

УДК 551.524.77 551.510.42 551.501.796

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИНВЕРСИИ В МОСКВЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СОСТАВ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА

© 2021 г. М. А. Локощенко^а, *, А. Ю. Богданович^а, Н. Ф. Еланский^б, Е. А. Лезина^с

^аГеографический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^сГПБУ “Мосэкомониторинг”, Новый Арбат, 11, стр. 1, Москва, 119019 Россия

*e-mail: loko@geogr.msu.su

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

По данным акустического локатора “ЭХО-1” подробно исследована стратификация нижнего 800-метрового слоя воздуха над Москвой, включая функции распределений высот и продолжительности инверсий. Распределение высоты основания приподнятых инверсий, в отличие от мощности приземных инверсий, бимодальное, что отражает многообразие их происхождения. Утренние приподнятые инверсии (остатки ночных приземных) в среднем существуют ~3 ч, в отдельных случаях — более 6 ч; высота их основания обычно не превышает 350 м. Сверхдолгие приподнятые инверсии оседания чаще всего наблюдаются в Москве с ноября по февраль и могут непрерывно проследиваться на содарной записи вплоть до 120 ч. Исследовано влияние задерживающих слоев инверсий на приземное содержание малых атмосферных газов в Москве по данным 2002–2016 гг. С моментом окончательного разрушения утренней приподнятой инверсии связано резкое ускорение роста содержания O_3 , а также начало уменьшения NO_2 в приземном слое. Оба эффекта отражают усиление вертикального турбулентного обмена. Скачкообразное увеличение скорости роста содержания озона после исчезновения инверсии не связано с фотохимическими источниками его образования и, очевидно, отражает влияние динамических процессов (усиление притока к поверхности O_3 из вышележащих слоев). Напротив, в условиях долгоживущих приподнятых инверсий оседания осенью и зимой не выявлено достоверных изменений в приземном содержании пяти примесей: O_3 , NO , NO_2 , CO и SO_2 .

Ключевые слова: стратификация, содар, приподнятые инверсии, малые атмосферные газы, приземное содержание

DOI: 10.31857/S0002351521060080

1. ВВЕДЕНИЕ

Температурная стратификация, помимо того, что сама по себе является важной характеристикой атмосферного пограничного слоя, влияет также и на многие физические процессы: возникновение гроз, шквалов и прочих опасных явлений, рассеивание атмосферных примесей, включая малые газы, дальность распространения звуковых и электромагнитных волн и пр. В связи с быстрыми изменениями климата оценки повторяемости инверсий и других видов стратификации, полученные по данным разных методов в прошлом, требуют уточнения.

Акустическое зондирование атмосферы, помимо измерений профилей ветра доплеровскими содарами, служит также важным источником данных о турбулентной структуре и температурной стратификации нижней атмосферы. Высотно-временная развертка эхо-сигнала — так наз. “содарная запись”

простейших недоплеровских содаров — позволяет надежно определять вид стратификации с точностью до знака вертикального градиента как обычной, так и потенциальной температуры [1–3]. На содарной записи в структуре мелкомасштабной турбулентности отчетливо проявляются как слои инверсий, так и прохождение отдельных конвективных термик. Достоинствами содарных данных о стратификации являются их исключительная подробность и высокое разрешение как по высоте, так и во времени. Вследствие трудоемкости визуального анализа многолетние содарные данные о стратификации исследованы лишь для нескольких мест — в частности, для Москвы [4]. Тем не менее, оперативные содарные данные о стратификации важны для задач экологического мониторинга. Отдельные примеры связей стратификации, прежде всего наличия инверсий, с эпизодами сильного загрязнения воздуха приведены в [5–7], однако обобщений и проверки статисти-

ческой достоверности этих связей по большим выборкам данных до сих пор мало. Так, в [7] на примере отдельных дней показан рост содержания озона и уменьшение окиси углерода у поверхности по мере разрушения утренней инверсии. В [8] показана тесная связь приземного содержания двуокиси серы и сажевых частиц с мощностью приземной инверсии по содарным данным: накопление обеих примесей по мере роста инверсии вплоть до высоты самого высокого источника выбросов. В [9], помимо оценок повторяемости и высот инверсий в Москве, отмечено, что уменьшение приземного содержания SO_2 летом может быть следствием более высоких в это время приподнятых инверсий. Заметим, однако, что в городском отоплении Москвы зимой в 1960-х гг. активно использовались уголь и мазут, так что уменьшение содержания SO_2 летом могло быть связано с уменьшением ее выбросов. В [10] приведены примеры связей накопления окиси углерода у земли со стратификацией по содарным данным.

Анализ влияния стратификации и ветрового режима на состав приземного воздуха с использованием содарных данных в Метеорологической обсерватории (МО) МГУ приведен в [11–14]. В [11] получен предварительный вывод о резком ускорении роста содержания озона после разрушения утренней инверсии. В [12] показано, что приподнятые инверсии дополнительно усиливают утренний максимум окиси азота, а в [13] приведены эмпирические функции зависимостей приземного содержания различных малых газов от скорости ветра. Задачами настоящей работы стали уточнение ранее полученных выводов применительно к влиянию утренних приподнятых инверсий [11, 12] и отдельный анализ влияния долгоживущих приподнятых инверсий, проведенный впервые. Попутной задачей явилось также уточнение оценок повторяемости и высот границ самих инверсий.

2. ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ

МО МГУ находится на ближней периферии города, в 7 км к юго-западу от центра столицы. Здесь, начиная с 1988 г., осуществляется акустическое зондирование атмосферы. Здесь оно, в научном содружестве с ИФА АН СССР, впервые в России и в бывшем СССР, было начато в непрерывном режиме. Ныне оно проводится с использованием двух акустических локаторов: с 1988 г. — вертикального однокомпонентного содара “ЭХО-1” производства ГДР, а с 2004 г. — также доплеровского трехкомпонентного содара “MODOS” производства МЕТЕК, Германия. Высотные диапазоны содаров “ЭХО-1” и “MODOS” составляют соответственно 25–800 и 40–500 м; пространственное разрешение — 12.5 и 20 м. С 2004 по 2009 гг. и с 2014 г. по настоящее время зондирование в МО МГУ осуществляется одно-

временно обоими содарами. С помощью содара “MODOS” в среднем за каждые 10 мин измеряются профили скорости и направления ветра [15], а содар “ЭХО-1” дает подробные сведения о температурной стратификации, включая наличие слоев инверсий [1, 3, 4].

С 2002 по 2014 гг. в МО МГУ работала совместная экологическая станция ИФА РАН и Географического факультета МГУ, на которой в автоматическом режиме круглосуточно осуществлялись ежеминутные измерения приземного содержания CO_2 , а также малых атмосферных газов: озона, окислов азота, окиси углерода, двуокиси серы и др. [13]. Газозаборники были установлены на высоте 4 м. Все приборы станции регулярно калибровались с использованием эталонных смесей по международным стандартам сети ГСА ВМО. Помимо этой станции, в обсерватории с 2003 г. работает один из постов сети “Мосэкомониторинг”, где также в автоматическом режиме измеряется приземное содержание O_3 и NO_2 в среднем за каждые 20 мин. Начиная с июля 2014 г., состав воздуха измеряется в МО МГУ только на этом посту.

Измерения интегральной ультрафиолетовой радиации в МО МГУ с длинами волн $\lambda = 320\text{--}400$ нм автоматизированы и производятся ежеминутно с помощью серийного пиранометра UVA-1 (Yankee E.S.LTD) [16].

Использованы также данные радиозондирования, полученные на ближайшей к Москве аэрологической станции ЦАО в г. Долгопрудном. Погрешность измерений температуры воздуха T датчиками ММТ не превышает $\pm 0.5^\circ\text{C}$; постоянная времени α составляет от 5 до 7 с.

3. ДАННЫЕ СОДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СТРАТИФИКАЦИИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ В МОСКВЕ

Многолетние оценки повторяемости разных видов стратификации по данным содара “ЭХО-1” приведены в [4]. В дополнение к ним, данные этого содара проанализированы авторами отдельно за лето 2016 г.; выборка их составила 2040 ч за 87 дней зондирования, т.е. 92% всего календарного времени трех месяцев. В соответствии с традиционной кодировкой, по виду содарной записи в среднем за каждый час определялся один из восьми видов стратификации: приземная инверсия (при $\gamma = -dT/dz < 0$), слабоустойчивая, безразличная или неустойчивая стратификация в нижнем слое воздуха, а также наличие либо отсутствие поверх этого слоя приподнятой инверсии. Помимо этого, кодируются высоты границ турбулентных структур, связанных с инверсиями и конвективными термиками. В среднем за три месяца, при отсутствии приподнятых инверсий на высотах вплоть до 800 м, повторяемость приземных ин-

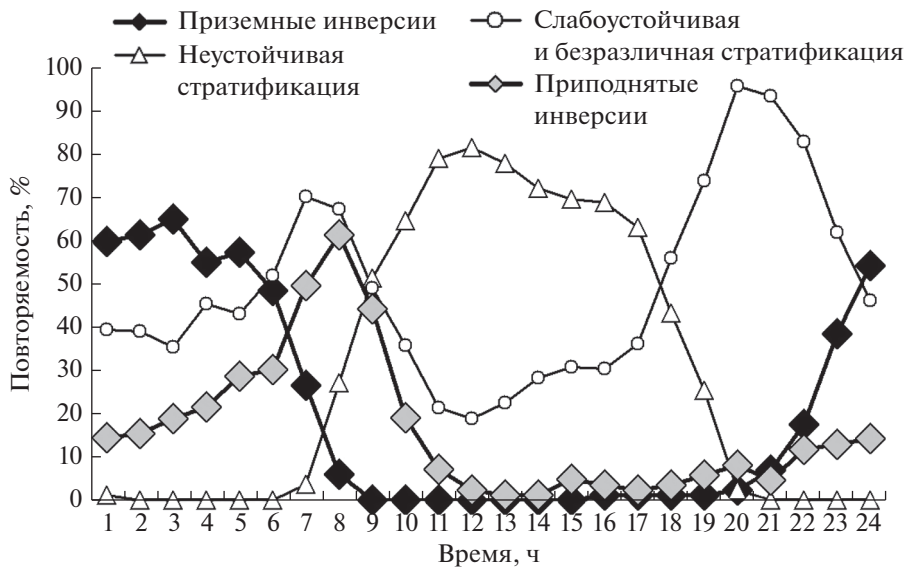


Рис. 1. Суточный ход повторяемостей типов стратификации нижнего 800-метрового слоя воздуха в Москве по данным содара “ЭХО-1” в МО МГУ летом 2016 г. (%)

версий составила 20%, слабоустойчивой или безразличной стратификации – 36%, неустойчивой стратификации – 28%. При наличии приподнятых инверсий повторяемости этих видов составили соответственно 1, 12 и 3%. Таким образом, общая повторяемость приземных инверсий достигла 21%, переходной стратификации в диапазоне от изотермии до адиабатического градиента ($0 \leq \gamma \leq \gamma_a$, где $\gamma_a = 0.98^\circ\text{C}/100 \text{ м}$) – 48%, неустойчивой стратификации – 31%, приподнятых инверсий – 16%.

На рис. 1 приведен суточный ход повторяемостей разных видов стратификации по содарным данным в Москве летом 2016 г. Как видно, он вполне обычен для теплого сезона: резко выраженный максимум повторяемости неустойчивой стратификации в светлое время суток, достигающий 80% в полдень, по мере остывания поверхности, сменяется сперва вечерним максимумом переходной безразличной и слабоустойчивой стратификации, а затем – преобладанием приземных инверсий в течение всей ночи. Заметим, что, в отличие от многолетних содарных данных, повторяемость ночных приземных инверсий летом 2016 г. была не столь высокой – лишь ~60% (в среднем за период 1988–2003 гг. – более 80% в эти часы [4]). Более редкая их регистрация могла быть связана как с погодными особенностями 2016 г., так и с многолетними изменениями температурной стратификации. Как и в другие годы, в утренние часы отмечен максимум повторяемости приподнятых инверсий (остатков ночных приземных), достигающий также 60% к 8 ч.

Говоря о приподнятых инверсиях, отметим относительность оценок их повторяемости, кото-

рая зависит от высотного диапазона измерений и пространственного разрешения того или иного метода. Чем выше то и другое, тем эта повторяемость больше. Очевидно, что в слое воздуха выше тропопаузы приподнятые инверсии существуют всегда и повторяемость их равна 100% – во всяком случае, в тропиках. Видимо, первая оценка частоты наблюдения инверсий для европейской части России приведена по результатам ежедневных подъемов змеев с 1904 по 1911 гг. в Павловске в слое до 2 км и с разрешением 100 м [17]. По этим данным средняя за год повторяемость любых инверсий (и приземных, и приподнятых) составила 28%. Приподнятые инверсии проявились даже в среднемесячных профилях T в слое от 100 до 600 м с декабря по февраль.

По данным измерений на 300-метровой высотной мачте в Обнинске с разрешением 25 м повторяемость приподнятых инверсий в среднем за 2 года составила 14–15% [18], а в среднем за 7 лет – 12% как для летних месяцев, так и в целом за год [19]. В [19], помимо прочего, отдельно приведены данные о повторяемости утренних приподнятых (остатков приземных) инверсий: 10% летом и 7% в целом за год. По данным акустического зондирования в МГУ повторяемость приподнятых инверсий в нижнем 800-метровом слое с разрешением 12.5 м в среднем за год составила 18% как в 1988–1992 [20], так и в 1988–2003 гг. [4]. Согласно многолетним данным радиозондирования на ближайшей аэрологической станции Долгопрудный (2 км к северу от Москвы), повторяемость приподнятых инверсий в слое 2 км с разрешением 100 м составила 45% [21]. По данным самолетного зондирования во Внуково (в 12 км к юго-за-

Таблица 1. Результаты сравнений данных радиозондирования и акустического зондирования о стратификации в Москве летом 2016 г.

Приземные инверсии: есть или нет			
Радиозонд	Содар	Всего случаев:	Всего случаев, %:
Есть	Есть	43	26.8
Нет	Нет	96	60.0
Есть	Нет	10	6.3
Нет	Есть	11	6.9
		160	100

паду от МКАД – традиционной границы Москвы) повторяемость приподнятых инверсий в слое до 4 км в среднем за 5 лет составила 82% [9]. Ныне в оперативных наблюдениях стратификации широко используются радиометры МТП-5, однако для Москвы многолетних оценок повторяемости приподнятых инверсий по этим данным пока нет [22].

Проверка надежности содарных данных о стратификации, в дополнение к известным ранее [3], проведена путем их сравнения с данными радиозондов в Долгопрудном. Полная выборка сравнений со всеми ночными и дневными зондами, выпускаемыми в 02:30 и в 14:30 по московскому времени, составила 160 при одновременной работе содара “ЭХО-1”. Результаты сравнений представлены в табл. 1. Как видим, доля совпадений в определении знака γ составила 87%. Несмотря на то, что аэрологическая станция и МГУ разнесены на 24 км, оценки разошлись лишь в 13% случаев, причем систематического смещения расхождений в ту или иную сторону нет. Полученный результат служит дополнительным подтверждением надежности определения стратификации по виду турбулентных структур эхо-сигнала на содарной записи.

Рассмотрим также эмпирические функции распределения высот границ инверсий по содарным данным в отдельные часы. Заметим, что мощность (высота верхней границы) приземных инверсий в начале ночи быстро растет, так что в среднем за час значения <100 м обычно не отмечаются на содарной записи. Как видим, распределение этого показателя летом на рис. 2а отличается заметной положительной асимметрией (коэффициент асимметрии равен 0.8) и качественно близко к логарифмически нормальному закону, что подтверждается более ранними данными для весенних и летних месяцев [23]. Очевидная причина этой асимметрии – сравнительно небольшие летом как среднее значение, так и медиана мощности (263 и 240 м соответственно) и их близость к нижнему физическому пределу. В отличие от

приземных инверсий, распределение высоты основания (нижней границы) приподнятых инверсий на рис. 2б бимодальное. Отдельный учет в общей выборке только инерционных “утренних” приподнятых инверсий, то есть остатков ночных приземных после их отрыва утром от поверхности (их частота показана вложенными черными столбцами) убеждает в том, что инверсии этого вида обычно низкие. Самая малая из градаций от 50 до 100 м представлена только ими; в следующей, от 100 до 150 м, они преобладают (25 из 34 ч). Напротив, среди самых высоких приподнятых инверсий (с основанием выше 450 м) утренних инверсий почти нет. Очевидно, что именно утренние инверсии создают главную нижнюю моду в общем распределении, тогда как вторичная мода на высотах 300–350 м представлена приподнятыми инверсиями в основном иного происхождения (оседания, надоблачными и пр.). Таким образом, более сложный вид распределения приподнятых инверсий по сравнению с приземными отражает многообразие их происхождения.

Утренние инверсии типичны для теплого и переходного времени года и хорошо различимы на содарной записи в виде поднимающихся и постепенно разрушающихся слоев эхо-сигнала. Пример утренней инверсии – бывшей ночной приземной, которая началась подниматься в 06:05 и окончательно разрушилась в 09:20, приведен на рис. 3. Летом 2016 г. они отмечены в 51 из 92 дней, причем только 5 раз существовали менее 50 мин. Их доля в общей выборке часов с любыми приподнятыми инверсиями составила почти половину (153 из 329 ч); ранее по содарным данным была получена близкая оценка этой доли весной и летом: 40% [20]. В среднем время жизни утренней инверсии составило летом 2016 г. 3 ч; самая долгая из них существовала 6 ч 20 мин в конце ночи и утром 25 июня.

4. ВЛИЯНИЕ УТРЕННИХ ПРИПОДНЯТЫХ ИНВЕРСИЙ НА СОСТАВ ВОЗДУХА

Для анализа влияния утренних инверсий на состав приземного воздуха по содарным данным было определено (с точностью до нескольких минут) время окончательного разрушения их турбулентной структуры для 46 случаев таких инверсий, существовавших дольше 50 мин. Рассмотрены шестичасовые промежутки времени в окрестности этого момента; на условной оси времени на рис. 4 нулевое значение соответствует моменту исчезновения утренней инверсии на содарной записи, который в отдельные дни летом 2016 г. менялся в широких пределах: с 07:11 до 11:47. Концентрациями обеих примесей в этот момент считались значения, полученные на посту сети Мосэкомониторинг в ближайший срок измерений (не ранее и не позднее 10 мин). Помимо них, на рисунке приве-

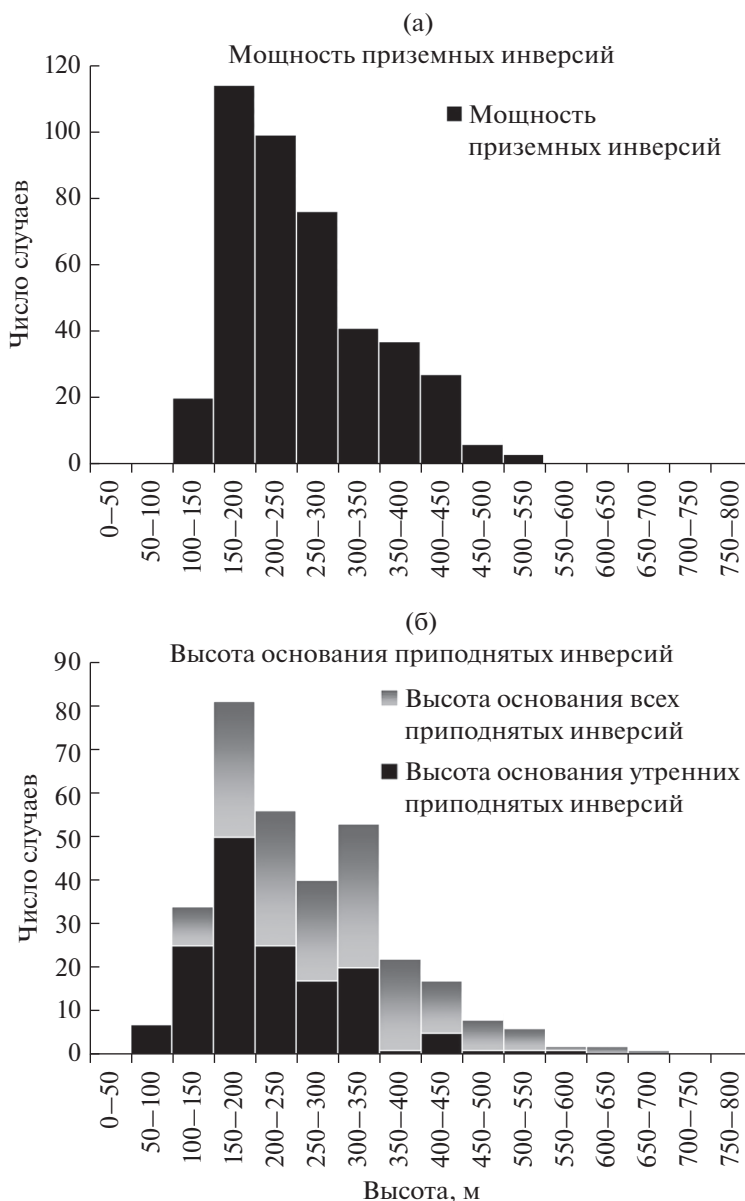
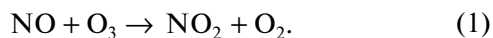


Рис. 2. Распределения высот границ инверсий в Москве по данным содара “ЭХО-1” в МО МГУ летом 2016 г.

дены также средние значения еще для 18 сроков с шагом 20 мин – за последние три часа до разрушения инверсии и за первые три часа после этого. Один из примеров динамики O₃ и NO₂ показан на рис. 3 в реальном времени.

Как видно и в этом примере, и в среднем по выборке всех 46 случаев, пока инверсия существует, уровень двуоксида азота у земли остается в среднем стабильно высоким. Как известно, в течение всей ночи NO взаимодействует с озоном с образованием NO₂:



В отсутствие солнечной радиации не происходит диссоциации NO₂. Поэтому ее содержание ночью

является повышенным, несмотря на частичный переход в трехокись азота NO₃ и затем в N₂O₅. На содержание озона ночью кроме химического стока влияет также сухое осаждение на поверхности, в результате чего в предутренние часы оно является пониженным. С восходом Солнца сначала под действием видимого излучения происходит быстрая диссоциация N₂O₅ с образованием NO₂ (отсюда небольшой максимум NO₂ в ранние утренние часы). Однако сразу после исчезновения задерживающего слоя инверсии приземное содержание NO₂ начинает быстро уменьшаться, и лишь на исходе третьего часа это уменьшение замедляется. Напротив, рост содержания O₃, начавшийся еще до разрушения инверсии вследствие развития кон-

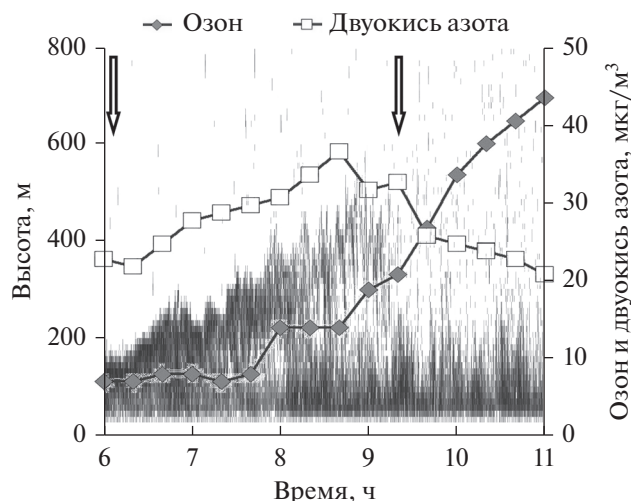


Рис. 3. Пример разрушения утренней инверсии по данным содара “ЭХО-1” и динамики приземного содержания O_3 и NO_2 в МО МГУ 22 июля 2016 г. Стрелками показаны моменты начала подъема и разрушения инверсии.

векции и вертикального перемешивания в приземном подынверсионном слое, сразу после ее разрушения резко ускоряется, т.е. возрастает первая производная. Особая точка в функции содержания озона, знаменующая ускорение его роста, приходится как раз на нулевое значение: вплоть до разрушения инверсии средняя скорость увеличения концентрации этого газа составляла $+0.14 \text{ мкг}/(\text{м}^3 \text{ мин})$, а в первый час после разрушения резко возросла до значений $+0.24 \text{ мкг}/(\text{м}^3 \text{ мин})$.

Рост содержания озона в утренние часы может быть следствием как динамического фактора (его притока к поверхности из вышележащих слоев вследствие усиления вертикального турбулентного обмена после исчезновения задерживающего слоя инверсии), так и фотохимического образования этого газа в результате диссоциации молекул NO_2 . Данная реакция происходит под воздействием коротковолновой солнечной радиации с длиной волны $\lambda \leq 410 \text{ нм}$ [24–26]. Для выявления причины обнаруженного эффекта (резкого ускорения роста содержания озона при разрушении инверсии) были привлечены данные ежеминутных измерений ультрафиолетовой радиации в МО МГУ для всех рассмотренных 46 шестичасовых промежутков времени. Как видно на рис. 4в, количество приходящей к поверхности ультрафиолетовой радиации (УФР) в утренние часы устойчиво возрастает в среднем от $4 \text{ Вт}/\text{м}^2$ за 3 ч до разрушения инверсии и вплоть до $\sim 20\text{--}25 \text{ Вт}/\text{м}^2$ после ее разрушения; ближе к концу рассмотренного промежутка времени рост УФР замедляется, но усиливается разброс между отдельными минутными значениями вследствие начала развития

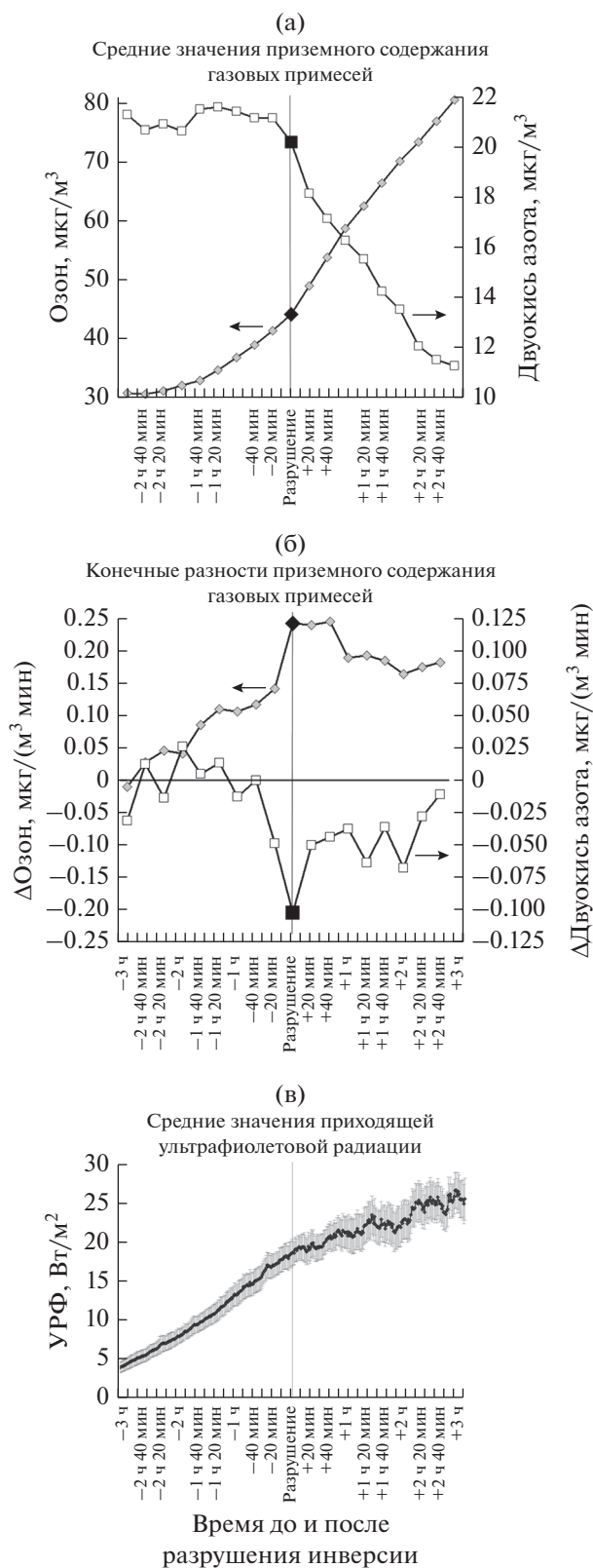


Рис. 4. Изменения приземного содержания O_3 и NO_2 , а также УФР до и после разрушения утренней инверсионной инверсии по содарным данным. Москва, МО МГУ, лето 2016 г.

Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5%.

кучевых облаков. Однако увеличение ультрафиолетовой радиации происходит плавно и постепенно и не показывает никаких резких изменений, которые могли бы объяснить скачкообразный рост содержания приземного озона. Это подтверждает ведущую роль динамического фактора (притока озона к поверхности) в изменениях приземного содержания этой примеси при разрушении инверсии. Заметим, что, по данным [27], вклад нисходящего притока озона в светлое время суток в изменчивости его приземного содержания достигает от 50 до 70%, тогда как доля фотохимических реакций образования O_3 и влияния адвекции составляет остальные 30–50%.

Качественно сходная динамика приземного озона и его первой производной при разрушении утренних инверсий была отмечена авторами ранее в [11] в среднем по выборке из 27 случаев.

5. ВЛИЯНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ ПРИПОДНЯТЫХ ИНВЕРСИЙ НА СОСТАВ ВОЗДУХА

Рассмотрим также влияние продолжительных приподнятых инверсий на приземное содержание малых газов. По данным содара “ЭХО-1” в Москве за 10 лет, с июня 1999 по март 2009 гг. и с марта по июль 2014 г., было отмечено 329 случаев приподнятых инверсий, непрерывно наблюдавшихся на содарной записи не менее пяти часов. Заметим, что чаще всего столь долгие инверсии существуют в холодное время года: с октября по февраль их было отмечено 229, т.е. 70%. Чаще всего они отмечались поздней осенью и зимой (в ноябре, декабре и январе – соответственно 49, 59 и 58 случаев). Таким образом, на эти три месяца пришлось половина всех долгих приподнятых инверсий. Распределение их времени жизни отличается резко выраженной асимметрией: почти три четверти всех инверсий продолжительностью ≥ 5 ч (243 из 329) существовали не дольше 15 ч. Заметим, что существовать пять часов подряд могут приподнятые инверсии разного происхождения, включая и надоблачные, и утренние инерционные, если они разрушаются медленно. Очевидно также, что для устойчивого накопления загрязняющих примесей в приземном слое воздуха пяти часов недостаточно.

Для более надежного выявления влияния приподнятых инверсий на состав воздуха у земли были отдельно отобраны и исследованы лишь случаи наиболее долгоживущих приподнятых инверсий оседания, отмечавшихся на содарной записи 20 и более часов. Такие сверхдолгие приподнятые инверсии, существующие столь длительное время, как правило, являются инверсиями оседания на периферии обширных малоподвижных антициклонов или отрогов. На содарной записи турбулентная структура таких инверсий лег-

ко различима, поскольку их происхождение не связано с приземным слоем воздуха: они проявляются вблизи верхней границы диапазона и постепенно опускаются на все меньшие высоты. Кажется очевидным, что существование подобных инверсий в продолжение нескольких десятков часов должно приводить к накоплению в приземном слое воздуха малых газов – во всяком случае, окиси углерода и окислов азота, связанных с выхлопами автомобильных двигателей и выбросами труб промышленных предприятий в подынверсионном слое. Однако систематических исследований подобного влияния в литературе крайне мало.

За все время одновременной работы экологической станции ИФА РАН и МГУ и содара “ЭХО-1”, с февраля 2002 по март 2009 гг. и с марта по июль 2014 г. приподнятых инверсий, непрерывно существовавших не менее 20 ч, оказалось 40, причем львиная их доля (35) наблюдалась с ноября по февраль. Рекордно долгой оказалась приподнятая инверсия, непрерывно отмечавшаяся на содарной записи в нижнем 800-метровом слое воздуха 120 ч с 28/XI по 03/XII 2003 г. Для исследования общих закономерностей влияния долгоживущих инверсий на приземное содержание малых атмосферных газов продолжительность каждой из них (от 20 до 120 ч) была разделена на шесть равных промежутков времени между моментами их образования (или появления на содарной записи при их опускании ниже “потолка зондирования” из вышележащих слоев) и окончательного разрушения. Для всех семи моментов, включая образование и разрушение, были рассчитаны средние значения приземного содержания пяти малых газов: O_3 , NO , NO_2 , CO и SO_2 по данным экологической станции. Для первых четырех газов данные имеются для 36 из 40 случаев сверхдолгих инверсий. Измерения SO_2 начались позже (в 2004 г.), поэтому число эпизодов с ними меньше: лишь 29.

Как видим, вопреки ожиданиям, наличие приподнятой инверсии даже в течение нескольких дней в среднем по всей выборке не приводит к направленным и однозначным изменениям в уровнях O_3 и NO_2 вблизи поверхности. В продолжение первой половины условного времени существования инверсии, действительно, наблюдается тенденция к закономерному росту содержания NO_2 и уменьшению O_3 (рис. 5а) вследствие ослабления вертикального турбулентного обмена, что препятствует рассеиванию продуктов горения и притоку к поверхности озона из вышележащих слоев над инверсией. Однако, с учетом доверительных интервалов, эти изменения для обеих примесей незначимы с доверительной вероятностью 0.95. Во второй же половине времени жизни инверсий отмеченные тенденции и вовсе сходят на нет, так что к моменту их разрушения приземное содер-

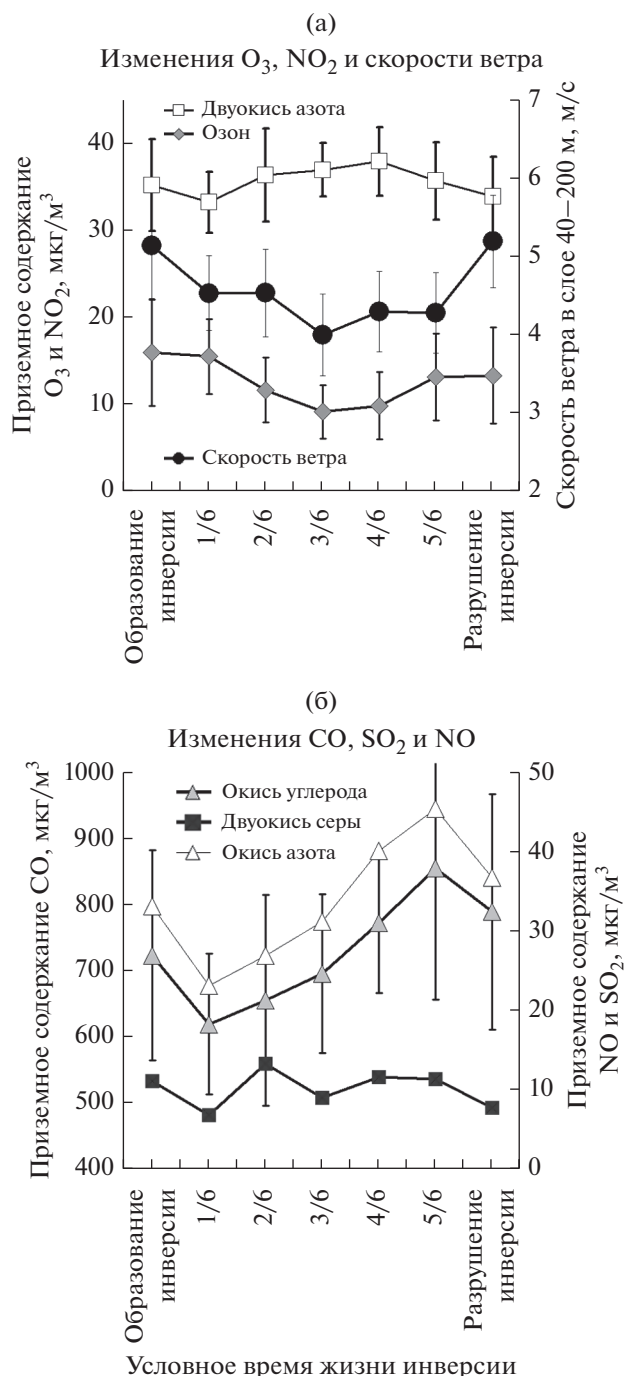


Рис. 5. Изменения приземного содержания малых газов и скорости ветра в слое 40–200 м в условиях долгоживущих приподнятых инверсий. Москва, МГУ, 2002–2014 гг.

Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5%.

жание и NO₂, и O₃ оказывается почти таким же, как и при их образовании. Что касается первичных продуктов сгорания топлива (NO и CO), то в середине периода жизни инверсии, действительно, прослеживается тенденция к их последовательному накоплению в приземном слое (рис. 5б).

Однако с учетом доверительных интервалов эти изменения незначимы; к тому же, на последнем интервале жизни инверсий отмечено уменьшение содержания обеих примесей. Динамика SO₂ вообще не показывает направленных изменений.

Таким образом, само по себе существование задерживающего слоя приподнятой инверсии, взятое в отрыве от других факторов, не приводит ни к устойчивой убыли озона вследствие его поглощения поверхностью, ни к достоверному накоплению остальных малых газов. Очевидной причиной этого служит действие других факторов – скорости ветра, растворения в выпадающих осадках и пр., а также ослабление влияния самой инверсии при ее нахождении на слишком больших высотах (в верхней части диапазона зондирования) или при слишком малой ее мощности.

Привлечение данных о средней скорости ветра V за время существования инверсии на рис. 5 наглядно подтверждает это предположение. В 19 из 40 случаев значения V получены непосредственно по данным содара “MODOS” в слое воздуха от 40 до 200 м. В остальных 21 случае использованы данные стационарного анеморумбометра М-63, установленного на высоте 15 м, приведенные к слою 40–200 м с учетом среднего отношения V в этом слое и на 15 м (2.7). Как видим, в среднем по выборке долгоживущих инверсий V заметно возросла во второй половине их жизни: с 4.0 м/с в середине времени существования инверсии до 5.2 м/с в момент ее исчезновения на записи. Рост скорости ветра приводит к усилению связанного с ним вертикального перемешивания, а также к переносу в городскую атмосферу более чистого воздуха из окрестностей Москвы, где фоновое содержание озона выше, а остальных примесей ниже. Следствием того и другого, видимо, явились рост содержания O₃ и уменьшение приземного содержания CO, NO, NO₂ и SO₂. Разумеется, усиление ветра в последние часы существования инверсий не является закономерным правилом и отражает лишь случайный характер данной выборки.

6. ВЫВОДЫ

1. Содарные данные о стратификации нижней атмосферы на основе регистрации эхо-сигнала вполне надежны: связь характерных турбулентных структур эхо-сигнала с приземными инверсиями подтверждается данными радиозондирования почти в 90% случаев.

2. Инерционные приподнятые инверсии (остатки ночных приземных инверсий в утренние часы) отмечаются летом по содарным данным приблизительно в половине всех дней и существуют в среднем 3 ч (в отдельных случаях – 6 ч и более).

3. Многообразии видов приподнятых инверсий проявляется в бимодальном распределении высо-

ты их основания, причем главную (нижнюю) моду от 150 до 200 м создают в основном сравнительно низкие инерционные инверсии.

4. С моментом окончательного разрушения утренней приподнятой инверсии связано ускорение роста содержания O_3 и скачкообразное уменьшение уровней NO_2 .

5. Сверхдолгие приподнятые инверсии обычно наблюдаются в Москве с ноября по февраль и могут отмечаться в нижнем 800-метровом слое воздуха до пяти дней подряд.

6. В условиях долгоживущих приподнятых инверсий оседания, существующих обычно осенью и зимой на больших высотах, не выявлено достоверных изменений в приземном содержании малых газов.

Авторы сердечно благодарят А.В. Кочина, В.Л. Фоменко из Центральной Аэрологической Обсерватории и Е.И. Незваль за любезно предоставленные данные радиозондирования и ультрафиолетовой радиации, а также сотрудников МО МГУ, ГПБУ “Мосэкомониторинг” и ИФА РАН за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: ИОМ СО РАН, 2001. 280 с.
2. *Brown E.H., Hall F.F.* Advances in atmospheric acoustics // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1978. V. 16. № 1. P. 47–110.
3. *Локощенко М.А.* Применение вертикальных содаров в метеорологии (обзор) // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. № 7. С. 970–992.
4. *Локощенко М.А.* Температурная стратификация нижней атмосферы в Москве // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 1. С. 53–64.
5. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 184 с.
6. *Красненко Н.П., Фурсов М.Г.* Дистанционный акустический мониторинг полей метеозагрязнения в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т. 5. № 6. С. 652–654.
7. *Russell P.B., Uthe E.E.* Acoustic and direct measurements of atmospheric mixing at three sites during an air pollution incident // *Atmospheric Environment*. 1978. V. 12. P. 1061–1074.
8. *Prater B.E., Colls J.J.* Correlations between acoustic sounder dispersion estimates, meteorological parameters and pollution concentrations // *Atmos. Environ.* 1981. V. 15. № 5. P. 793–798.
9. *Безуглая Э.Ю.* Инверсии нижней тропосферы и их влияние на загрязнение воздуха г. Москвы // *Труды ГГО*, вып. 207. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 202–206.
10. *Singal S.P., Gera B.S., Pahwa D.R.* Application of sodar to air pollution meteorology // *Int. J. Remote Sensing*. 1994. V. 15. № 2. P. 427–441.
11. *Lokoshchenko M.A., Elansky N.Ph., Semenova N.V.* Influence of thermal stratification on morning growth of surface ozone // *Proceedings of the 12th ISARS*. Cambridge, United Kingdom, 2004, Addendum. P. 27–30.
12. *Локощенко М.А., Семенова Н.В., Исаев А.А., Сарана Н.Н., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И.* Применение акустического зондирования для исследования приподнятых инверсий и их влияния на загрязнение нижней атмосферы // *Труды XV сессии РАО*. М.: ГЕОС, 2004. Т. 2. С. 117–121.
13. *Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И.* О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 39–51.
14. *Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф.* Влияние температурной стратификации на состав приземного воздуха по данным акустического зондирования атмосферы // *Труды XXXII сессии РАО*. М., 2019. С. 065–069.
15. *Локощенко М.А.* О ветровом режиме нижней атмосферы над Москвой по данным многолетнего акустического зондирования // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 4. С. 19–31.
16. *Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловецова О.А.* Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2012. 312 с.
17. *Рыкачев М.М.* Некоторые результаты исследования разных слоев атмосферы, произведенных помощью змеев с 1904 по 1911 год. Пд.: Геофизический сборник. 1914. Т. 1. Вып. 1. С. 75–113.
18. *Маишкова Г.Б.* Характеристика приподнятых инверсий в нижних 300 м атмосферы. М.: Труды ИЭМ, 1974. Вып. 6(44). С. 80–88.
19. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте / Под ред. Бызовой Н.Л. М.: Гидрометеиздат, 1982. 68 с.
20. *Локощенко М.А.* Акустическое зондирование приподнятых инверсий // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 7. С. 24–38.
21. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие / Под ред. Безуглой Э.Ю., Берлянда М.Е. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 236 с.
22. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое атмосферы по данным профиломеров МТП-5. Справочное пособие. М., Росгидромет, 2012, 61 с.
23. *Локощенко М.А.* Исследование приземных инверсий методом акустического зондирования // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 6. С. 54–65.
24. *Бримблкумб П.* Состав и химия атмосферы. М.: Издательство Мир, 1988. 352 с.
25. *Данилов А.Д., Кароль И.Л.* Атмосферный озон, сенсация и реальность. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 119 с.
26. *Graedel T.E., Crutzen P.J.* Atmospheric change: an Earth system perspective. New York, USA: W.H. Freeman and Company, 1993.
27. *Neu U., Kunzle T., Wanner H.* On the relation between ozone storage in the residual layer and daily variation in near-surface ozone concentration – a case study // *Boundary-Layer Meteorology*. 1994. V. 69(3). P. 221–247.

Thermal Inversions in Moscow and Their Influence on the Surface Air Composition

M. A. Lokoshchenko^{1, *}, A. Yu. Bogdanovich¹, N. F. Elansky², and E. A. Lezina³

¹*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Pyzhevskii lane, 3, Moscow, 119017 Russia*

³*State Budgetary Environmental Institution Mosecomonitoring, Moscow, 119019 Russia*

**e-mail: loko@geogr.msu.su*

The thermal stratification of the lower 800-m air layer above Moscow city has been studied precisely by the data of ECHO-1 sodar, including distribution functions of height and durability of inversions. The distribution of elevated inversions' bottom height, unlike the one of surface inversion top, is bimodal that reflects diversity of their generation. Morning elevated inversions (remains of nocturnal surface inversions) on average exist ~3 h, sometimes – more than 6 h; their bottom heights are usually not higher than 350 m. Overlong subsidence elevated inversions are observed in Moscow as a rule from November to February and may be detected on the sodar record continuously up to 120 h. The influence of retention layers of inversions on the surface content of minor atmospheric gases has been studied by the data of 2002–2016 in Moscow. Just in time of the morning inversion's final destruction the surface ozone growth sharply accelerates whereas NO₂ begins to fall in the surface air layer. Both effects reflect the vertical turbulent exchange intensification. A sharp acceleration of the surface ozone growth after destruction of elevated inversion does not connected with photochemical generation of this gas and, evidently, is a result of dynamical processes (strengthening of downward flow of O₃ from upper air layers). Unlike this, in conditions of long-term subsidence elevated inversions any statistically significant changes of the surface concentrations of five minor gases (O₃, NO, NO₂, CO и SO₂) have not be found.

Keywords: stratification, sodar, elevated inversions, minor air gases, surface concentration