

## **Синхронизация короткопериодных колебаний стратификации температуры и загрязнения приземного воздуха по данным дистанционных измерений**

Н.Е. Брусова, И.Н. Кузнецова, И.Ю. Шалыгина

ФГБУ «Гидрометцентр России», 123242 Москва, Б. Предтеченский П., д.11-13,  
e-mail: nbrusova@metcom.ru, tuza@metcom.ru.

*По результатам сравнений температурных профилей, полученных по измерениям МТР-5 в пространственно разнесенных пунктах Московского региона, иллюстрируется высокая чувствительность атмосферного пограничного слоя к воздействию мезомасштабных атмосферных процессов и локальных факторов (смена воздушных масс, прохождение фронта с осадками, адвекция, радиационная и приподнятая инверсия и пр.). В эпизодах загрязнения воздуха показана тесная связь изменений структуры термического поля с динамикой уровня загрязнения, синхронизация процессов образования/разрушения температурной инверсии с накоплением/рассеиванием загрязнений воздуха.*

*Based on the comparison of temperature profiles data which were obtained from MTP-5 measurements in the points dispersed within the Moscow region, the study illustrates the high sensitivity of the atmospheric boundary layer to the mesoscale atmospheric processes and local factors effects (air masses changing, front with precipitation passing, advection, radiation and elevated inversion, etc.). It demonstrates the strong connection between changes in the thermal field's structure and the pollution level, synchronization of the temperature inversions formation / destruction with air pollutant accumulations / dispersions processes in the air pollution episodes.*

Появление на стыке столетий отечественных приборов дистанционного зондирования нижней атмосферы МТР-5 [1-4] обеспечило своего рода «прорыв» в исследованиях пространственной и временной неоднородности температурного поля нижних слоев атмосферы, расширив классические представления о процессах в атмосферном пограничном слое [5-8], способствуя значительному продвижению в изучении локальных атмосферных характеристик в московском регионе [9-12] и специфических особенностей в уникальных физико-географических условиях [13-15].

### **Некоторые особенности прибора МТР-5**

МТР-5 - одноканальный сканирующий прибор дистанционного зондирования для измерения профилей температуры в атмосферном пограничном слое (АПС); используется угловой способ измерений, когда лучи антенны микроволнового одноканального радиометра с фиксированной частотой вблизи максимума поглощения молекулярного кислорода (длина волны 5 мм) сканируют от горизонта до зенита, и по характеристикам измеренного излучения (зависимости радиоярких температур от угла наблюдения) восстанавливается профиль температуры [1,2].

В отличие от традиционных методов – радиозондов и высотных метеорологических мачт - МТР-5 осуществляют измерения с небольшим интервалом (5-10 минут), что для измерений температуры означает практически непрерывность измерения [1,16]. При этом проведение измерений возможно при любых метеорологических условиях, кроме жидких ливневых осадков интенсивностью более 8 мм/час, а точность его измерений не зависит от изменений концентрации водяного пара, и почти не зависит от облачности. Прибор работает полностью в автоматическом режиме, легко трансформируется в мобильный вариант [2].

Некоторые особенности прибора МТР-5 связаны с ограничением максимальной высоты зондирования (в последних модификациях МТР-5 это 1000 м) и

необходимостью выполнения условий горизонтальной однородности атмосферы хотя бы в пределах 500 м от места установки прибора [1,2].

Сравнение с традиционными контактными измерениями на мачтах и с помощью радиозондов показывает, что СВЧ-профилемеры во многих ситуациях правильно восстанавливают вертикальные профили температуры, а разница между измерениями составляет около 1°C, причем часть этой разницы обусловлена ошибками традиционных измерений, которые принимаются за «эталонные». По определению, вертикальное «разрешение» профилера МТР-5 с ростом высоты падает, МПТ-5 не может восстанавливать «высокие» инверсии, но хорошо отражает приземные и приподнятые инверсии, хотя уровень ошибок восстановления градиентов при устойчивой стратификации остается заметным [11].

### **Мониторинг температурных профилей приборами МТР-5 в московском регионе**

На территории Москвы и в ближнем Подмосковье измерения МТР-5 проводятся в нескольких (от 3 до 6) пространственно разнесенных пунктах: наиболее продолжительные и полные ряды наблюдений получены по измерениям МТР-5 в ближнем северном пригороде (г. Долгопрудный), в центре Москвы (Красная Пресня) и на Воробьевых горах (физфак МГУ).

В работе [11] отмечается, что из-за меньших погрешностей расчета вертикального градиента температуры для исследований пространственной неоднородности, и, особенно, влияния большого города на термическую структуру АПС, оправдано использовать для анализа не разности одноуровневых измерений, а различия градиентов температуры. По результатам измерений МТР-5 в предшествующие годы установлено, что в мегаполисе наблюдается высокая неоднородность термической устойчивости, что в центральной части Москвы преобладает термическая неустойчивость [10,17].

Представленные для обсуждения материалы преимущественно основаны на данных рассчитанных по измерениям МТР-5 градиентов температуры. В контексте решаемой задачи проведен анализ взаимосвязи термических преобразований в АПС с динамикой загрязнения приземного воздуха. В качестве маркера загрязнения воздуха использованы данные измерений концентрации угарного газа (СО); наблюдения СО проводятся в Москве на более чем 30 автоматизированных станциях контроля загрязнения атмосферы (ниже АСКЗА) на сети ГПБУ « Мосэкомониторинг» (<http://www.mosecom.ru/>). Выбор в качестве индикатора загрязнения приземного воздуха СО определяют его свойства: СО химически малоактивен, его время жизни в атмосфере – до нескольких суток, т.е. СО является относительно инерционной малой газовой составляющей атмосферы (МГСА).

### **Синхронизация внутрисуточной динамики температурной стратификации и загрязнения приземного воздуха**

Воздействие метеорологических условий на колебание уровня загрязнения в общих чертах хорошо известно, но из-за различий эмиссий загрязнений и физико-географических особенностей в каждом регионе обнаруживаются специфические зависимости загрязнения воздуха. Так, установлено, что в Москве наиболее высокому загрязнению городского воздуха способствуют неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) такие как температурная инверсия и отсутствие ветра. Диапазон НМУ включает синхронизированный с термической устойчивостью слабый перенос в нижних слоях атмосферы: в слое 0-300 м – до 4 м с<sup>-1</sup>, в слое до 500 м – не более 6 м с<sup>-1</sup> [18-20]. В небольших населенных пунктах в окрестностях мегаполиса

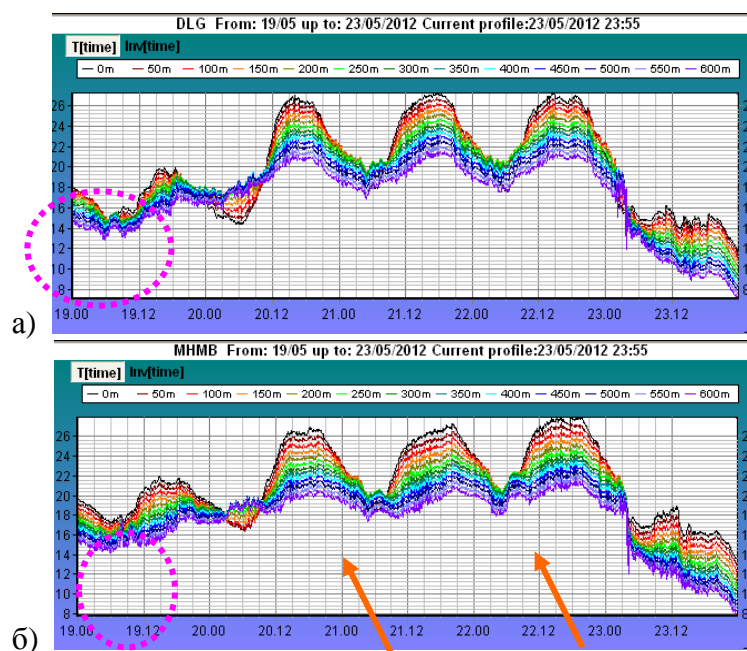
неблагоприятным фактором является направление переноса, точнее «опасный сектор» переноса воздушных масс. В ряде работ отмечалось [19,21], что многократно зафиксированные случаи резкого увеличения загрязнения воздуха в окрестностях Москвы отмечались там при распространении шлейфа загрязнений мегаполиса.

Наше исследование направлено на анализ и иллюстрацию зависимости колебаний уровня загрязнения от термического состояния нижних слоев атмосферы, т.е. термическом перемешивании, судить о котором вертикальные градиенты температуры, рассчитанные по данным измерений приборами МТР-5. Поскольку влияние термического перемешивания на колебания уровня загрязнения приземного воздуха наиболее ярко проявляется в условиях ослабленного динамического перемешивания [16, 17, 21], ниже рассмотрим синхронизацию интенсивности перемешивания с процессами роста/уменьшения концентрации примеси в трех эпизодах загрязнения. Здесь и ниже термин «эпизод загрязнения» (аналогично используемому в англоязычной литературе «pollution episode») применяется для идентификации ситуации с не менее чем 2-3 кратным превышением фонового уровня загрязнения.

Кратко заметим, что по результатам анализа СО на станциях Москвы в период 2012-2015 гг. установлено, что эпизоды загрязнения угарным газом формируются в основном в теплый сезон, чаще всего с мая по август; исключительно редко они наблюдаются в марте, октябре - ноябре. Такая временная «привязка» обусловлена особенностью крупномасштабной циркуляции над центром ЕТР, обеспечивающей в холодный сезон интенсивное рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере.

#### Эпизод 1. 20 – 23 мая 2012 г.

Атмосферные процессы определял антициклон с центром над Уралом, по его западной периферии на ЕТР 20.05 начал поступать очень теплый и сухой воздух. Аномально жаркая (для мая) погода с дневным повышением температуры до +26,28 °С продержалась 3 суток, ночью 23 мая прошел холодный атмосферный фронт, жара сменилась похолоданием.

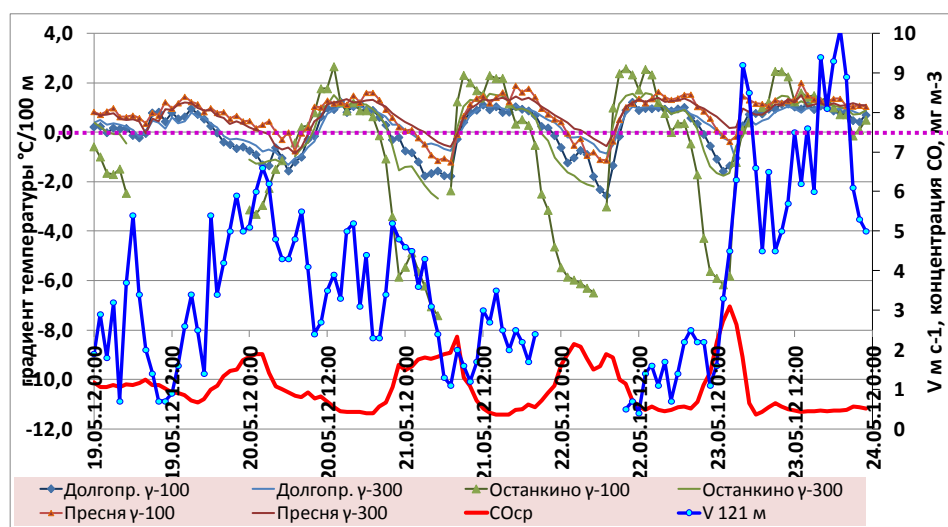


**Рис. 1.** Временной ход температуры в слое до 600 м по измерениям МТР-5: а)- северный пригород, ЦАО, б) - центр Москвы, Пресня. 19-23.05.2012 г.(штриховой контур-инверсия температуры, стрелки – «утренний нагрев загрязненного слоя»)

Временные изменения температуры в слое 0-600 м по измерениям МТР-5 в центре Москвы (район Красной Пресни) и в ближнем северном пригороде (Долгопрудный), показанные на рис. 1, имеют высокую степень согласованности, не вызывает сомнений значительная синхронизация температурных изменений в пунктах, расположенных на расстоянии около 20 км.

Вместе с тем, имеются и существенные различия в эволюции температуры в АПС в пространственно разнесенных пунктах. Видно, что инверсионный слой за городом мощнее и существует большее время по сравнению с инверсионным слоем в центре мегаполиса, что, судя по толщине слоя ( $T_{0m} - T_{600m}$ ), в городе интенсивность термического перемешивания больше, чем в пригородах (рис.1). Можно также заметить, что по измерениям в центре мегаполиса зафиксированы характерные для города эффекты «утреннего нагрева», связанные с нагревом загрязненного воздуха в ранние утренние часы при низком солнце [10], которые указывают на дополнительные источники влияния города на радиационные процессы в АПС.

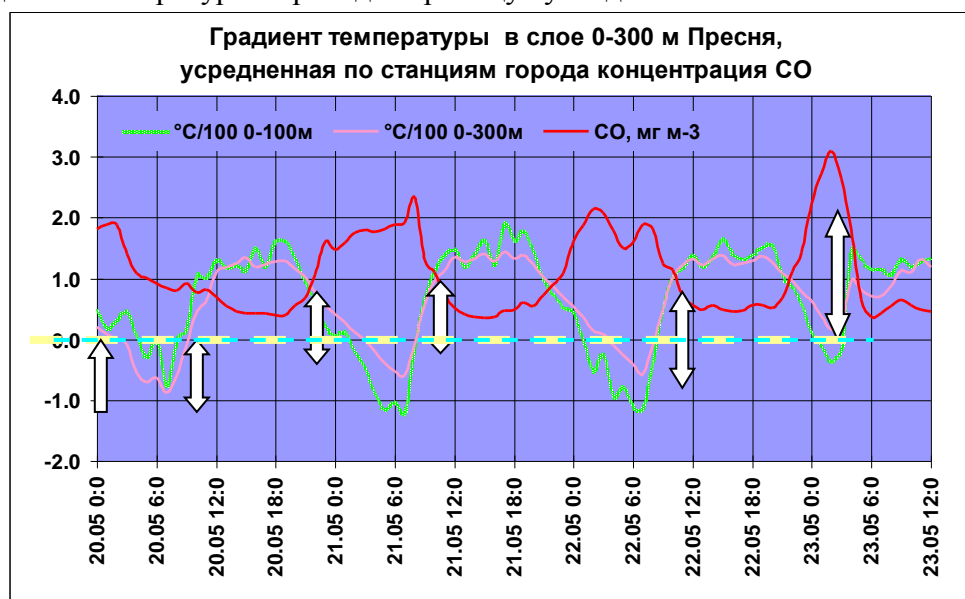
На рис.2 показан временной ход градиентов температуры в двух пунктах по измерениям МТР-5, скорости переноса на высоте около 120 м синхронизированные с изменениями уровня CO. Самым ярким отражением связи загрязнения с термической стратификацией является отчетливо просматриваемая синхронность пиковых величин CO и максимальной величины инверсионного слоя, если судить о нем по градиенту температуры ( $\gamma < 0$ ) при слабой скорости переноса (ночь 21 и 22 мая). Также убедительно синхронизированы послеполуденные минимумы CO и максимальная интенсивность термического перемешивания ( $\gamma \geq 0.98$  °C/100м).



**Рис.2. Вертикальный градиент температуры в пунктах Долгопрудный, Пресня и Останкино; скорость ветра на высоте 120 м (ВММ Обнинск), усредненная по АСКЗА концентрация CO в Москве. 19-23 мая 2012 г.**

Данные МТР-5 позволяют с высокой точностью установить временные интервалы перестройки термического состояния АПС и связанной с ней динамики уровня загрязнения – сохранение уровня (на низком или повышенном фоне), его повышение (при метеоусловиях накопления) или понижение (благодаря рассеиванию). Тесную зависимость CO и  $\gamma$  (показатель термического перемешивания) иллюстрирует рис.3, где показаны градиенты температуры по измерениям только в центре Москвы и усредненная по АСКЗА концентрация CO. Здесь хорошо видно, что снижение концентрации углекислого газа происходит, когда градиент температуры становится больше сухадиабатического ( $0.98$  °C/100 м) и все вертикальные движения

ускоряются. И наоборот с переходом градиента ниже отметки  $0.98^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$  атмосфера становится устойчивой и, в отсутствии сильного ветра, содержание примесей в воздухе начинает резко возрастать. Приведенные в таблице 1 данные наглядно демонстрируют, как меняется содержание углекислого газа в приземном атмосферном слое в часы, когда градиент температуры переходит границу сухоадиабатического.



**Рис. 3. Временной ход усредненной концентрации СО и градиентов температуры в нижнем 100 и 300-метровом слое в центре Москвы в эпизоде НМУ (20-23.05.2012).**

Безусловно, уровень загрязнения зависит не только от температурной стратификации, включая, инверсию. Значительную роль играет динамическое перемешивание, скорость перемещения воздуха. Покажем это, используя приведенные в таблице 1 данные и описанные выше рисунки.

В однородной воздушной массе, находившейся в регионе 20-22 мая, изменения концентрации СО имели хорошо выраженный суточный ход. В грубом приближении СО находится в противофазе с температурой воздуха: дневной прогрев и достижение суточного максимума Т обеспечивают интенсивное перемешивание и рассеивание примеси в АПС и, как следствие, низкий уровень приземного загрязнения (суточный минимум). Суточный минимум Т близок к утреннему максимуму СО. В частности, благодаря стационарности погодных условий, вечером наблюдался устойчивый периодический рост уровня загрязнения с достижением в 22-23 ч двукратного уровня послеполуденных концентраций. При этом температурная инверсия в нижнем 100 метровом слое появлялась только в пригороде, в центре Москвы градиент температуры превышал величину влажноадиабатического градиента. Важно отметить, что ветер в эти часы все три дня был слабым (таблица 1).

Как видно в таблице 1, утреннее понижение СО происходит в течение с 1- 2 часов - в период перехода от отрицательных градиентов к адиабатическим. Так 21 и 22 мая в 8 ч во всем нижнем 300-метровом слое (и выше) над регионом еще удерживалась инверсия, концентрация СО достигала утреннего максимума. В последующие 2 часа, благодаря прогреву земной поверхности, инверсия температуры разрушалась. В 10-11 ч происходил «прорыв» пограничного слоя [5,7,10], при слабом ветре (до  $1\text{ м с}^{-1}$ ) вследствие конвективного перемешивания и притока воздуха из вышележащих слоев уровень приземного загрязнения резко понижался. При смене воздушных масс 23 мая рост СО под воздействием НМУ (инверсии и слабого ветра) был прерван в 2 ч ночи прохождением холодного атмосферного фронта, после чего начался заток более

холодного, чем в эпизоде воздуха. В таблице 1 также видны значимые различия градиентов температуры в утренние часы (6-8 ч) при НМУ (20-22 мая) и в условиях интенсивного рассеивания примеси в чистой воздушной массе (23 мая). Следует понимать, что эти существенные различия обусловлены не только метеорологическими факторами, но и влияющим на радиационные процессы возросшим при НМУ загрязнением атмосферы [16, 17, 21].

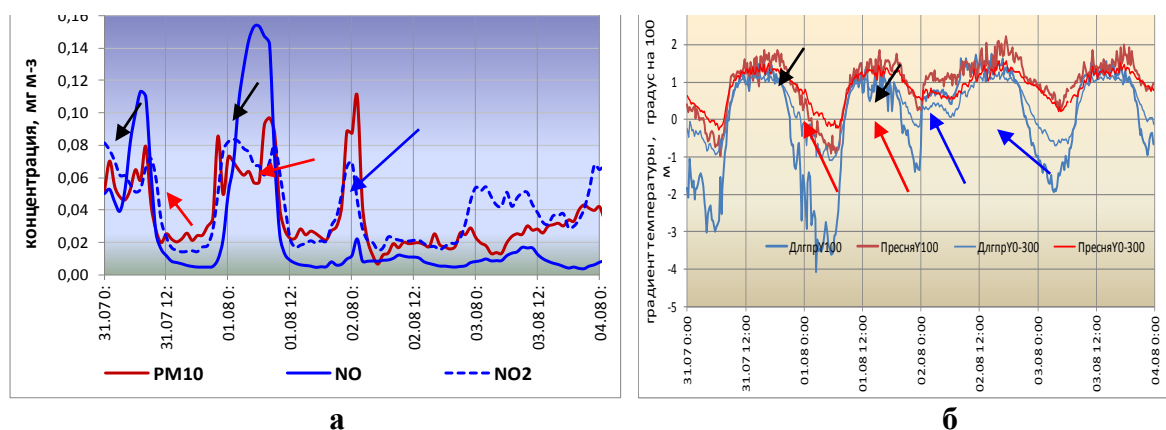
Таблица 1. Динамика уровня загрязнения и градиентов температуры ( $\gamma$ , °C/100 м) в периоды внутрисуточной перестройки интенсивности рассеивания

		Центр города (Кр.Пресня)		Пригород (Долгопрудный)		V-301 мм с <sup>-1</sup>	СО мг м <sup>-3</sup>	тенденции СО, явления
дата	час	$\gamma$ 0- 100	$\gamma$ 0 - 300	$\gamma$ 0- 100	$\gamma$ 0- 300			
20.05 (вечер)	19	1,6	1,3	0,9	0,9	2,7	0,4	минимум
	20	1,3	1,2	0,6	0,8	2,8	0,6	Рост СО
	21	0,9	1,0	0,3	0,6	3,5	0,7	
	22	0,6	0,8	-0,3	0,3	5,5	1,1	
	23	0,2	0,6	-0,2	0,3	5,6	1,6	
21.05 (утро)	6	-1,1	-0,5	-1,8	-0,7	0,2	1,9	накопление
	7	-1,2	-0,6	-1,8	-0,7	0,5	1,9	Макс СО
	8	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	1,6	2,3	
	9	0,7	0,6	0,4	0,2	2,5	1,3	Снижение СО
	10	1,1	1,0	0,8	0,7	3,0	1,1	
	11	1,4	1,1	0,9	0,9	1,9	0,7	
21.05 (вечер)	19	1,8	1,4	0,9	0,9	2,6	0,6	Рост СО
	20	1,4	1,2	0,7	0,8	нет данных	0,5	
	21	1,0	1,0	0,2	0,7		0,7	
	22	0,7	0,9	0,2	0,5		0,9	
	23	0,5	0,7	-0,1	0,4		1,1	
6	-1,1	-0,4	-2,3	-0,8	1,6			
22.05 (утро)	7	-1,1	-0,6	-2,6	-0,9	1,9	Макс СО	
	8	-0,4	-0,1	-1,3	-0,5	1,8	Снижение СО	
	9	0,5	0,5	-0,2	0,1	1,2		
	10	1,0	1,0	0,9	0,8	0,1		1,1
	11	1,2	1,2	1,2	1,0	0,1	0,7	
	22.05 (вечер)	19	1,5	1,4	1,0	1,0	2,1	0,6
20		1,5	1,3	0,6	0,7	2,5	0,5	
21		1,0	1,1	0,3	0,6	2,1	0,7	
22		0,9	1,0	-0,1	0,4	2,0	1,1	
23		0,6	0,8	-0,6	0,3	1,1	1,4	
23.05 (ночь)	2	-0,4	0,2	-1,4	-0,3	3,8	<b>3,1</b>	Макс СО, перед ХФ
	3	-0,2	0,2	-1,0	-1,2	5,4	2,6	Зона ХФ
	4	1,5	1,0	0,3	0,2	8,6	1,8	
	5	1,3	0,8	0,7	0,6	13,8	0,7	
23.05 (утро)	6	1,2	0,7	0,8	0,3	8,7	0,4	Тыл ХФ
	7	1,2	0,7	0,8	0,5	12,0	0,4	Адвекция

								XВ
	8	1,1	0,9	0,9	0,6	9,3	0,6	
	10	1,3	1,1	0,9	0,8	7,0	0,6	Новая ВМ
	11	1,2	1,1	1,2	0,9	5,6	0,6	

### Эпизод 2. 31 июля – 2 августа 2012 г.

В этом эпизоде НМУ в качестве показателей загрязнения воздуха использованы концентрации оксидов азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) и взвешенных частиц размером менее 10 мкм ( $\text{PM}_{10}$ ); временная динамика усредненных по городским АСКЗА концентраций и вертикальных градиентов температуры по измерениям МТР-5 показана на рис.4. Как и в вышеописанном эпизоде, повышение уровня загрязнения в вечерние часы 31 июля и 1 августа совпадало с уменьшением вертикального градиента температуры, а максимальные уровни загрязнения формировались при образовании инверсии температуры (отрицательные градиенты) не только в пригороде, но и в центре мегаполиса (показано черными стрелками).



**Рис. 4. Временные изменения  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  (а), градиентов температуры в слое 0-100 и 0-300 м в центре города и в ближнем пригороде (б).**

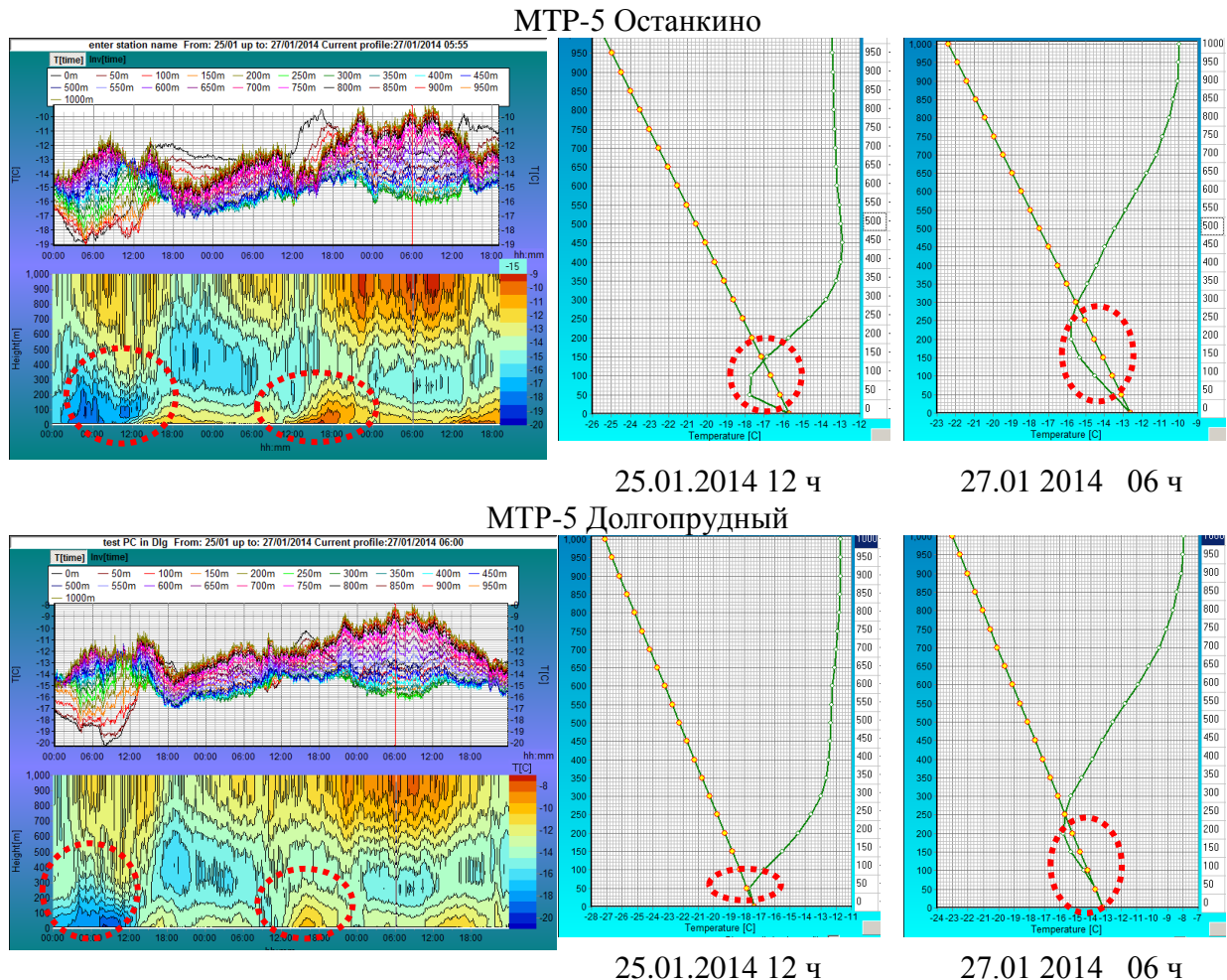
На рис.4 видно, что и в этом эпизоде при неблагоприятных для очищения воздуха метеорологических условиях (НМУ ночью, в утренние часы) процессы перехода от термической устойчивости к неустойчивости (т.е. разрушение инверсии и появление слоя конвективного перемешивания) синхронизированы с резким понижением уровня загрязнения (на рис. 4 показано красными стрелками).

Следует отметить, что оба рассмотренных эпизода позволили проиллюстрировать физические закономерности, связанные с перемещением атмосферного фронта и динамикой уровня загрязнения, важные для практического прогнозирования загрязнения городского воздуха. А именно:

- температурная инверсия в сочетании со слабым ветром, определяя НМУ, могут сохраняться практически до прохождения фронта,
- примерно за 1 час до прохождения зоны фронта наблюдается резкий подъем уровня  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{CO}$ , «фоновый» уровень загрязняющих веществ наблюдается уже в зоне фронта,
- в зоне быстро движущегося фронта в течение 1-2 часов в нижнем 600-метровом слое наблюдается изотермия, как следствие интенсивного перемешивания и размывания градиентов температуры.

### Эпизод 3. Январь 2014 г.

В московском регионе в последние годы в холодный сезон не было зафиксировано продолжительных (более 1 суток) эпизодов загрязнения. Исключение составил эпизод в 20-числах ноября 2014 г., но из-за пропусков однотипных наблюдений во всех разнесенных пунктах измерений МТР-5, здесь названный эпизод не будет рассматриваться. Надо пояснить, что наблюдается процесс замены приборов МТР-5 на профилемеры с измерениями в слое до 1000 м. Именно такие измерения использованы для анализа синхронизации термических (радиационных) процессов в городском АПС и в пригороде в зимний период. На рис. 5 показана трехсуточная временная серия измерений температуры в двух разнесенных пунктах приборами МТР-5.



**Рис.5. Изменения температуры в слое до высоты 1000 м (слева), синхронизированные профили температуры (окна справа) в жилом районе мегаполиса (Останкино) и в пригороде (Долгопрудный). 25-27 января 2014 г.**

На рис.5 видно, что при общей схожести в отображении термических преобразований в нижнем 1 км слое атмосферы под воздействием крупномасштабных атмосферных процессов, на небольших временных интервалах имеются достаточно существенные отличия (показаны штриховыми контурами). В частности, заметны различия в интенсивности и продолжительности существования приземной инверсии (первая половина 25 января), в характеристиках приподнятой инверсии (в ночь на 26 и в ночь на 27 января) и в толщине подинверсионного слоя перемешивания.

Очевидно, что в холодный сезон в отсутствии существенного загрязнения воздуха, имеющиеся различия в температуре нижних слоев могут быть обусловлены только



потерями и прямыми выбросами тепла в мегаполисе. Сравнение одновременных измерений профилей температуры это убедительно иллюстрируют (рис. 5): в городе интенсивность перемешивания в подинверсионном слое больше (энергия неустойчивости, левее адиабаты), как и его толщина, которая выше фоновой на несколько сот метров (100 - 200 м).

### **Заключение**

Приведенные ограниченные иллюстрации демонстрируют уникальную возможность эффективного и успешного применения данных измерений МТР-5 для исследования физических процессов в самом изменчивом - пограничном слое атмосферы. Данные МТР-5 отражают временную и пространственную изменчивость температуры под воздействием локальных, мезо и макромасштабных процессов, а также эффекты влияния городской среды на атмосферные процессы в АПС (сезонно различающиеся). Установление закономерностей и связей структурных преобразований атмосферного пограничного слоя с динамикой загрязнения приземного воздуха служит основой для повышения точности прогноза суточного хода уровня загрязнения, что особенно важно в периоды наступления неблагоприятных для рассеивания примеси и очищения воздуха метеорологических условий.

### **Литература**

1. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя - метод, аппаратура, результаты измерений.// Оптика атмосферы и океана, 2009, т.22, № 7, с.697-704.
2. Кадыгров Е.Н., А.Г. Горелик, Е.А. Миллер, В.В. Некрасов, А.В. Троицкий, Т.А. Точилкина, А.Н. Шапошников. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосферы и океана, 2013, т.26, № 6, с.459-465.
3. Караваев Д.М., Г.Г. Шукин. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана, 2015, т. 28, №12, с.1122-1127.
4. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review.//WMO,2006, IOM Report N 89, WMO/TD N 1309, Geneva, Switzerland, P. 1-34.
5. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Ленинград, Гидрометеиздат, 1982, с. 360.
6. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Ленинград. Гидрометеиздат, 1979, с. 270.
7. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы.// 1989, Ленинград, Гидрометеиздат, с.264.
8. Исаев А.А., Каллистратова М.А., Локощенко М.А., Пекур М.С. Термическая структура атмосферного пограничного слоя над Москвой. Оптика атмосферы и океана.- 1994.-Том 7; № 05- С.650-664.
9. Вязанкин А.С., Вязанкин С.А, Жадин Е.А., Кадыгров Е.Н. Анализ вертикального распределения температуры в пограничном слое атмосферы в пригороде и мегаполисе.// Метеорология и гидрология, 2003, № 7, стр. 5-12.
10. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТР-5// Оптика атмосферы и океана, 2012, т.25, № 10, С. 877-883.
11. Юшков В. П. Оценка пространственных неоднородностей температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений. Оптика атмосферы и океана, 2015, 28, №11, С 1012-1022.

12. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Куницын В.Е., Захаров В.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Ситанский С.И. Московский остров тепла в блокирующем антициклоне летом 2010 г. Доклады Академии Наук, 2014, т.456, №5, С.591-595.
13. Кузнецова И.Н., Еланский Н.Ф., Шалыгина И.Ю., Кадыгров Е.Н., Лыков А.Д. Инверсии температуры и их влияние на концентрацию приземного озона в окрестностях Кисловодска.// Метеорология и гидрология, 2002, № 9, стр. 40-51.
14. Воробьева Е.А., Шапошников А.Н., Фоломеев В.В., Кадыгров Е.Н. Результаты измерений термической стратификации атмосферного пограничного слоя в каньонах и котловинах Гуамского хребта // Оптика атмосферы и океана, 2010, т.23, № 6, СС.505-509.
15. Кадыгров Е.Н., А.В. Колдаев, Е.А. Миллер, В.В. Соколов, М.Н.Хайкин. Исследование неоднородности острова тепла в г. Нижний Новгород с помощью мобильного дистанционного измерителя профилей температуры атмосферы.// Метеорология и гидрология, 2007, № 2, с. 54-66.
16. Е. Н. Кадыгров, И.Н. Кузнецова «Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика» /изд. Физматкнига, Долгопрудный, 2015. 171с
17. Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н. Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях.// Изв. РАН, ФАО, 2004, т. 40, № 5, с. 678-688.
18. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Лапченко В.А. мониторинг и прогнозирование качества воздуха в московском регионе//Биосфера. 2014. Т. 6. № 4. С. 339-351.
19. Кузнецова И.Н. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха Москвы в летних эпизодах 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 566-577.
20. И.Н. Кузнецова, И.Ю. Шалыгина, М.И. Нахаев, А.А. Глазкова, П.В. Захарова, Е.А. Лезина, А.М. Звягинцев. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы.//Труды Гидрометцентра России, вып.351, 2014 г.
21. Хайкин М.Н., Е.Н. Кадыгров, И.Н. Кузнецова. Влияние высокой концентрации аэрозоля на термическую структуру пограничного слоя атмосферы.//Изв. РАН, ФАО, 2006, том 42, № 6, С. 778-784.