.

Направление ветра заметно влияло на величины ΔT в обоих пунктах. В частности, в пункте БЭК выражены направления вблизи 45 и 200° (рис. 9, *д*), при которых чаще всего образовывались сильные инверсии (особенно при 45°). В пункте ИОА влияние направления ветра на ΔT акцентировано несколько меньше (рис. 9, *е*). При направлении ветра с северо-востока повторяемость (рис. 9, *г*) и интенсивность инверсий (рис. 9, *е*) были небольшими, в отличие от пункта БЭК (рис. 9, *в, д*). Однако дополнительно выделяется область направлений вблизи 315°, при которых в пункте ИОА возникали сильные инверсии. Возможно, здесь свою роль играет структура урбанизированной территории.

Далее рассмотрим взаимосвязи ΔT с кинетической энергией турбулентности E_k (м²/с²) и вертикальным турбулентным потоком тепла Q_z (Вт/м²) в приземном слое. Кинетическая энергия турбулентности определяется формулой $E_k = 0,5(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$, где σ_i^2 – дисперсии турбулентных составляющих ортогональных компонентов вектора ветра. Выделение турбулентных составляющих осуществлялось вычитанием скользящих средних из исходных выборок по алгоритму, изложенному, например, в [34]. Для расчетов $Q_z \propto w'T'$ (черта сверху – знак усреднения; в нашем случае по интервалу времени 30 мин) дополнительно к турбулентной составляющей вертикального ветра w' выделялись турбулентные пульсации температуры T' .

На рис. 10, *а, б* приведены графики взаимосвязи $\Delta T \Leftrightarrow E_k$ в пунктах БЭК и ИОА. Отметим, что эта взаимосвязь по структуре подобна взаимосвязи $\Delta T \Leftrightarrow V_h$ (см. рис. 8, *д, е*), так как $E_k \propto V_h^2$. Мы хотим обратить внимание на следующие особенности в случаях приземных инверсий (тип 1). В пункте БЭК сильные приземные инверсии образовывались главным образом при небольших величинах E_k , а в пункте ИОА имела место обратная тенденция – сильные приземные инверсии чаще образовывались при средних и относительно высоких

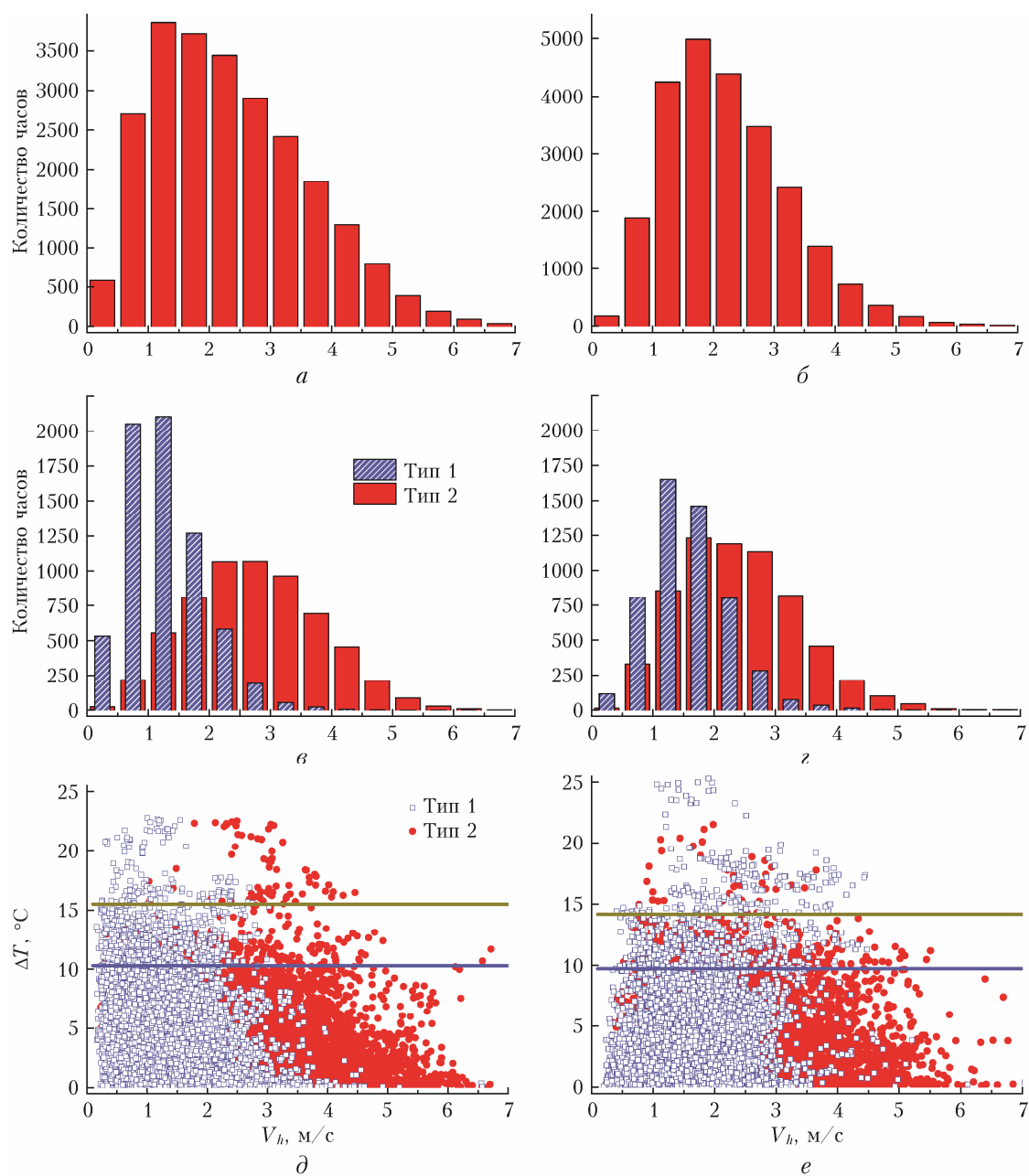


Рис. 8. Гистограммы скорости ветра в пунктах БЭК (а, в) и ИОА (б, г) в целом за 2020–2022 гг. (а, б) и только при инверсиях температуры (в, г); взаимосвязь интенсивности инверсий со скоростью ветра в пунктах БЭК (д) и ИОА (е) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

значениях E_k . Дополнительно отметим, что в пункте ИОА при любых значениях ΔT минимальные значения E_k в приземных инверсиях примерно на порядок больше, чем в пункте БЭК.

Рассмотрим в заключение взаимосвязь $\Delta T \Leftrightarrow Q_z$, которая представлена на рис. 10, в, г. Во-первых, отметим, что в случаях приземных инверсий (тип 1) поток тепла Q_z вблизи подстилающей поверхности мог быть положительным, особенно при небольших ΔT . В пункте ИОА такие случаи были гораздо чаще, чем в пункте БЭК, и потоки тепла могли достигать больших положительных значений (до не-

скольких сотен Вт/м²) даже при сильных и экстремальных инверсиях. Мы полагаем, что в этом проявлялась специфика пункта ИОА, когда в отдельные интервалы времени в точку измерения поступали локальные объемы воздуха, где турбулентный поток тепла $Q_z \gg 0$. Однако средний (за 30 мин) профиль температуры воздуха над пунктом ИОА при таком локальном воздействии существенно не менялся.

Во-вторых, отметим случаи, когда в условиях приподнятых инверсий (тип 2) вблизи подстилающей поверхности, где температура убывает с высотой,

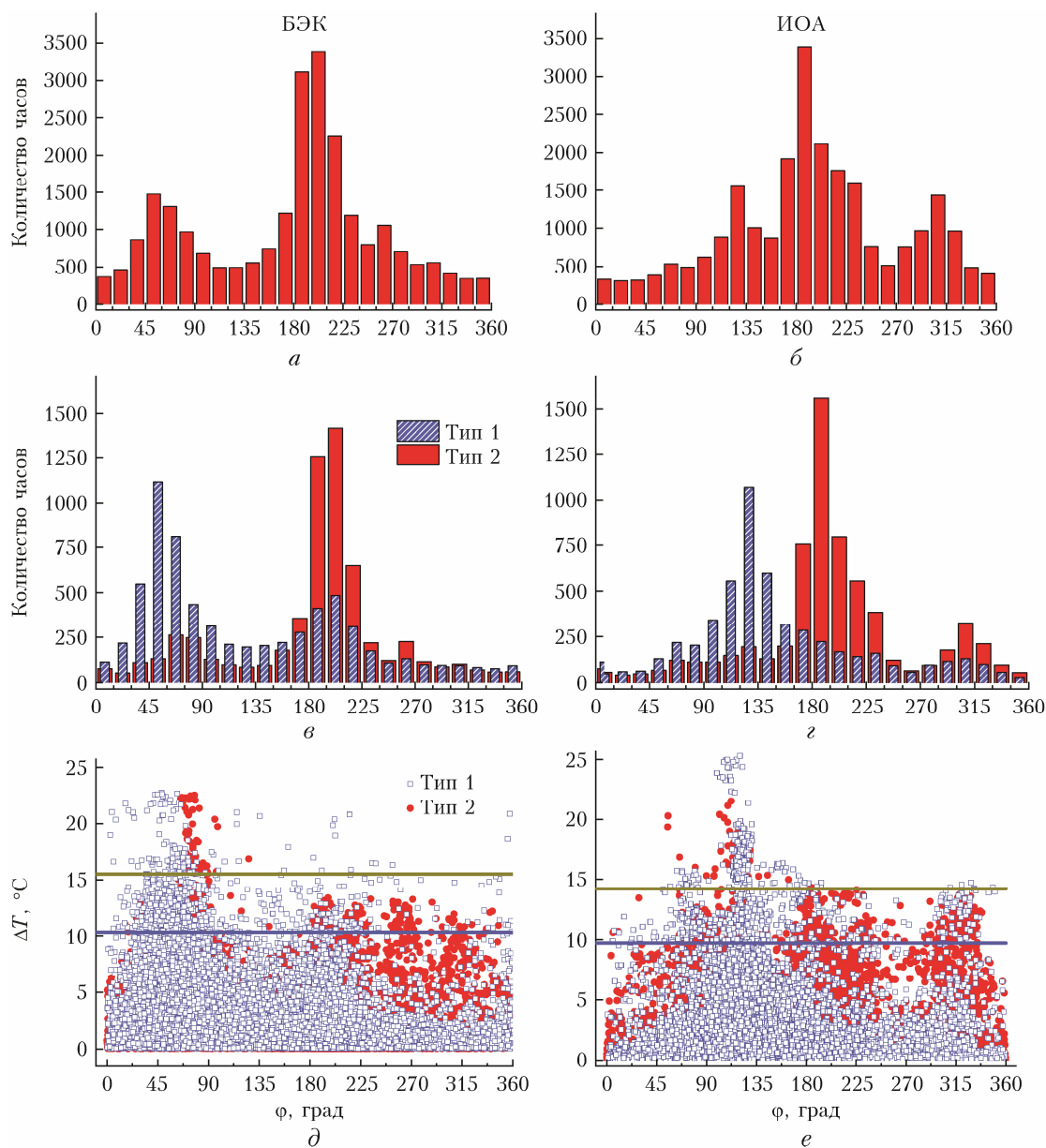


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, только для направления ветра (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

встречаются случаи, когда потоки тепла $Q_z < 0$ и могут достигать больших (по модулю) значений, хотя согласно теории должно соблюдаться условие $Q_z > 0$. Это наблюдается в обоих пунктах. Причины таких особенностей мы пока не анализировали. Но они представляют несомненный интерес с точки зрения корректного учета турбулентного теплообмена при формировании температурного профиля в пограничном слое атмосферы.

Закключение

Результаты измерений профилей температуры воздуха в слое до 1 км позволили установить, что инверсии температуры воздуха в двух различных по типам подстилающей поверхности пунктах (естественный ландшафт — пункт БЭК и урбанизиро-

ванная территория — пункт ИОА) с 2020 по 2022 г. включительно имели место примерно в половине времени наблюдений. При этом сильные (и экстремальные) инверсии возникали в основном в зимний период, хотя в пункте БЭК сильные инверсии наблюдались и летом. Наиболее часто образовывались инверсии, верхняя граница которых была ниже 1 км.

При анализе взаимосвязи характеристик температурных инверсий с метеорологическими параметрами, измерявшимися в приземном слое, основное внимание уделялось интенсивности инверсий (разности температур между границами инверсии). Интенсивность имела хорошо выраженную взаимосвязь с направлением ветра в приземном слое. Это особенно четко выражено для случаев сильных (и экстремальных) инверсий. Данный вывод справедлив для обоих пунктов наблюдения.

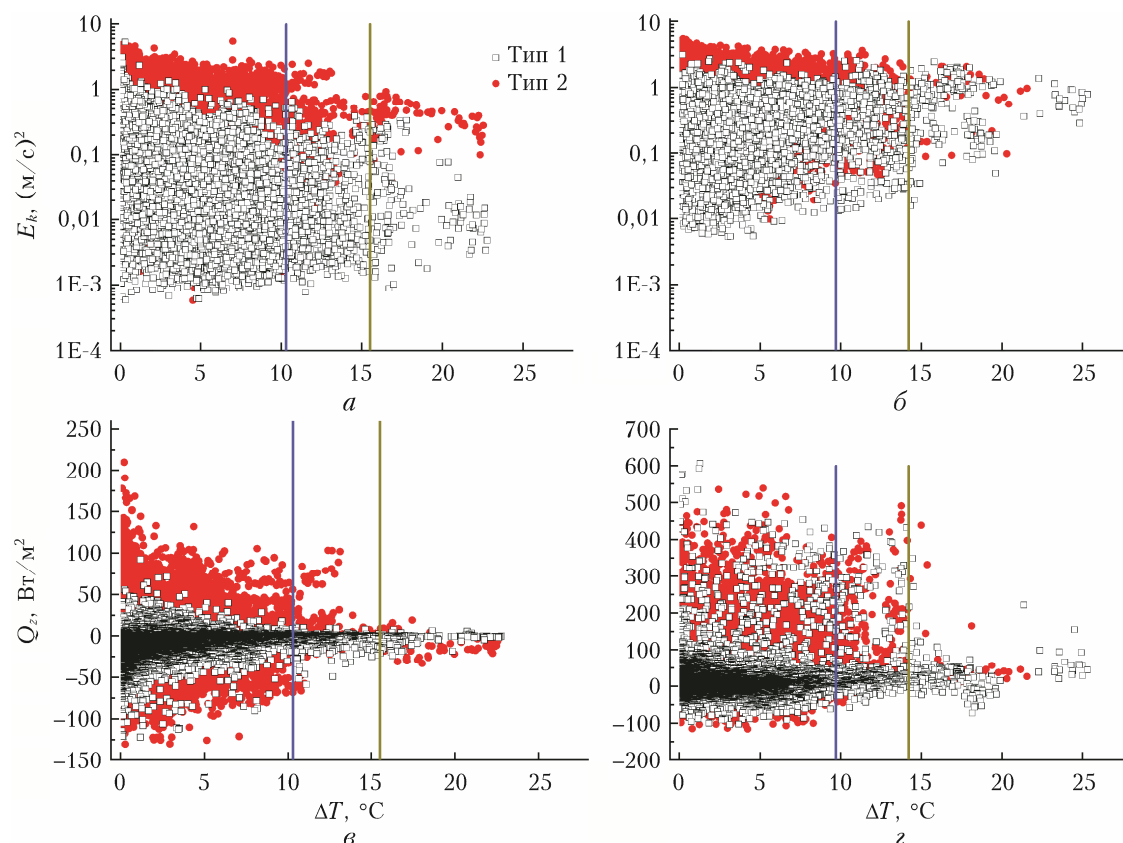


Рис. 10. Взаимосвязь интенсивности инверсий с кинетической энергией турбулентности (*а, б*) и вертикальным турбулентным потоком тепла (*в, г*) в пунктах БЭК (*а, в*) и ИОА (*б, г*). Вертикальными линиями на графиках обозначены «пороговые» значения сильных и экстремальных инверсий (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

В пункте БЭК наблюдалась явная тенденция увеличения интенсивности инверсии с уменьшением скорости приземного ветра, а в пункте ИОА такая тенденция была выражена гораздо слабее. Влияние кинетической энергии турбулентности на интенсивность инверсии заметно проявлялось в случае приземных инверсий: в пункте БЭК сильные (и экстремальные) инверсии образовывались несколько чаще при небольших значениях кинетической энергии турбулентности, а в пункте ИОА — наоборот, чаще при относительно высоких значениях. Наиболее сложная взаимосвязь интенсивности инверсий с приземным вертикальным турбулентным потоком тепла. Это относится к обоим пунктам наблюдения, но главным образом к пункту ИОА. Можно выделить две основные особенности: 1) частая реализация положительных потоков тепла в условиях приземных инверсий, когда потоки тепла должны быть отрицательными, 2) реализация отрицательных потоков тепла в условиях приподнятых инверсий, когда в слое под инверсией температура уменьшается с высотой и (по теории) потоки тепла в приземном слое должны быть положительными.

Список литературы

1. Васильев Д.Ю., Вельмовский П.В., Семенов В.А., Семенова Г.Н., Чибилев А.А. Влияние метеорологических

условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе Уфе // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 1. С. 49–58. DOI: 10.15372/AOO 20230107.

2. Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2021. Т. 57, № 6. С. 641–650. DOI: 10.31857/S0002351521060080.
3. Шкляев В.А., Костарева Т.В. Характеристики температурных инверсий и их связь с загрязнением атмосферного воздуха в г. Перми // Географ. вестн. 2019. № 1. С. 84–92. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-1-84-92.
4. Лазарева Е.О., Попова Е.С., Липовицкая И.Н. Влияние температурных инверсий на концентрацию примесей в приземном слое воздуха над Санкт-Петербургом в 2006–2014 гг. // Уч. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. 2015. № 41. С. 149–155.
5. Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н. О методике определения метеорологического потенциала загрязнения атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 725–729; Selegei T.S., Filonenko N.N., Lenkovskaya T.N. On the technique for determining the meteorological air pollution potential // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 561–565.
6. Ахметшина А.С. Инверсии температуры воздуха как фактор, влияющий на уровень загрязнения пограничного слоя атмосферы (на примере г. Томска): Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2015. 26 с.
7. Фисенко А.О., Волобуева О.В., Винокурова Е.В. Анализ и оценка температурных инверсий в Арктике //

- Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S2. С. 155–161.
8. Юшков В.П. Термическая стратификация воздушного бассейна мегаполиса: сопоставление модельных представлений и данных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 424–437. DOI: 10.31857/S0002351522030129.
 9. Демин В.И., Козелов Б.В., Лосев А.В. Особенности вертикального распределения температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в прибрежных и центральных районах Мурманской области // Phys. of auroral phenomena. Proc. XIV Annual Seminar, Apatity. 2021. Т. 44, № 1. С. 176–180. DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.041.
 10. Козлова Л.Ф. Изменение повторяемости температурных инверсий на станции Астрахань за последние годы // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та гидромет. информации – Мирового центра данных. 2020. № 187. С. 170–177.
 11. Козлова Л.Ф., Хохлова А.В. Климатические характеристики приподнятых температурных инверсий по данным аэрологических измерений на станциях Долгопрудная и Мурманск // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та гидромет. информации – Мирового центра данных. 2018. № 183. С. 135–143.
 12. Козлова Л.Ф., Хохлова А.В. Климатические характеристики приземных температурных инверсий по данным аэрологических измерений на станциях Мурманск и Смоленск // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та гидромет. информации – Мирового центра данных. 2018. № 181. С. 120–125.
 13. Локощенко М.А., Корнева И.А., Дубовецкий А.З., Кочин А.В. Температура воздуха в нижней тропосфере над Москвой во время аномальной жары летом 2010 г. // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 906–913; Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Dubovetsky A.Z., Kochin A.V. Air temperature in the lower troposphere over Moscow during heat wave in the summer of 2010 // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 3. P. 267–273.
 14. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // Уч. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. 2015. № 40. С. 150–159.
 15. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Изв. Тул. гос. ун-та. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 59–75. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75.
 16. Назарчук О.В. Исследование процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников в условиях температурной инверсии и штиля // Проблемы недропользования. 2021. № 4. С. 97–104. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.097.
 17. Базавлук В.А., Серяков С.В. Влияние инверсии температуры воздуха на геокриологические условия осваиваемых территорий // Вестн. Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2015. № 3. С. 210–218.
 18. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В. Оценки влияния турбулентности и регулярной рефракции на характеристики лазерного пучка в пограничном слое атмосферы. Часть 2. Уширение лазерного пучка при сильной регулярной рефракции // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 798–804; Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V. Estimation of the turbulence and regular refraction effect on laser beam parameters in the atmospheric boundary layer: Part 2, Laser beam broadening under strong regular refraction // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 26–32.
 19. 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 2. Рефракция лазерного луча // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 829–833; 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 2, Laser beam refraction // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 445–450.
 20. Асанов С.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Игнатьев А.Б., Матвиенко Г.Г., Морозов В.В., Тарасенкова А.В. Прогноз распространения интенсивного лазерного излучения ближнего и среднего ИК спектральных диапазонов при работе на наклонных высотных атмосферных трассах // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 167–176; Asanov S.V., Geintz Yu.E., Zemlyanov A.A., Ignatyev A.B., Matvienko G.G., Morozov V.V., Tarasenkova A.V. Forecast of intense near- and mid-IR laser radiation propagation along slant atmospheric paths // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 315–323.
 21. Асанов С.В., Белов В.В., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Дудоров В.В., Землянов А.А., Игнатьев А.Б., Канев Ф.Ю., Колосов В.В., Коняев П.А., Лукин В.П., Матвиенко Г.Г., Морозов В.В., Носов В.В., Пономарев Ю.Н., Пташник И.В., Тарасенков М.В. Оптическая модель земной атмосферы для интенсивного лазерного излучения ближнего и среднего ИК спектральных диапазонов // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 338–345.
 22. Zeng H., Tian P., Zhang M., Cao X., Liang J., Zhang L. Rapid change in surface-based temperature inversions across the World during the last three decades // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2022. V. 61. P. 175–184. DOI: 10.1175/JAMC-D-21-0093.1.
 23. Mahrt L., Acevedo O. Types of vertical structure of the nocturnal boundary layer // Bound.-Lay. Meteorol. 2022. DOI: 10.1007/s10546-022-00716-7.
 24. Zhang L., Ding M., Dou T., Huang Y., Lv J., Xiao C. The shallowing surface temperature inversions in the Arctic // J. Clim. 2021. V. 34, N 9. P. 4159–4168. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0621.1.
 25. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Изд-во Физматкина, 2015. 171 с.
 26. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Ганьшин Е.В., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н. Современный опыт использования данных наземных микроволновых радиометрических систем для измерения параметров атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 502–508. DOI: 10.15372/AOO20170609.
 27. Юшков В.П. Что может измерять температурный профиломер? // Метеорол. и гидрол. 2014. № 12. С. 76–88.
 28. Юшков В.П. Оценка пространственных неоднородностей температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 1012–1022; Yushkov V.P. Estimation of spatial inhomogeneities of thermal stratification in the boundary layer of the Moscow Megalopolis from remote sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 56–66.
 29. 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 атмосф. 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.
30. *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; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V.* Height of the region of intense turbulent heat exchange in a stably stratified atmospheric boundary layer: Part 1 – Evaluation technique and statistics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 1. P. 34–44.
31. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы*. 2009. № 7. С. 21–25.
32. *Kamardin A.P., Nevzorova I.V., Odintsov S.L.* Statistics of air temperature inversions in the atmospheric boundary layer // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11916.
33. *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 атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 11. С. 880–889; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V.* Height of the region of intense turbulent heat exchange in a stably stratified boundary layer of the atmosphere. Part 2: Relationship with surface meteorological parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 2. P. 117–127.
34. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Статистика внешних масштабов турбулентности в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 3. С. 212–220; *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.

A.P. Kamardin, V.A. Gladkikh, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. **Statistics of air temperature inversions in the atmospheric boundary layer over Tomsk.**

Characteristics of air temperature inversions in the atmospheric boundary layer (frequency of occurrence, intensity, and depth) up to a 1-km height are analyzed based on experimental MTP-5 (meteorological temperature profiler) data obtained in 2020–2022. Air temperature profiles were measured simultaneously at a site with natural landscape (Tomsk suburbs) and over an urban territory (Akademgorodok, outskirts of Tomsk). Temperature inversions were observed in approximately half of the observation period. The statistics of various forms and types of inversions for different seasons is presented. The correlation between the inversion intensity and weather parameters in the surface air layer is considered. A significant effect of the wind direction on the inversion intensity is noted.