

УДК 551.501.8:551.510:551.524

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУХА МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

Е.А. Лезина¹, Е.А. Миллер²

¹ГПБУ "Мосэкомониторинг", г. Москва

*²Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный
alena-lezina@ya.ru*

В статье проводится анализ динамики температурной стратификации в атмосферном пограничном слое на примере событий с увеличением уровня загрязнения воздуха Московского мегаполиса в период июль – август 2016 г. Дано краткое описание используемой системы для дистанционного зондирования температурной стратификации ГПБУ «Мосэкомониторинг».

Ключевые слова: дистанционное зондирование, температурная стратификация, загрязнение городского воздуха.

Введение

Активное развитие Московского мегаполиса, рост его транспортной системы требует оперативных средств контроля и прогноза условий, обеспечивающих экологическую безопасность. Загрязнение воздуха происходит в слое атмосферы, который распространяется на сотни метров над поверхностью Земли и имеет ярко выраженную суточную и сезонную динамику. Кроме того, на процессы атмосферного пограничного слоя (АПС) Московского мегаполиса оказывает влияние особенность собственного термического режима пространственной неоднородности городского острова тепла (ГОТ). Объективными средствами контроля метеорологических условий, сопутствующих загрязнению воздуха, являются данные наземных станций наблюдений и данные о вертикальном распределении параметров со станции аэрологического зондирования – один пункт на севере Москвы, два раза в сутки.

Для учета кратковременных и сезонных особенностей пространственной неоднородности температурной стратификации городского острова тепла Московского мегаполиса, ГПБУ «Мосэкомониторинг» с 2006 года использует средства дистанционного зондирования температурной стратификации на базе метеорологических температурных профиломеров, а с 2011 года проводятся синхронные измерения в двух

пунктах: район Останкино и Косино-Ухтомский. За последние годы был выполнен целый ряд работ, имеющих большую научно-методическую значимость – исследования взаимосвязи динамики ГОТ и данных о загрязнении воздуха [1–10, 20].

Применение опыта этих исследований позволяет распространить их на практику экологического мониторинга других мегаполисов. Более того, накопленные ряды данных измерений и результатов их обработки позволяют производить статистическую оценку изменений режима ГОТ не только как следствие климатических изменений, но и изменений, связанных с модернизацией городской застройки, транспортной системы города и режима промышленных предприятий.

Средства дистанционного зондирования температурной стратификации

Дистанционные средства зондирования атмосферы (ДСЗА) являются частью аэрологических наблюдений. Основным преимуществом дистанционных методов перед стандартным радиозондированием является возможность проведения непрерывных измерений и отсутствие необходимости в расходных материалах, которые являются одной из главных статей расходов на содержание наблюдательной сети. Развитие ДСЗА достигло того уровня, что сегодня членам ВМО следует всякий раз, когда это представляется возможным, обеспечивать получение подробной информации о профилях температуры, влажности, давления и ветра в нижнем слое атмосферы высотой до 1500 м. Эта информация необходима для изучения диффузии атмосферных загрязнений, передачи электромагнитных сигналов, связи между переменными величинами свободной атмосферы и переменными величинами пограничного слоя, сильных штормов, физики облаков, конвективной динамики и т. д. [19].

ГПБУ «Мосэкомониторинг» использует два комплекса дистанционного измерения профиля температуры. На рис. 1 представлены фото приборов и показано их взаимное расположение. В Останкино установлен прибор МТП-5 с измерением профиля температуры до высоты 600 м. В Косино-Ухтомский работает модифицированный метеорологический температурный профилемер МТР-5 (производства Российской компании «НПО «АТТЕХ»; www.attex.net). МТР-5 имеет свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.32.002.A №45688. Прибор разработан для измерения профилей температуры от уровня установки до высоты 1000 м вне зависимости от погодных условий. Принцип действия МТР-5 детально описан в [22–24]. Метод основан на измерении собственного теплового излучения молекулярного кислорода на частоте 60 ГГц (56,6 ГГц для МТР-5) с помощью сканирующего радиометра. Излучение измеряется в терминах радиояркой температуры, которая преобразуется в температуру атмосферы

из решения уравнения Фредгольма 1-го рода. Данная задача является математически некорректной, что ведет к неустойчивости решения, устраняемого методами статистической регуляризации.

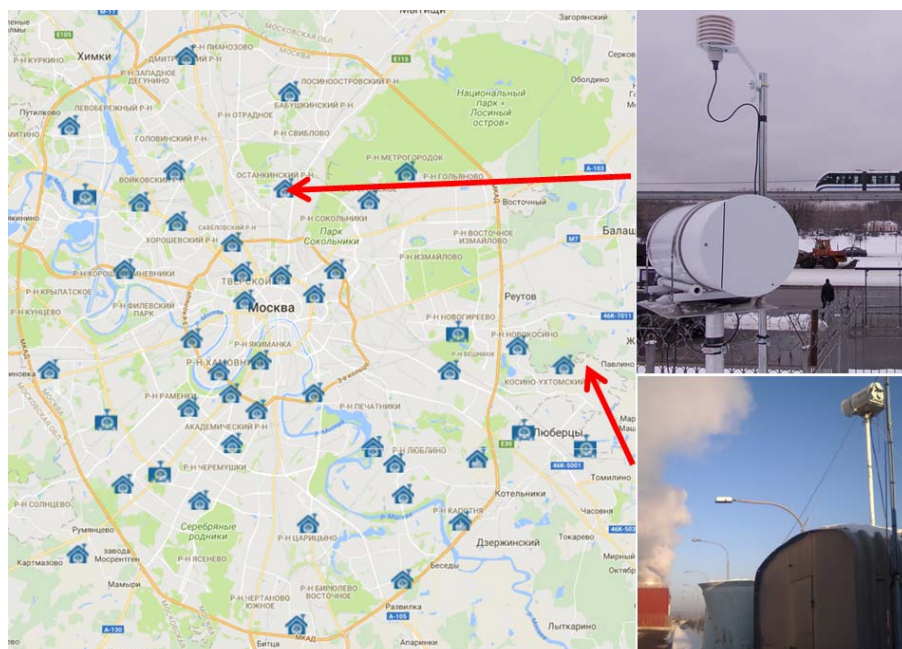


Рис. 1. Фото и взаимное расположение приборов МТП-5 и МТП-5 на карте города Москвы с индикацией станций экологического мониторинга измерительной сети ГПБУ «Мосэкомониторинг».

Прибор МТП-5 прошел серию международных сравнений с различными альтернативными измерительными системами, такими как радиозонды, RASS, метеовышки и т. п. По результатам серии сравнений и испытаний в 2011 году прибор представлен в Руководстве обеспечения качества по сбору метеорологических данных с использованием пассивных радиометров, подготовленном агентством по охране окружающей среды США [21]. Технические характеристики МТП-5 представлены в табл. 1.

Нормативная база применения МТП-5

В 2010 году на Центральной методической комиссии гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета были утверждены и рекомендованы для использования на наблюдательной сети Росгидромета «Методические рекомендации по использованию данных профиломеров», разработанные Гидрометцентром

России совместно с ЦАО. В 2015 году, в рамках темы 1.2.1.3.4 НИР ФГБУ «ЦАО», издано Справочное пособие для научных работников и инженеров-метеорологов (авторы – Е.Н. Кадыгров, ЦАО; И.Н. Кузнецова, Гидрометцентр России). Следует отметить, что статус метеорологических температурных профиломеров определен в утвержденных Росгидрометом 12.07.2016 г. Рекомендациях «Основные средства измерений гидрометеорологического назначения, применяемые на государственной наблюдательной сети» (п. 7 «Средства измерений, применяемые при аэрологических наблюдениях») [17].

Таблица 1. Технические характеристики МТР-5

Название характеристики	Значение
Диапазон высот измерения профиля температуры	0-1000 м
Представление данных в слое 0-100 метров с шагом	25 м
Представление данных в слое 100-1000 метров с шагом	50 м
Чувствительность (при постоянной времени измерений 1 сек)	не более 0,1 К
Точность измерений (СКО)	0.2 °С до 1.2 °С
Точность по высоте	25%
Рабочий диапазон температур	-50°С +40°С
Стандартный интервал измерений	5 минут
Вес	25 кг
Питание	220 В, 2 А, 50-60 Гц;
Выходное напряжение блока питания	13,8 В +2 В I _{вых} ≤ 6А
Связь с персональным компьютером	RS232
Калибровка	автоматическая
Диагностика	автоматическая

Метеорологические температурные профиломеры, установленные в 22 наблюдательных пунктах на территории Российской Федерации (всего 100 в 18 странах мира), прошли апробацию на сети Росгидромета и подтвердили свои качество и надежность. В документах [11–16], связанных с вопросами прогнозирования уровня загрязнения воздуха, в которых определены методы и способы прогноза, рекомендации по организации работ, а также принципы разработки мероприятий по регулированию выбросов, описано применение данных о температурной стратификации. К сожалению, большая часть этих документов разрабатывалась еще до широкого распространения ДСЗА и требуется их адаптация к практическому применению в новых условиях.

Примеры динамики температурной стратификации летом 2016 года

Один из последних актуальных эпизодов загрязнения атмосферного воздуха при аномальном атмосферном переносе был отмечен в июле 2016 года. В июле 2016 г., в отсутствие на ЕТР массовых пожаров, в атмосфере над Московским регионом отмечалась дымная мгла. В Москве мгла отмечалась в дневные часы 24, 25 и 27 июля с уменьшением горизонтальной дальности видимости до 4 км (<http://eco.mos.ru>). Причиной дымной мглы в атмосфере над ЕТР в июле 2016 г. стал дальний перенос дымового аэрозоля от пожаров в Сибири на запад [18]. Одновременно в эти дни в Москве общему повышению загрязнения способствовало ослабление условий рассеивания, в том числе и температурные инверсии, а в ночь с 26 на 27 июля ФГБУ «Центральное УГМС» было объявлено НМУ 1-й степени опасности.

В сложившихся условиях анализ термической стратификации АПС по данным температурных профиломеров представляется особенно важным для выявления особенностей формирования загрязнения, оценки вклада дальнего переноса взвешенных частиц в наблюдаемые уровни. Для примера на рис. 2 представлено сравнение суточного хода концентраций PM_{10} и $PM_{2,5}$ в период дымной мглы со средним суточным ходом взвешенных частиц в летний период 2016 года.

С начала затора задымленного воздуха (24 июля) произошло резкое повышение уровня загрязнения взвешенными частицами. В целом вид суточного хода концентраций PM_{10} в период дымной мглы повторяет внутрисуточную изменчивость для теплого периода с максимумом в ночные и утренние часы и минимумом днем. Однако если в течение летнего периода внутрисуточная динамика PM_{10} показывает слабую изменчивость (рис. 2), то в периоды задымления амплитуда суточного хода возросла более чем в 2 раза. Под влиянием температурной инверсии наблюдался ярко выраженный ночной пик загрязнения; наиболее ярко проявился в ночь с 26 на 27 июля при НМУ. Днем с разрушением инверсии и усилением конвективного перемешивания концентрации PM_{10} снижались, но были больше обычно наблюдаемых значений в связи с затором задымленного воздуха. Таким образом, вид и амплитуда суточного хода концентраций PM_{10} показывают, что термическая стратификация оказала существенное влияние на формирование загрязнения PM_{10} в период дымной мглы. Для концентраций $PM_{2,5}$ от суток к суткам внутрисуточная динамика изменялась незначительно, и в ночные часы 27 июля при НМУ резкого роста $PM_{2,5}$, как PM_{10} , не произошло. Следовательно, концентрация $PM_{2,5}$ в меньшей степени подвержена влиянию изменчивости термической стратификации даже в период интенсивных НМУ, в большей степени содержание $PM_{2,5}$ определялось дальним переносом (рис. 3).

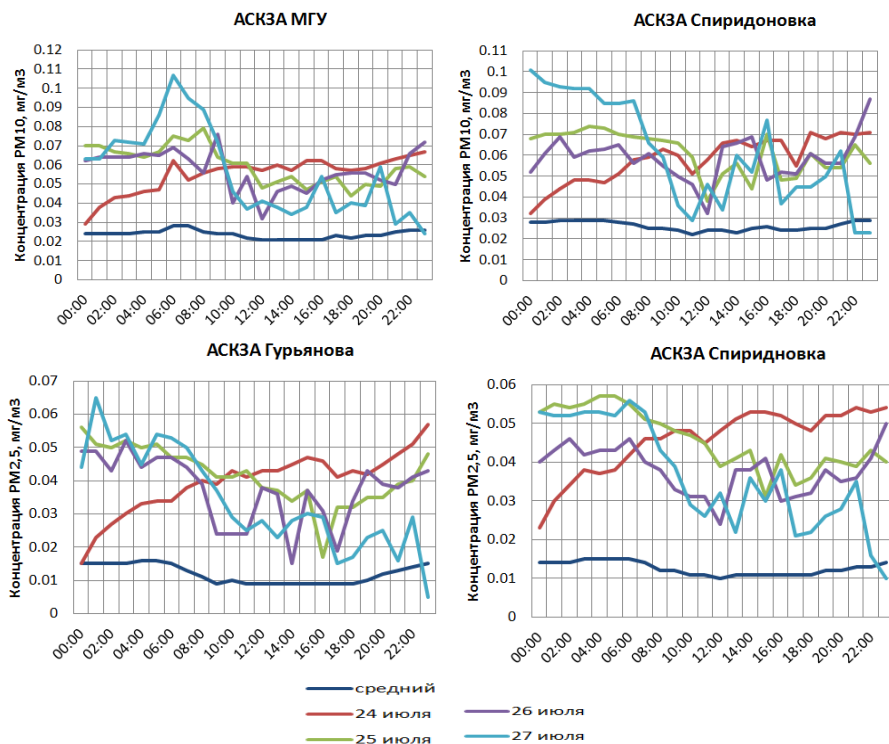


Рис. 2. Сравнение суточного хода концентраций PM10 и PM2,5 со средним суточным ходом взвешенных частиц в период дымной мглы 2016 г.

Ниже представлено два примера эпизодов загрязнения, когда на окраине города наблюдался рост концентраций, в то время как в центральной части города загрязнение изменялось слабо (рис. 4а, рис. 5а). В ночь с 8 на 9 августа, по данным МТР-5 в районе Косино-Ухтомский (рис. 4а), наблюдалась приземная инверсия, которая начала образовываться около 20.00 ч (разрушилась после 6 ч утра). В это же время на севере в г. Долгопрудном (рис. 4б) инверсия образовалась позже и была слабо выражена. Такое пространственное различие в поле температурной стратификации привело к тому, что наиболее заметное повышение загрязнения было отмечено на окраинах города (рис. 5а), причем преимущественно на востоке (рис. 4а). На севере и в районах, расположенных ближе к центру, концентрации также возросли, но существенно не отличались от тех, которые были зафиксированы в центре.

Другой эпизод интенсивного роста концентраций на примере оксида азота на окраинах города – 24 июня 2016 г. на рис. 5а с подобной динамикой температурной инверсии в разнесенных пунктах Московского мегаполиса (рис. 5б, в).

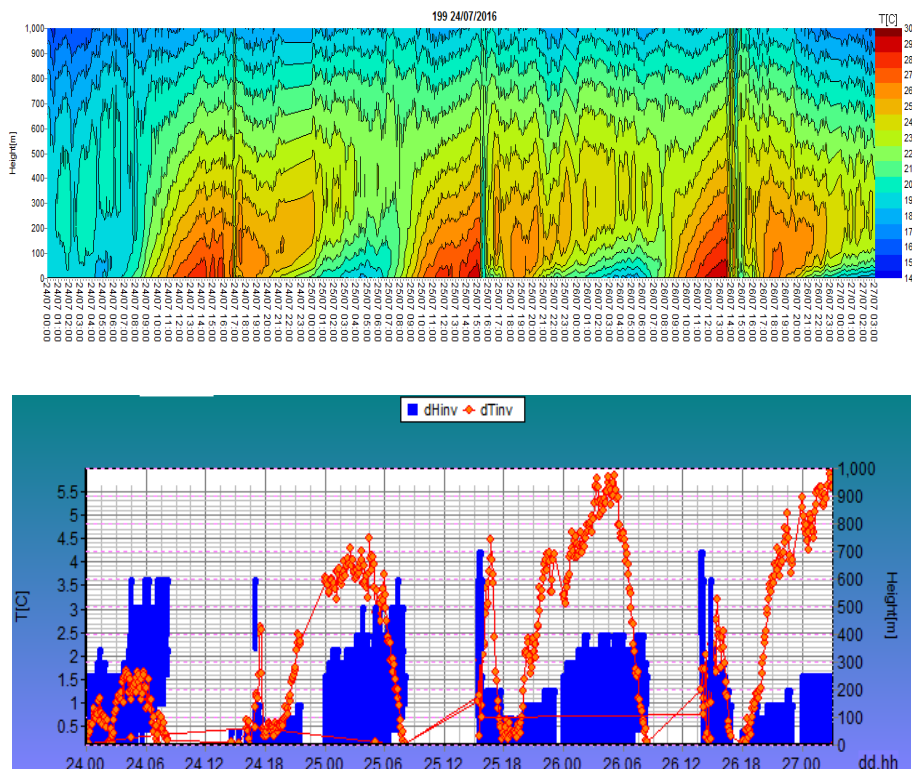
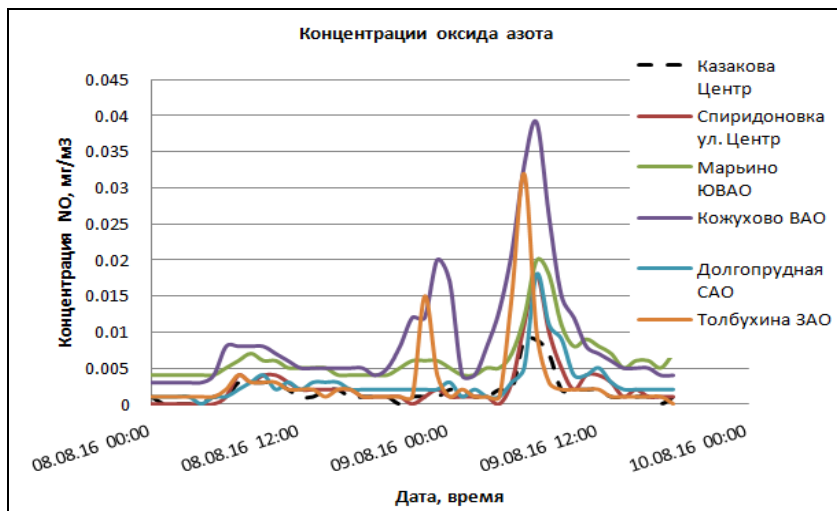


Рис. 3. Динамика температурной стратификации АПС 24–27 июля 2016 г. по данным прибора МТР-5. Верхний рисунок – динамика температуры (показана цветом в градациях шкалы $T[C]$). Внизу – характеристики температурной инверсии (синий цвет dH_{inv} – слой инверсии на правой шкале, красный dT_{inv} – мощность инверсии на левой шкале).

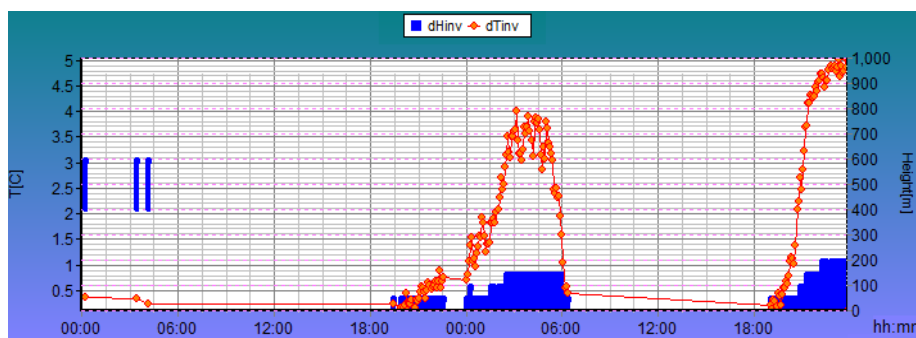
Выводы

Опыт применения температурных профиломеров в оперативной практике ГПБУ «Мосэкомониторинг» показал их полезность для анализа условий загрязнения воздуха города Москвы. Развитие систем усвоения данных в моделях численного прогноза высокого разрешения позволит получить доступ не только к ретроспективным данным и текущим показаниям динамики температурной стратификации АПС, но иметь средства для повышения успешности прогноза метеорологических характеристик в городской атмосфере. Однако следует отметить, что два пункта мониторинга – явно недостаточное количество для данной задачи.

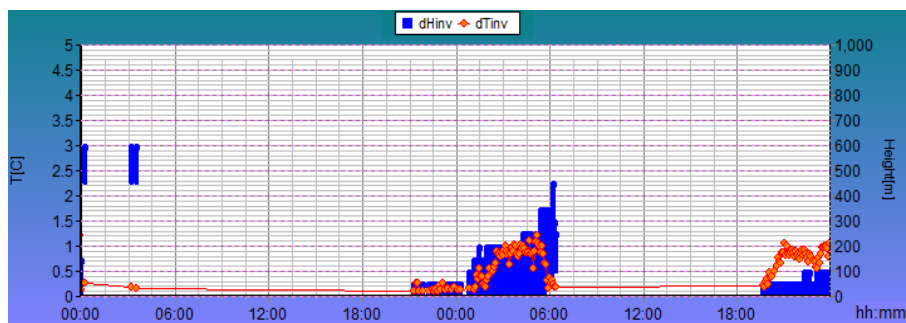
Поступила в редакцию 05.07.2017 г.



а)



б)



в)

Рис. 4. Динамика концентрации NO ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг» (а); характеристики температурной инверсии по данным МТР-5 в Косино-Ухтомский (б) и в п. Долгопрудный (в) 8–9 августа 2016 г.

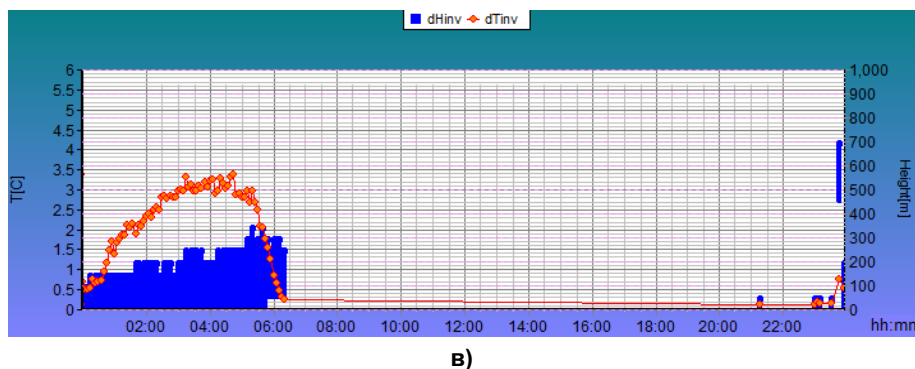
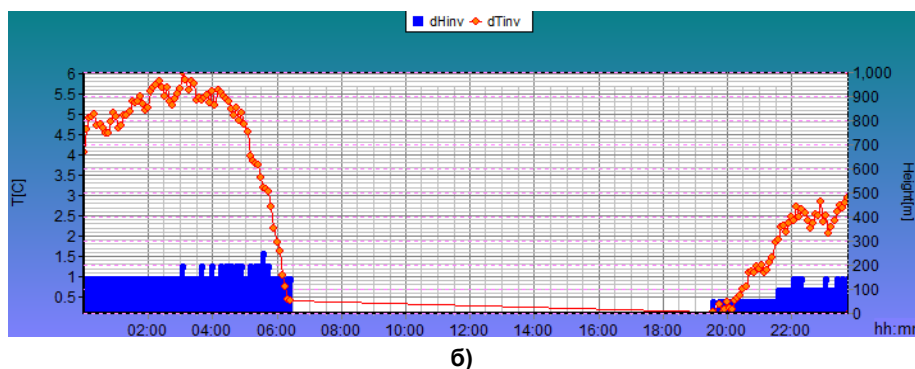
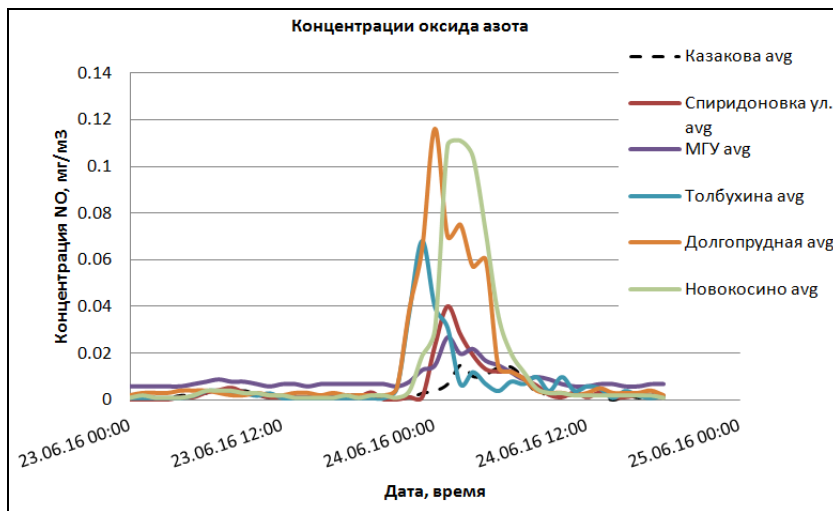


Рис. 5. Динамика концентрации NO ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг» 23-24 июня (а), характеристики температурной инверсии по данным МТР-5 в Косино-Ухтомский (б) и в п. Долгопрудный (в) ночью сильного загрязнения 24 июня 2016 г.

Список использованных источников

1. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Липченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе // Биосфера. 2014. Т. 6, № 4. С. 339-351.
2. 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.
3. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгосрочный: Физматкнига, 2015. 171 с.
4. Кузнецова И.Н. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха Москвы в летних эпизодах 2010 г. // Известия РАН. ФАО. 2012. Т. 48, № 5. С. 566-577.
5. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голыцын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Доклады Академии наук. 2002. Т. 385, № 4. С. 541-548.
6. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 877-883.
7. 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 // Известия РАН. ФАО. 2004. Т. 40, № 5. С. 678-688.
8. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351, С. 154-172.
9. Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Влияние высокой концентрации аэрозоля на термическую структуру пограничного слоя атмосферы // Известия РАН. ФАО. 2006. Т. 42, № 6. С. 778-784.
10. Юшков В.П. Оценка пространственных неоднородностей температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, №11. С. 1012-1022.
11. РБ 046-08. Мониторинг метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии.
12. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.
13. РД 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте.
14. РД 52.04.306-92. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха.
15. РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006.
16. РД 52.18.717-2009. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах.
17. Р 52.18.851-2016. Рекомендации. Основные средства измерений гидрометеорологического назначения, применяемые на государственной наблюдательной сети. Обнинск, 2016. 73 с.
18. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И. Связь задымления атмосферы Европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472, № 4. С. 456-461.
19. CBS-16/Doc. 3.2(1) 31.X.2016 г. Проект рекомендации 3.2(1)/1 (КОС-16). Всемирная метеорологическая организация.

20. Gorchakov G., Semoutnikova E., Karpov A., Lezina E. Air Pollution in Moscow Megacity // Advanced Topics in Environmental Health and Air Pollution Case Studies. Intech. 2011. P. 211-236 (www.intechopen.com).

21. EPA, Quality Assurance Guidance for the Collection of Meteorological Data Using Passive Radiometers. U.S. Environmental Protection Agency Region 10 Office of Environmental Assessment and U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards. FINAL 0611, 2011.

22. Folomeev V.V., Kadygrov E.N., Miller E.A., Nekrasov V.V., Shaposhnikov A.N., Troitsky A.V. Advanced microwave system for measurement of ABL thermal stratifica-

tion in polar region // Proc. of WMO Techn. Conf. on Meteorological Instruments and Methods of Observation (TECO-2010). Helsinki, Finland, 2010. P. 1-6 (CD).

23. Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparison with in situ observations // Meteorol. Appl. 1998. No. 5. P. 393-404.

24. Troitsky A.V., Gaikovich K.P., Gromov V.D., Kadygrov E.N., Kosov A.S. Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen band center at 60 GHz // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993. Vol. 31, No. 1. P. 116-120.

SUMMARIES

Examples of temperature stratification remote sensing for analyzing air pollution in the Moscow megapolis / Lezina E.A., Miller E.A. // Proceedings of the Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 365. P. 35-45.

The article presents some examples of the dynamics of the temperature stratification of the atmospheric boundary layer during of events with an increase in air pollution in the Moscow metropolis in the period July and August 2016. A brief description is given for the system which is used by "Moscow ecological service" for remote sensing sounding of the temperature stratification.

Keywords: remote sensing, thermal stratification, urban air pollution.