

**А.А. Исаев, М.А. Каллистратова, М.А. Локощенко, М.С. Пекур**

## **ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД МОСКВОЙ**

Приведены результаты комплексного эксперимента по исследованию термической структуры пограничного слоя над Москвой прямыми и дистанционными методами. Профили температуры измерялись датчиками на Останкинской телебашне и на низкоуровневых радиозондах в ЦАО (г. Долгопрудный). Дистанционные наблюдения проводились с помощью трех акустических локаторов (сонаров) в Москве и в Звенигороде. Тип стратификации определялся по факсимильным записям эхосигнала содара. Проведены сопоставления одновременных данных разных методов, получена оценка пространственной неоднородности стратификации температуры нижнего воздушного слоя над Москвой, а также исследованы повторяемости ее основных типов в летнее время. Сравнение результатов одновременного акустического зондирования в трех пунктах выявило закономерности влияния крупного города на термическую структуру АПС.

### **Введение**

Термическая стратификация атмосферного пограничного слоя (АПС) играет важную роль в метеорологии загрязнений, определяя высоту слоя перемешивания и интенсивность турбулентной диффузии антропогенных примесей. АПС над большими городами имеет не только ряд общих черт, как, например, наличие <острова тепла>, но и индивидуальные особенности, связанные с климатом и ландшафтом местности, а также с плотностью застройки. Поэтому для оценки потенциала загрязнения каждого города приходится проводить специальные исследования.

В районе Москвы такие сопоставления неоднократно проводились на высотных измерительных комплексах в Останкино и Обнинске, а также с помощью радиозондов в Долгопрудном [2–5]. Однако измерений в одном городском и двух загородных пунктах недостаточно для характеристики АПС над большим городом, занимающим площадь около 1000 км<sup>2</sup>.

Перспективным способом исследования структуры АПС является акустическая локация атмосферы [6–13]. Факсимильные записи эхосигнала моноэхоэтического содара позволяют определить тип термической стратификации, т.е. регистрировать конвективные условия, приземные и приподнятые инверсии, нейтральную стратификацию. Нами использовалась методика интерпретации факсимильных эхограмм, основы которой разработаны в Институте физики атмосферы РАН (ИФА РАН) и детально изложены в [12, 13].

В течение 3-х лет проводились непрерывные круглосуточные содарные наблюдения на территории Метеорологической обсерватории МГУ (юго-западный сектор города), а также периодические месячные серии наблюдений в центре города (на крыше здания ИФА) и на Звенигородской научной станции ИФА (45 км от Москвы). Сравнение результатов синхронного зондирования в разных пунктах, приведенное в [11, 13], показало, что тип стратификации в основном близок в пределах города (за исключением переходных периодов в утренние и вечерние часы). В то же время аналогичное сопоставление содарных результатов (МГУ) и результатов измерений профилей температуры на Останкинской телебашне обнаружило сильное расхождение результатов.

Это могло объясняться либо реальными отличиями структуры пограничного слоя в Останкино и МГУ (расстояние между этими пунктами около 14 км), либо погрешностями в определении стратификации одним из сравниваемых методов. Для выяснения этого вопроса, а также для более детального исследования пространственной структуры АПС был поставлен комплексный эксперимент. Подробное описание его и часть предварительных результатов содержатся в [14]. В настоящей статье они дополнены данными зондирования в Звенигороде и сопоставлением содарной информации в трех пунктах.

## 2. Постановка эксперимента и методика наблюдений

Эксперимент проходил с 24 июня по 25 июля 1991 г. и включал в себя:

- круглосуточные факсимильные записи эхосигнала трех содаров (рядом с Останкинской телебашней, в центре города и под Звенигородом);
- измерения профилей температуры и скорости ветра на телебашне по специальной программе;
- измерения температуры и скорости ветра на трех уровнях 4-метровой метеорологической мачты, установленной в 80 м от телебашни;
- измерения профилей температуры и скорости ветра с помощью низкоуровневых и стандартных радиозондов, запускаемых в Центральной аэрологической обсерватории в Долгопрудном (13 км к северу от Останкино).

Кроме того, для анализа результатов были привлечены измерения температуры и скорости ветра в тот же период на 300-метровой метеорологической мачте в Обнинске (108 км к югу от Останкино). Ниже приведено краткое описание аппаратуры и методики измерений.

На расстоянии 400 м от телебашни, на крыше здания высотой 10 м был установлен перевезенный из МГУ содар <ЭХО-1> (см. [15]). Его основные параметры:  $f=1666$  Гц,  $\Delta h=13$  м,  $P=75$  Вт,  $\Delta H=50-800$  м (символами  $f$ ,  $\Delta h$ ,  $P$  и  $\Delta H$  обозначены соответственно несущая частота, пространственное разрешение, электрическая мощность излучения и аппаратурный высотный диапазон). В центре города (на крыше ИФА) и на Звенигородской научной станции ИФА работали два идентичных содара <ЛАТАН-1> (см. [10, 12]) с параметрами:  $f=2000$  Гц,  $\Delta h=17$  м,  $P=100$  Вт,  $\Delta H=30-850$  м (в ИФА  $\Delta H=30-560$  м). Тип стратификации определялся по факсимильной записи для каждого часа по методике [12, 13] и записывался в виде кода для последующей статистической обработки.

Высотная автоматизированная система метеорологических измерений <АСМИБ-Г> на телебашне описана в [16, 17]. Во время эксперимента температура измерялась на уровнях 2, 85, 128, 201, 253, 385 и 503 м, а скорость и направление ветра – на уровнях 15, 128, 201 и 253 м. С 24 по 30 июня измерения проводились один раз в три часа, а с 1 июля стали ежечасными. Тип стратификации определялся двумя способами: по эквitemпературному  $\gamma = \Delta t / \Delta z$  и сухоадиабатическому  $\gamma_h = \Delta \theta / \Delta z$  градиентам (два варианта использовались для того, чтобы попытаться получить лучшее согласие с содарными данными).

К неустойчивой стратификации отнесены случаи, когда  $\gamma \leq \gamma_a$  ( $\gamma_h \leq 0$ ), где  $\gamma_a = -0,98^\circ/100$  м, к инверсионной и слабоустойчивой – когда  $\gamma > 0$  и  $\gamma > \gamma_a + 0,1^\circ/100$  м соответственно. По измерениям на телебашне к стратификации, близкой к нейтральной, относились те случаи, когда из шести значений  $\gamma$ , определенных по разности отсчетов  $t$  на соседних по высоте уровнях, по меньшей мере 3 не подряд были одновременно нулевыми, или как минимум 4 не превышали значения  $\gamma = 0,1^\circ/100$  м. Тот же критерий с соответствующим сдвигом применялся и для градиента потенциальной температуры  $\theta$ . Такой сложный способ определения типа стратификации вызван большой изрезанностью профилей  $t$ , которая будет обсуждаться ниже.

На 4-метровой мачте проводились измерения температуры  $t$  психрометрами Ассмана на высотах 1 и 4 м и скорости ветра  $v$  анемометром Фусса на высоте 2 м одновременно с отсчетами на телебашне. По этим данным рассчитывался аналог параметра устойчивости  $B_2 = 0,067(t_4 - t_1)/v_2^2$ , по которому косвенно оценивалась степень устойчивости приземного слоя в терминах классов Пасквила согласно рекомендациям Н.Л. Бызовой [18].

За время эксперимента было произведено 77 запусков радиозондов, из них 58 стандартных и 19 низкоуровневых, с разрешением по вертикали при измерениях  $t$ , равным 100 и 35 м соответственно. Такое разрешение сопоставимо с разностями высот датчиков телебашни. Было произведено 33 запуска ночью, 6 утром, 35 днем и 3 вечером. Определение типов стратификации проводилось также и по эквitemпературному, и по сухоадиабатическому градиентам.

Отметим, что синоптические условия в Москве в период эксперимента были достаточно разнообразными. Однако за исключением первой недели с очень жаркой погодой, в целом значения основных метеовеличин оказались типичными для середины лета.

## 3. Предварительный анализ данных системы <АСМИБ-Г>

Сопоставление данных содарного зондирования на территории МГУ с измерениями на телебашне проводилось нами в 1990–1991 гг. с целью изучения пространственной

неоднородности АПС. Основанием для такого сопоставления, помимо многочисленных зарубежных данных о согласии содарных и градиентных оценок типа стратификации (см., например, обзор [19]), служило непосредственное сравнение данных Останкинской телебашни с факсимильными записями содара <Аэровайронмент>, работавшего рядом с башней в 1981 году (еще до подключения системы <АСМИБ-Г>). В этом сравнении [20] отсутствовали статистические данные, но приведенный единичный пример демонстрировал хорошее согласие содарного изображения приземной инверсии с температурными профилями.

Однако, по нашим данным, за полтора года приземные инверсии были отмечены одновременно в МГУ и Останкино лишь в 28% от общего количества часов их обнаружения в обоих пунктах. Различными оказались и повторяемости типов стратификации: по данным температурных профилей в Останкино приземные инверсии существовали в 23,6%, а приподнятые – в 60,1% от общего времени наблюдений, в то время как содарное зондирование показало значения 40,9 и 17,1% соответственно.

В первую очередь нами была тщательно проанализирована возможность погрешностей интерпретации содарных данных, связанных с наличием у содара <мертвой зоны>, а также нижнего <местника> – отражения от близко расположенных зданий. Отдельное сопоставление тех же данных с профилями, полученными в Останкино без учета двух нижних датчиков (т.е. в слое от 128 м и выше, где влияние <местника> заведомо не сказывается), не привело к заметному повышению согласования в регистрации приземных инверсий. В то же время была обнаружена большая изломанность <башенных> профилей температуры с локализацией приподнятых инверсий в одном и том же диапазоне высот от 128 до 253 м. На рис. 1, а приведен пример профилей температуры для различных сроков наблюдений, усредненных за октябрь 1990 г., на которых хорошо виден излом на этих высотах.

Усредненные за весь период эксперимента профили  $t$ , полученные на телебашне, высотной мачте в Обнинске и радиозондами, представлены на рис. 1, б. В 3 и 15 ч производились измерения соответственно в Останкино и Обнинске; в 2.30 и 14.30 – запуски в Долгопрудном (здесь – только стандартные). Как видно, изрезанность профилей по измерениям на телебашне вновь проявилась и днем, и ночью на высотах от 150 до 300 м. Данные же радиозондирования и измерений в Обнинске демонстрируют обычный сглаженный высотный ход. Специфика условий Долгопрудного (фактически – пригорода Москвы) в сравнении с удаленным Обнинском выражена в более высокой температуре у Земли и в менее интенсивной инверсии ночью, что является одним из проявлений городского <острова тепла> [1]. Днем в Долгопрудном стратификация более неустойчивая, чем в Обнинске, что также подтверждает известные в климатологии города закономерности.

Отметим, что указанные особенности профилей в Останкино были замечены и раньше, и имеются попытки их объяснения, подробно рассмотренные в [14]. Здесь мы упомянем лишь гипотезу Г.П. Фарапоновой [21] о термическом влиянии аэрозольного слоя как причине постоянно локализованной на высотах от 150 до 300 м приподнятой инверсии над Москвой – независимо от сезона и времени суток. Хорошо известно, что при интенсивных вторжениях (т.е. при смене воздушных масс, связанной с большими горизонтальными градиентами температуры) происходит вымывание аэрозоля из нижней атмосферы. При адвекции холода дополнительным очищающим эффектом служит отрыв от Земли и пузырьреобразный подъем под действием сил плавучести перегретого городского воздуха вскоре после прохождения холодного фронта. С учетом этого явления мы исследовали форму профилей  $t$  по данным измерений на телебашне и радиозондирования при таких ситуациях. Для этого были рассчитаны величины геострофической составляющей адвекции температуры по картам  $AT_{850}$  и выделено 10 случаев интенсивных вторжений за время эксперимента. На рис. 1, в представлены ночные и дневные вертикальные профили  $t$ , усредненные за периоды интенсивной адвекции. Как видно из рисунка, излом <останкинских> профилей на высотах в эти периоды сохраняется, что противоречит гипотезе [21]. Отметим также странное отклонение <останкинского> градиента температуры на высоте от 400 до 500 м днем от адиабатического. Данные же зондов, как и в целом за месяц, представляют типичное изменение  $t$  с высотой и днем, и ночью. Таким образом, еще до прямого сопоставления содарных данных с измерениями <АСМИБ-Г> у нас появились сомнения в возможности использования последних для определения температурного градиента.

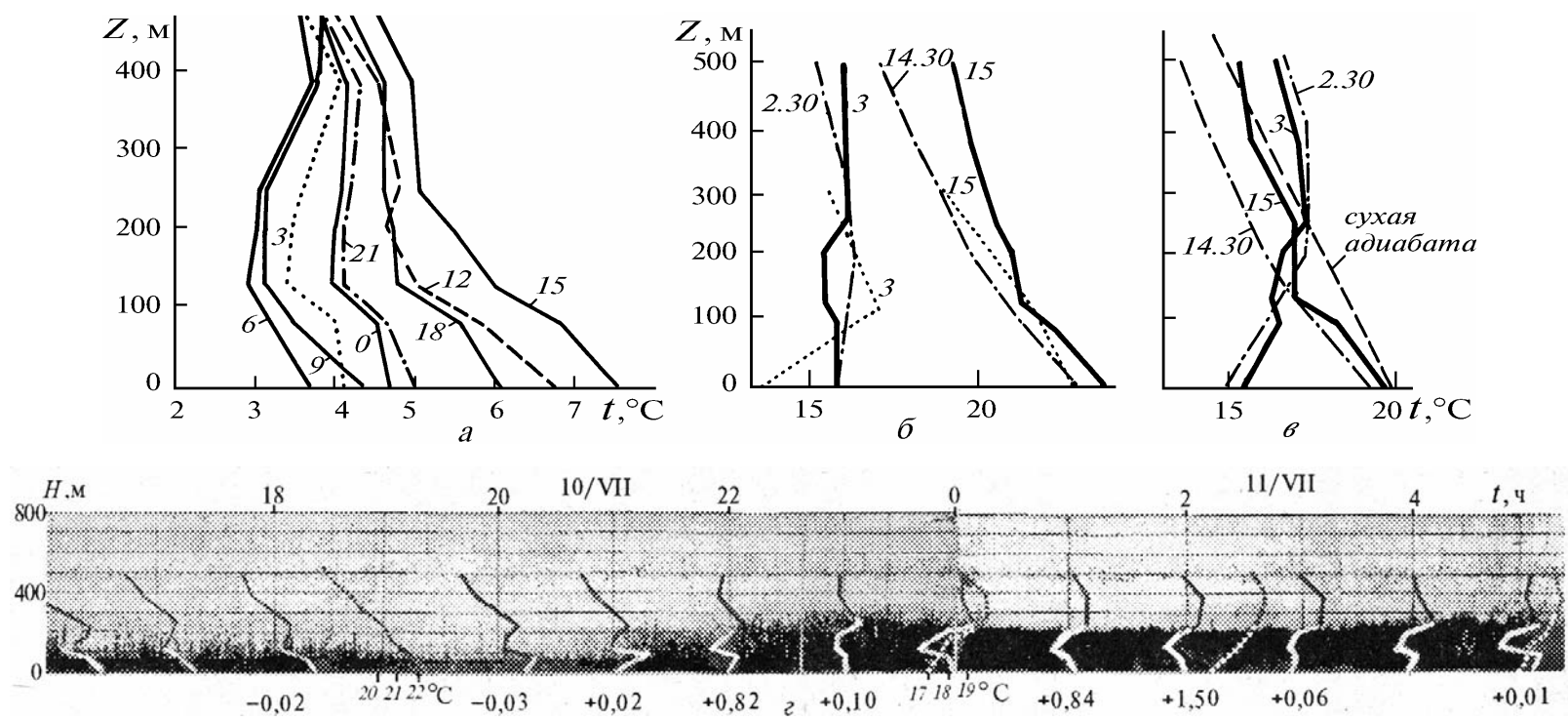


Рис. 1. Вертикальные профили температуры по данным: *a* – измерений на телебашне, усредненных за октябрь 1990 г.; *б* – измерений в трех пунктах, усредненных за время эксперимента; *в* – измерений на телебашне и радиозондирования, усредненных в периоды интенсивной адвекции температуры за время эксперимента; *г* – измерений на телебашне и радиозондирования, наложенные на факсимильную запись содара в Останкино 10–11 июля 1991 г. (слой почернения на записи ночью соответствует области инверсии, внизу приведены значения  $B_2$ ). На фрагментах *a*, *б*, *в* у кривых отмечено время измерений в часах; на *б*, *в* – сплошные линии – Останкино; штрихпунктирные – Долгопрудный; точки – Обнинск. На фрагменте *г* сплошные линии – датчики телебашни; точки – радиозонды в Долгопрудном

#### 4. Сопоставления типов стратификации, определенных разными методами

На рис. 1, 2 приведен типичный фрагмент факсимильной эхограммы содара <ЭХО-1> с нанесенными на нее профилями температуры по данным <АСМИБ-Г> и радиозондирования. Внизу цифрами указаны значения параметра устойчивости  $B_2$  в приземном слое. По эхограмме надежно идентифицируется конвективная стратификация до 19 ч, близкая к нейтральной в период с 19 до 20.30–21.00 ч и приземная инверсия в последующие часы, что находится в хорошем согласии с результатами радиозондирования и значениями  $B_2$ . В то же время профили на телебашне показывают наличие постоянной приподнятой инверсии, а также отсутствие приземной и даже слою с неустойчивой стратификацией в период от полуночи до 02 ч. Горизонтальная линия на высоте  $\approx 500$  м – это помехи переотражения от телебашни (<местник>).

Коэффициенты корреляции  $R$  между значениями  $\gamma$  в нижней части АПС и степенью термической устойчивости по данным одновременных измерений разными методами за весь период эксперимента приведены в табл. 1. Для их расчета содарные данные и данные градиентных измерений в 4-метровом слое были разделены на 7 классов устойчивости Пасквилла. Принципиальная возможность подобного представления содарных данных проверена в [22].

Таблица 1

Коэффициенты корреляции $R$ между $\gamma$ и типами стратификации ( $n$ – объем выборки)			
Содар	Телебашня		$n, \text{ ч}$
	2–85 м	2–128 м	
		0,38/0,40*	0,43/0,47*
	Низкоуровневый радиозонд	Телебашня (2–128 м)	$n, \text{ ч}$
Телебашня (2–128 м)	0,42	1,00	19
Содар	0,77	0,57	19
	Мачта	Телебашня(2–128 м)	$n, \text{ ч}$
Телебашня(2–128 м)	0,48	1,00	51
Содар	0,84	0,60	51

\*В числителе даны значения  $R$ , полученные при определении стратификации по содарным данным за часовой интервал, в знаменателе – за последние десять минут каждого часа (т.е. точно в момент измерения  $t$  на телебашне).

Как видно из этой таблицы, корреляция между данными телебашни и всех других методов низка. Попытка более точного совмещения во времени содарных отсчетов с отсчетами на телебашне при объеме выборки 578 ч не повышает заметно согласованности. Данные же содара достаточно хорошо коррелируют с результатами как низкоуровневого радиозондирования, так и градиентных измерений в самом нижнем слое. Отметим, что расхождения в оценках  $\gamma$  и степени устойчивости между содаром и последними двумя методами возникали в основном ранним утром, когда отрыв радиационной инверсии и начало развития конвекции у поверхности замаскированы на факсимильной записи из-за <мертвой зоны> и нижнего <местника>.

В табл. 2 приведены повторяемости различных типов стратификации по содарным данным и измерениям системой <АСМИБ-Г> по выборке в 578 ч, а также с добавлением данных радиозондов по выборке в 74 ч. Приподнятые инверсии и устойчивые слои регистрировались на башне в 5 раз чаще, чем содаром. Приземные инверсии, напротив, чаще отмечались на эхограммах. Конвекция в отсутствие запирающих слоев регистрировалась содаром в 3,5 раза чаще. Повторяемости типов стратификации, рассчитанные для содара и <АСМИБ-Г> по меньшей выборке, обнаруживают те же закономерности, а данные радиозондов лучше согласуются с содарной информацией. Аномально высокая повторяемость приподнятых инверсий, регистрируемых на телебашне, не подтверждается ни содаром, ни радиозондами. Отметим, что абсолютные значения повторяемости неустойчивой

стратификации по выборке в 74 ч несколько завышены из-за непропорционально большого числа запусков зондов в середине дня.

Таблица 2

Повторяемости типов стратификации температуры ( <i>n</i> – объем выборки, ч)						
Типы	1	2	3	4	5	<i>n</i> , ч
Содар	30,1	5,1	12,3	35,5	17,0	578
<АСМИБ-Г>, $\Delta T/\Delta z$	2,9	18,7	63,8	10,4	4,2	<
<АСМИБ-Г>, $\Delta \Theta/\Delta z$	10,9	42,0	45,5	–	1,6	<
Содар	33,8	8,1	8,1	44,6	5,4	74
<АСМИБ-Г>, $\Delta T/\Delta z$	4,0	23,0	54,1	12,2	6,7	<
Радиозонды	29,7	–	13,5	54,1	2,7	<

Примечания. Наблюдения одновременные: системой <АСМИБ-Г> на телебашне, содаром в Останкино и радиозондами в Долгопрудном. Тип 1 – одиночные приземные инверсии; 2 – приземные и приподнятые инверсии одновременно; 3 – приподнятые инверсии в отсутствии приземных; 4 – конвективные условия; 5 – стратификация, близкая к нейтральной.

В табл. 3 приведено количество часов одновременных наблюдений приземных инверсий и приземных сухоустойчивых слоев содаром и системой <АСМИБ-Г>. Сравнение выполнено отдельно как за все время эксперимента, так и за период с антициклональным типом погоды (с 24 июня по 8 июля). Одновременно зарегистрированные на телебашне и содаром приземные инверсии составили менее одной трети от всех, отмеченных обоими методами (при антициклональной погоде – около 40%). При пересчете тех же данных <АСМИБ-Г> по сухоадиабатическому градиенту общих случаев оказалось опять-таки менее половины и за весь период, и за первые 2 недели.

Таблица 3

Зарегистрировано	Сопоставление приземных инверсий и приземных сухоустойчивых слоев, отмеченных содаром и системой <АСМИБ-Г> за время эксперимента			
	Весь период, 578 ч (24/VI – 25/VII)		Период с антициклональной погодой, 232 ч (24/VI – 8/VII)	
	$\Delta T/\Delta z$	$\Delta \Theta/\Delta z$	$\Delta T/\Delta z$	$\Delta \Theta/\Delta z$
Только содаром	129 (22,3)	42 (7,3)	45 (19,4)	15 (6,4)
Только <АСМИБ-Г>	52 (9,0)	147 (25,4)	25 (10,8)	65 (28,0)
Одновременно	76 (13,1)	163 (28,2)	46 (19,8)	76 (32,8)
Отсутствие по данным обоих методов	321 (55,6)	226 (39,1)	116 (50,0)	76 (32,8)

Примечание. Цифрами указано количество часов, в скобках – процент от общего времени наблюдения.

Приподнятые инверсии отмечались обоими методами 507 ч (в основном – на телебашне). Выше 503 м они наблюдались на эхограммах всего 3 ч. К совпадениям отнесены все случаи, когда нижняя граница приподнятой инверсии, фиксируемой содаром, оказывалась хотя бы не выше, чем верхняя граница излома на температурном профиле (и наоборот). Но даже при таком либеральном подходе общие случаи составили всего 58 ч, т.е. 2/3 от всех слоев, зарегистрированных содаром (86 ч) и лишь 12% от времени существования приподнятых инверсий по данным <АСМИБ-Г> (479 ч). Таким образом, данные об инверсиях, полученные в одном пункте двумя методами, сильно расходятся между собой.

На рис. 2 представлено схематичное сопоставление результатов одновременных наблюдений тремя методами во всех пунктах проведения эксперимента (с добавлением содарного зондирования в центре Москвы и под Звенигородом). Черные секторы кругов около стрелок, соединяющих попарно разные источники информации, показывают, насколько часто наличие или отсутствие приземной инверсии определялось одновременно обоими методами (цифры даны в процентах). Видно, что данные содара в Останкино значительно лучше, чем измерения на телебашне, согласуются с другими источниками. Сами они на расстоянии всего в 400 м в среднем лишь в двух случаях из трех обнаруживают совпадение с точностью до знака  $\gamma$ . В то же время этот показатель доходит до 85–90% для других пар источников, достаточно далеко расположенных друг от друга. Это означает, что пространственная неоднородность термической стратификации в районе Москвы существенно меньше погрешностей ее определения с помощью

системы <АСМИБ-Г>. Отметим, что произведенное 20 лет назад аналогичное сопоставление данных радиозондирования в ЦАО и измерений на Останкинской телебашне показало совпадение в 90% случаев [2]. Этот факт, так же как и результаты выполненных более 10 лет назад сопоставлений [20], свидетельствуют о высоком качестве измерений на телебашне в те годы.

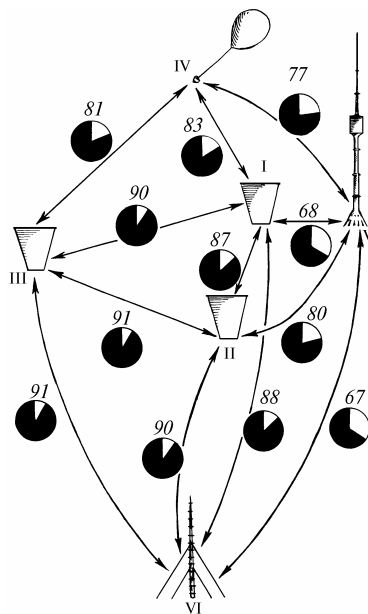


Рис. 2. Пространственная неоднородность температурной стратификации нижней атмосферы в районе Москвы. Для наглядности те же значения даны в виде зачерненных секторов кружков. Источники: I – содар в Останкино, II – содар в центре Москвы, III – содар под Звенигородом, IV – радиозонды в Долгопрудном, V – измерение на телебашне в Останкино, VI – на высотной мачте в Обнинске

Анализ профилей скорости ветра не входит в задачи данной статьи. Эта часть результатов эксперимента освещена в [14].

### 5. Оценка пространственной неоднородности термической структуры АПС над Москвой по содарным данным

Рис. 2 показывает достаточно высокую однородность термической стратификации нижнего воздушного слоя над Москвой и ее пригородами. Если исключить из рассмотрения результаты измерений на телебашне, то оставшиеся 8 парных связей между тремя акустическими локаторами, радиозондами и измерениями в Обнинске обнаруживают в среднем совпадение в 87–88% по знаку  $\gamma$ . Однако это сопоставление проведено по небольшой выборке (72 ч), которая к тому же содержит мало данных о переходном времени суток. Более надежно сравнение информации трех содаров за весь период между собой. Совпадения в регистрации наличия приземных инверсий или их отсутствия в ИФА и Останкино составили 88,1% за 464 ч совместных наблюдений обоими локаторами; в Звенигороде и Останкино – 84,5% за 387 ч; в ИФА и Звенигороде – 83,6 за 373 ч. Итак, по результатам эксперимента можно заключить, что летом в районе Москвы на расстояниях порядка  $10^4 \div 10^5$  м нижняя атмосфера стратифицирована одинаково в среднем в 85–90% случаев.

Подтверждение изложенными выше результатами надежности содарных оценок типа термической стратификации позволило нам более детально проанализировать пространственную неоднородность АПС с помощью трех содаров, которые [в отличие от эпизодических, из-за их высокой стоимости, запусков низкоуровневых радиозондов и от срочных (один раз в 3 ч) измерений на башне] дают непрерывную круглосуточную информацию.

На рис. 3 приведены попарные сопоставления типов стратификации, одновременно зарегистрированных содарами в разных пунктах: в центре Москвы, в Останкино (периферия города) и под Звенигородом (сельская местность в Подмосковье). Степень согласованности в регистрации приземных инверсий, а также конвективных условий составляет 70–80%, а доля

одновременно отмеченных случаев в наименьшей из двух общей выборке данного типа – 80–90% и даже выше. При этом приземные инверсии регистрируются реже, а неустойчивость – чаще по направлению от периферии к центру города. Согласованность приподнятых инверсий в пространстве проявляется слабее; закономерности в их распределении относительно центра города не видно: как в ИФА, так и в Звенигороде они регистрировались чаще, чем в Останкино. Нейтральная и слабоустойчивая стратификация, реализующаяся летом обычно лишь в вечерние часы, наблюдается одновременно в двух пунктах относительно реже, чем другие ситуации. Вместе с тем этот тип распределен приблизительно симметрично в каждой из парных выборок, т.е. не обнаруживает заметного влияния города.

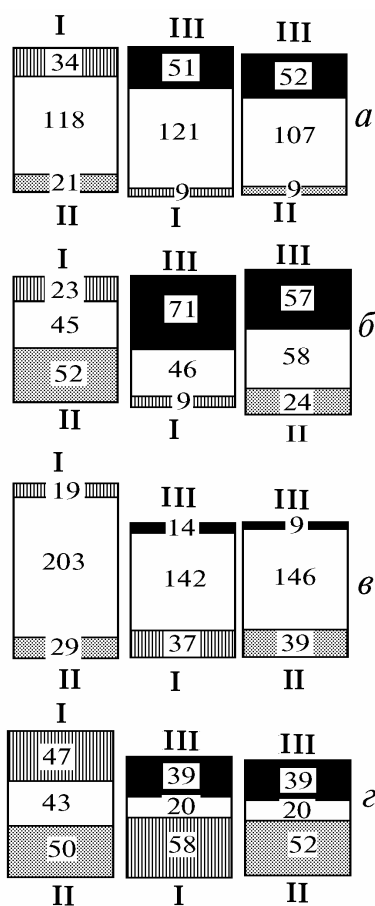


Рис. 3. Диаграммы сопоставлений типов стратификации, отмеченных содарами в двух пунктах одновременно за время эксперимента. Цифрами указано количество часов, в течение которых данный тип наблюдался только в одном пункте, или только в другом, или в двух одновременно. *a* – приземные инверсии; *б* – приподнятые инверсии; *в* – конвекция; *г* – нейтральная и слабоустойчивая стратификация. I – только в Останкино; II – только в ИФА (центр города); III – только в Звенигороде; белое поле – одновременно в обоих пунктах

Круговые диаграммы на рис. 4, рассчитанные за 361 ч одновременной работы всех трех содаров, более наглядно показывают относительную частоту наблюдения различных типов стратификации в каждом из 3-х пунктов, подтверждая сделанные на основании рис. 3 выводы. Общая повторяемость приземных инверсий (горизонтальная штриховка) составила 29,8% в ИФА, 32,4% в Останкино и 42,0% в Звенигороде. Повторяемость же конвекции (сектор с точками) меняется противоположным образом, возрастая от 41,0% в Звенигороде до 50,4% в центре города. Приподнятые инверсии (три черных сектора в соответствии со стратификацией в приземном слое) отмечались в Останкино реже, чем в других пунктах. Нейтральные и слабоустойчивые ситуации (белый сектор) регистрировались несколько чаще в городе, вероятно, вследствие более медленного здесь формирования приземной инверсии вечером.



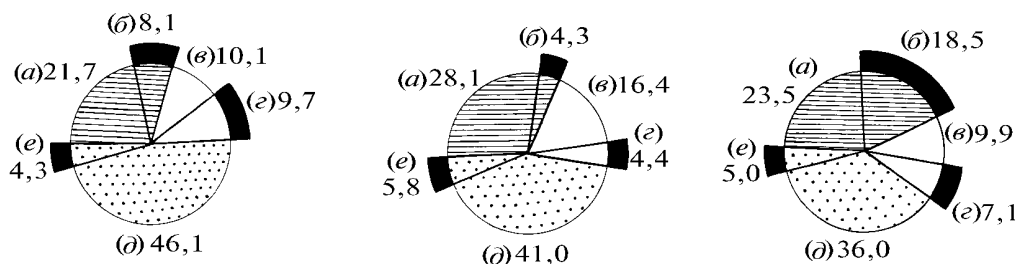


Рис. 4. Повторяемость (в процентах) типов стратификации температуры в часы одновременных наблюдений всеми тремя содарами: *a* – приземных инверсий в отсутствие приподнятых; *б* – приподнятых инверсий над приземными; *в* – нейтральной и слабоустойчивой стратификации в отсутствие приподнятых инверсий; *г* – приподнятых инверсий над нейтральной и слабоустойчивой стратификацией; *д* – конвекции в отсутствие приподнятых инверсий; *е* – <запертой> конвекции (под приподнятыми инверсиями). Слева направо: центр Москвы (ИФА), Останкино, Звенигород

Отметим, что одновременные наблюдения типа стратификации двумя содарами летом 1990 г. [11] показывали существенно большие различия в режиме приземных инверсий и конвекции между ИФА и МГУ, чем год спустя между ИФА и Останкино. Поскольку оба пункта (МГУ и Останкино) примерно равноудалены от центра Москвы, этот факт наводит на мысль о возможной несимметричности, т.е. некотором смещении к северу структуры <острова тепла> и создаваемой им циркуляции над городом. Здесь сказываются, по-видимому, особенности городской застройки, плотность которой неравномерна в разных районах. Для проверки этого предположения необходимо увеличить число пунктов зондирования.

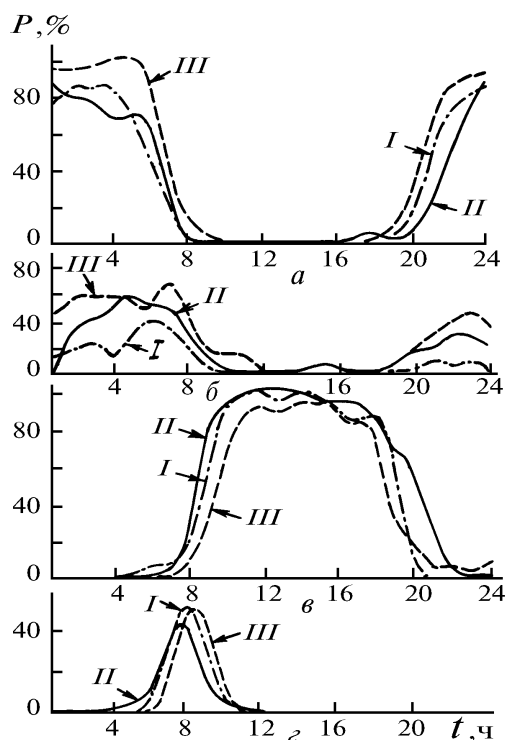


Рис. 5. Суточный ход повторяемостей типов стратификации в часы одновременных наблюдений тремя содарами: *a* – приземных инверсий; *б* – приподнятых инверсий над нейтральной и слабоустойчивой стратификацией; *в* – конвекции в отсутствие приподнятых инверсий; *г* – конвекции под приподнятыми инверсиями. I – Останкино; II – ИФА (центр Москвы); III – Звенигород

Для более детального анализа характера различий стратификации в трех пунктах были построены усредненные суточные ходы повторяемостей. Как видно из рис. 5, различия в режиме приземных инверсий создаются как более поздним (на 1–2 ч) их установлением вечером, так и за счет меньшей в целом устойчивости инверсионной стратификации в городе в

продолжение всей ночи (рис. 5, а). Конвекция же, напротив, стабильна в середине дня во всех трех пунктах. Здесь влияние городской циркуляции, связанной с <островом тепла>, проявляется главным образом в переходное время суток, вследствие чего общая продолжительность конвективных условий в центре оказывается несколько больше (рис. 5, в). Утром в центре приблизительно на 1 ч быстрее, чем за городом, происходит отрыв от поверхности приземного инверсионного слоя и развитие под ним неустойчивой стратификации (рис. 5, з). Основным же вклад в различия частоты наблюдения конвекции вносится вечером, когда в ИФА затухание конвективных восходящих потоков регистрировалось в среднем на 2 ч позже, чем в Звенигороде. Приподнятые инверсии при нейтральной или устойчивой стратификации в нижнем слое встречаются в основном в переходное время суток (рис. 5, б), когда влияние <острова тепла> наибольшее, поэтому именно эти типы редко наблюдаются одновременно в разных пунктах.

## 6. Заключение

Проведенный комплексный эксперимент подтвердил достоверность содарных оценок типа термической стратификации АПС, а также показал перспективность использования содаров как для статистических исследований структуры АПС над городом, так и для ее оперативной оценки.

По результатам эксперимента впервые для района Москвы получена количественная оценка горизонтальной неоднородности термической структуры приземного слоя. В среднем в 85–90% полного времени суток характер стратификации здесь одинаков на расстояниях порядка 10–100 км с точностью до знака  $\gamma$ . Что касается сопоставления отдельных типов стратификации, то приземные инверсии и конвективные условия отмечаются одновременно в 70–80% случаев в разных пунктах.

Выявлены особенности влияния крупного города на структуру АПС в летнее время, проявляющиеся в уменьшении повторяемости приземных инверсий и увеличении повторяемости конвективных условий по направлению от периферии города к его центру. Основные различия в термическом режиме АПС (в том числе в появлении приподнятых инверсий) в разных районах города и пригороде наблюдаются в переходное время суток.

В результате анализа профилей температуры, измеренных с помощью системы <АСМИБ-Г> на Останкинской телебашне, а также путем сопоставлений этих профилей с данными, полученными другими методами, обнаружены систематические погрешности измерений на телебашне, которые приводят к искажениям вертикальных градиентов температуры.

Авторы глубоко признательны А.В. Симкину, Ф.Я. Клинову, Н.Л. Бызовой, А.Е. Корнееву, М.А. Петросянцу и Б.А. Семенченко за большую помощь в организации эксперимента и ценные советы, а также И.В. Петенко, Е.А. Шурыгину и А.Н. Бедулину за разработку аппаратуры и проведение наблюдений на Звенигородской научной станции.

1. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 246 с.
2. Бачурина А.А., Новикова Э.Н. Структура термического поля в нижнем 500-метровом слое атмосферы над Москвой. // Тр. ЦВГМО. М., 1975. Вып. 6.
3. Бызова Н.Л., Хачатурова Л.М. // Тр. ЦВГМО. М., 1984. Вып. 20(1). С. 3–11.
4. Машкова Г.Б. // Тр. ИЭМ. М., 1974. Вып. 6(44). С. 89–98.
5. Погосян Х.П., Бачурина А.А. Метеорологический режим города и градостроительство. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 68 с.
6. Brown E.H., Hall F.F. Advances in atmospheric acoustics. Rev. Geoph. & Space Phys. 1978. V. 16. P. 47–110.
7. Красенко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск; Наука, 1986. 168 с.
8. Каллистратова М.А., Петенко И.В. // Фундаментальные науки – народному хозяйству. М.: Наука, 1990. С. 426–430.
9. Пекур М.С. Предварительные результаты содарных исследований АПС над Москвой. М., 1990. С. 62–71. (Препринт / ИФА АН СССР N 7. Ч. 1).
10. Kallistratova M.A. / Proc. 6th Int'l Symp. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of Atmosphere and Ocean, Athens, Greece (1992). P. 89–103.
11. Локощенко М.А., Пекур М.С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 3. С. 313–316.
12. Каллистратова М.А., Пекур М.С., Петенко И.В., Тиме Н.С. Методика дистанционного измерения параметров слоя перемешивания доплеровским акустическим локатором (содаром). М., 1991. С. 77–94. (Препринт / ИФА АН СССР. N 1).
13. Rebour M.S., Kallistratova M.A. / Appl. Phys. B56. 1993 (in print).

14. Локощенко М. А., Исаев А. А., Каллистратова М. А., Пекур М. С. // *Метеорология и гидрология*. 1993. N 9. С. 20–34.
15. Kallistratova M. A., Lemann H.-R., Neiser J., Petenko I. V., Zorn A. // *Z. Meteorol.* 1986. V. 36. N 4. P. 229–237.
16. Клинов Ф. Я., Новикова Э. Н., Куликова С. Н., Бондина А. Г. // *Тр. ЦВГМО*. М., 1975. Вып. 3. С. 3–16.
17. Пьянов В. В., Новиков А. М. // *Тр. ЦВГМО*. М., 1971. Вып. 1. С. 18–26.
18. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте / Под ред. Н. Л. Бызовой. М.: Гидрометеоздат, 1982. 68 с.
19. Пекур М. С. Определение параметров высоты слоя перемешивания по факсимильным записям эхосигнала содара (обзор). М., 1990. С. 15–29. (Препринт / ИФА АН СССР N 7. Ч. 1).
20. Жуков В. П., Прилепов И. Н., Пузаев В. Н. // *Тр. ЦВГМО*. М., 1984. Вып. 20 (1). С. 124–132.
21. Фарапонова Г. П. // *Тр. МосЦГМС*. М., 1989. Вып. 3. С. 190–196.
22. Singar S.P., Aggarwal S. K. et al. // *Atmosph. Environm.* 1985. V. 19. N 2. P. 221–228.

Московский госуниверситет  
им. М. В. Ломоносова  
Институт физики атмосферы  
РАН, Москва

Поступила в редакцию  
30 сентября 1993 г.

A. A. Isaev, M. A. Kallistratova, M. A. Lokoshchenko, M. S. Pekour. **Thermal Structure of Atmospheric Boundary Layer above Moscow.**

The results are presented of a complex experiment on investigation of thermal structure of the air lower layer above Moscow obtained by direct and remote techniques. The temperature profiles were measured by means of detectors located on Ostankino TV tower and on low-level radiosondes in Dolgoprudny. Remote observations were performed by means of three sodars placed in Moscow and Zvenigorod. Stratification types were determined by facsimile chart records of the sodars echo. A comparison of different techniques data and an estimation of spatial inhomogeneity of temperature stratification of the ground air layer above Moscow were performed. Repetitions of the temperature stratification types during summer time were studied. A comparison of results obtained simultaneously in three points by the echo technique had shown regularities of the city influence on the thermal structure of the atmosphere ground layer.