

М.А. Локощенко, А.А. Исаев, М.А. Каллистратова, Б.А. Семенченко

ПРИПОДНЯТЫЕ ИНВЕРСИИ В МОСКВЕ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

Приведены данные о повторяемости и высотах приподнятых инверсий в Москве по результатам непрерывного акустического зондирования содаром <ЭХО-1> в 1988 – 1992 гг. Предложен интегральный показатель сравнительной оценки влияния приподнятых инверсий на условия рассеивания примесей в подынверсионном воздушном слое.

1. Введение

Концентрации загрязняющих примесей в атмосферном пограничном слое (АПС) определяются совместным действием ряда факторов, связанных как с динамической, так и с термической его структурой [1, 8]. Один из этих факторов – наличие в пределах АПС приподнятых инверсий температуры. Если такая инверсия существует, слой перемешивания ограничен уровнем ее основания (во всяком случае при $\gamma > 0$ в подынверсионном слое, где $\gamma = -dT/dz$ – принятое в метеорологии обозначение вертикального градиента температуры T с положительным знаком в направлении ее убывания). При одновременном наличии приземной и приподнятой инверсий, т. е. при $\gamma < 0$ у земли, высота слоя перемешивания отождествляется иногда с мощностью приземной инверсии независимо от того, на какой высоте над ней находится приподнятая [3]. Однако при очень слабой приземной инверсии и интенсивном росте T в некотором вышележащем слое реальным пределом распространения примесей по вертикали также может оказаться основание <запирающего> инверсионного слоя на высотах. Таким образом, параметры приподнятых инверсий в АПС дают входную информацию, необходимую для модельных оценок уровня загрязнения атмосферы. В данной работе для наблюдений приподнятых инверсий использовался метод акустического зондирования.

2. Методика и техника наблюдений

Кафедра метеорологии и климатологии МГУ совместно с ИФА РАН проводили в Москве в 1988 – 1992 гг. долговременный эксперимент по непрерывному акустическому зондированию нижнего 800-метрового воздушного слоя. Вертикальный акустический локаатор (содар) <ЭХО-1> установлен на территории Метеорологической обсерватории МГУ в зоне неплотной застройки в юго-западном секторе города. Рабочая частота локаатора – 1666 Гц, вертикальный диапазон – 800 м, длина и мощность зондирующего импульса – 75 мс и 75 Вт соответственно. Звуковые посылки вверх повторялись через 10 с.

За каждый час непрерывной работы содара по виду структуры мелкомасштабной температурной турбулентности на факсимильной записи определялся тип стратификации температуры, высоты инверсионных слоев и высота слоя перемешивания. Методика кодировки в основных чертах изложена в [3]. Результаты содарных наблюдений в Москве частично опубликованы в [2, 4–7]. Необходимым и достаточным условием существования приподнятой инверсии считалось наличие на факсимильной записи отчетливо выраженного турбулизированного слоя почернения на высотах, отделенного светлым промежутком от почернения в нижней части записи. Соответствие содарных изображений слоев реальным инверсиям подтверждается их сопоставлениями с одновременными профилями T по данным прямых методов измерений [9, 10, 12–14]. По мнению некоторых исследователей [11], верхняя граница слоя почернения на записи может быть ниже реальной вершины инверсии. Но даже если содарные оценки вершины (а значит, и мощности инверсии) бывают несколько заниженными, их можно считать несмещенными при относительном сравнении разных случаев инверсий между собой. Итак,

будем в дальнейшем считать, что содар достоверно регистрирует высоту основания и продолжительность существования турбулизированного слоя, который с большой степенью точности можно отождествить с приподнятой температурной инверсией. Возможные погрешности при таком подходе подробно рассмотрены в [4].

Однако точно измерить интенсивность инверсии, т.е. разность температур у ее вершины и основания, по содарным данным нельзя. Мощность рассеянного обратно звукового сигнала, регистрируемого от областей инверсий в атмосфере и проявляющаяся в степени почернения факсимильной записи, пропорциональна структурной характеристике температурных пульсаций C_T^2 . Последняя же связана фактически не только с градиентом потенциальной температуры Θ , но и с вертикальным сдвигом ветра, в поле которого и создаются вынужденные различия в Θ от точки к точке [9].

Тем не менее можно попытаться охарактеризовать величину γ в пределах инверсионного слоя косвенно. Принципиальная возможность определения по факсимильным записям содара степени устойчивости АПС в терминах известных классов Пасквилла проверена в [16]. Косвенная связь уровня почернения факсимильной записи с величиной γ отмечена также в [15].

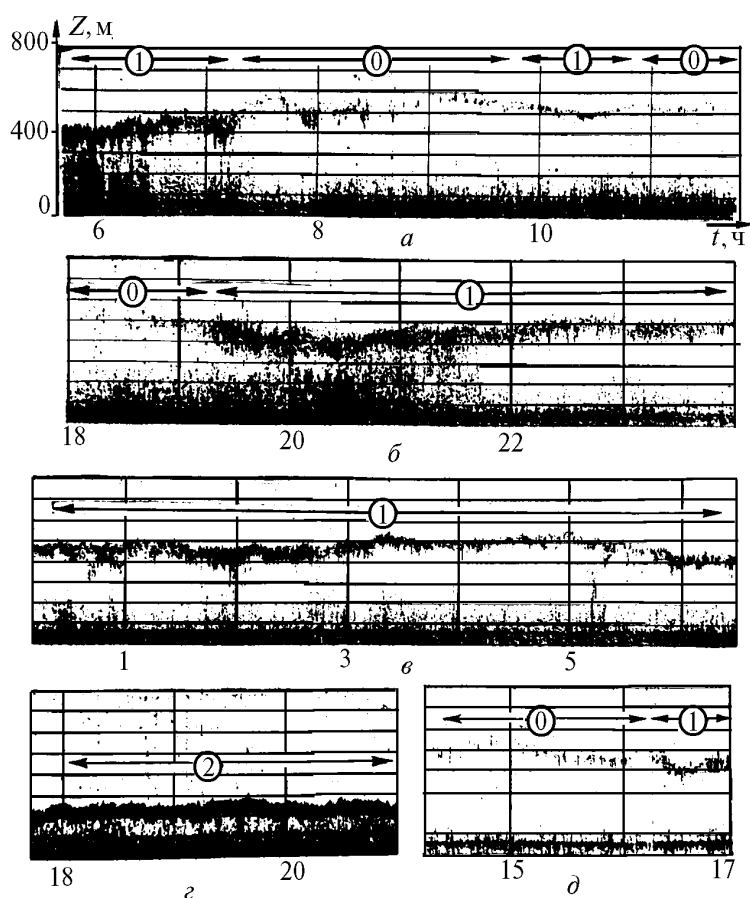


Рис. 1. Регистрация содаром приподнятых инверсий различной интенсивности: а – 19 января 1991 г. (утро); б – 20 марта 1991 г.; в – 21 января 1991 г.; г – 26 ноября 1991 г.; д – 19 января 1991 г. (день)

Установим три градации: 0 – <слабая>, 1 – <умеренная> и 2 – <сильная> инверсия (по аналогии с принятым в метеорологии качественным определением степени интенсивности осадков и состояния диска Солнца). Нулевая степень соответствует слабым, светло-серым изображениям слоев нечетко выраженной морфологии с частично размытыми границами, когда слой не регистрируется во времени непрерывно, а перемежается на записи участками с отсутствием изображения. Первая степень характеризует большинство изображений; она соответствует слоям ровного темно-серого цвета с четко выраженными границами. Изображения первой степени обязательно сплошные, без промежутков в регистрации. Вторая степень

присваивается исключительно хорошо выраженным ярко-черным сплошным слоям без полутоннов и промежуточных переходов в цвете, с очень четкими границами. Примеры факсимильных записей приподнятых инверсий различной степени интенсивности приведены на рис. 1.

Таким образом, за каждый час непрерывной факсимильной записи с приподнятой инверсией производились не только измерения высот основания и вершины, но и косвенная оценка ее интенсивности по степени почернения, выраженности границ и общей морфологии изображения слоя.

3. Общие результаты наблюдений в Москве

В табл. 1 приведены повторяемости приподнятых инверсий по результатам содарных наблюдений в Москве с ноября 1988 г. по декабрь 1991 г. и летом 1992 г. Как видно, однозначной сезонной зависимости не прослеживается. Очевиден лишь явный максимум поздней осенью и в начале зимы, когда в отдельные годы приподнятые инверсии регистрировались в 30% случаев и выше, т.е. в 2 раза чаще обычного. Вероятно, этот максимум создается совместным действием двух факторов: процессами оседания в холодный период года на периферии отрогов Сибирского максимума давления (уже существующего в ноябре) и продолжительными, особенно при теплой адвекции, надоблачными и подоблачными инверсиями поздней осенью, связанными со слоистой облачностью и туманами [4].

Таблица 1

Годовой ход повторяемости приподнятых инверсий в Москве по данным содарных наблюдений в МГУ в 1988 – 1992 гг., %

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Время наблюдений, ч	1494	1385	1771	1856	1959	1240	2031	1528	1139	1822	1696	1582
%	21,0	19,7	13,5	12,5	17,6	18,2	15,2	14,4	15,9	14,5	23,5	25,8

В другие сезоны различия в частоте регистрации приподнятых инверсий оказались невелики. Достоверность слабо выраженного минимума весной и дополнительного максимума летом нуждается в дальнейшем подтверждении. Возможно, минимум вызван сокращением к началу весны инверсий оседания при невысокой еще повторяемости приподнятых слоев, связанных с отрывом от земли утром ночной радиационной инверсии. Дополнительный же максимум, вероятно, отражает более частую регистрацию инверсий последнего типа в утренние часы в мае – июне. Подробный анализ сезонных особенностей приподнятых инверсий различного происхождения содержится в [4].



Рис. 2. Годовой ход средних высот приподнятых инверсий в Москве

На рис. 2 представлен годовой ход высоты нижней границы приподнятых инверсий в 1990 и 1991 гг. и верхней – в 1991 г. Проявляются два слабо выраженных максимума в начале лета и зимой. Первый, вероятно, связан с развитием дневной конвекции; второй же объясняется как частыми инверсиями оседания в это время года на значительных высотах, так и об-

щим повышением слоев, отмечаемых одновременно с приземными инверсиями, поскольку последние имеют зимой заметно большую мощность.

4. Интегральная оценка экологической опасности приподнятых инверсий

Очевидно, что сама по себе регистрация приподнятых инверсий недостаточна для определения степени создаваемой ими опасности повышенного загрязнения в нижней атмосфере. Условия рассеивания вредных примесей зависят в каждом конкретном случае от целого ряда факторов: высоты основания инверсии, ее интенсивности, продолжительности, а также от мощности самого инверсионного слоя (т.е. разности высот вершины и основания инверсии). Чем ниже находится инверсия и чем дольше она существует, тем более вероятным оказывается повышение концентраций загрязняющих примесей в подынверсионном слое. Естественно, речь идет о выбросах низких источников, создаваемых прежде всего выхлопами автотранспорта и невысокими ТЭЦ – таких как СО, сажа и пр. Концентрации же загрязнителей от высоких источников с устьем трубы выше основания инверсии (например, SO₂) могут быть в целом даже пониженными [1]. Вместе с тем приподнятую инверсию, строго говоря, нельзя рассматривать как абсолютно непроницаемый барьер. При достаточной подъемной силе перегретые атмосферные примеси в состоянии преодолеть относительно тонкий инверсионный слой небольшой интенсивности. Следовательно, чем мощнее этот слой и чем большим оказывается рост температуры в его пределах, тем выше вероятность опасного уровня загрязнения у поверхности.

Одновременные наблюдения содаром и радиозондами позволяют учесть также влияние на концентрации загрязнений температурной стратификации и средней скорости ветра в подынверсионном слое (последняя может быть получена и по результатам акустического зондирования при использовании доплеровского трехкомпонентного содара). Введем параметр K в качестве простейшей косвенной оценки влияния приподнятых инверсий на состояние загрязнения :

$$K = (t h (f + 1) / 360 H U) \exp(-0,5 (\gamma - \gamma_a)), \quad (1)$$

где t – время существования приподнятой инверсии на факсимильных записях; h – средняя мощность слоя; H – средняя высота основания; f – безразмерный аналог интенсивности инверсии, меняющийся от 0 до 2 в соответствии с установленными градациями; U – средняя скорость ветра в слое от земли до основания инверсии; $\gamma = -dT/dz$ в приземном слое; γ_a – сухоадиабатический градиент температуры. Размерность параметра K – [с²/м].

При строго безразличной стратификации степенной множитель обращается в единицу, в неустойчивой атмосфере уменьшается, в устойчивой – растет. Было предположено, что влияние факторов стратификации и горизонтального переноса в подынверсионном слое на итоговое значение параметра K должно быть сопоставимым. С учетом этого предположения коэффициент – 0,5 подобран таким образом, что величина степенного множителя практически изменится в пределах 1-го порядка (от 0,6 до 5,0 в 56 случаях продолжительных инверсий в 1991 году). В сходных пределах варьирует и U (от 1 до 13 м/с по тем же данным).

Значения введенного параметра K были рассчитаны для непрерывных приподнятых инверсий продолжительностью не менее 5 ч на примере 11 месяцев 1991 г. Всего таких случаев, зарегистрированных за этот период содаром в МГУ, оказалось 56.

Величина t представляет количество часов непрерывной регистрации на факсимильной записи одной приподнятой инверсии. Для удобства представления t в часах в формулу введен численный коэффициент 1/3600. Величины h , H и f получены осреднением соответствующих среднечасовых значений. Наконец, U и γ рассчитывались по результатам запусков радиозондов за время существования инверсии на ближайшей станции радиозондирования ЦАО (г.Долгопрудный, в 25 км от МГУ). Значение γ определялось в слое от контрольных значений у земли до 100 м – первого уровня отсчетов. Если инверсия отмечалась между сроками радиозондирования, то использовались данные одного или двух ближайших по времени запусков с учетом суточного хода γ в нижнем слое.

По результатам расчетов K для инверсий продолжительностью ≥ 5 ч наименьшее его значение в 1991 г. составило 0,1, а наибольшее – 12,4. Таким образом, параметр K варьирует в пределах двух порядков своей величины. Математическое ожидание K по выборке из 56 случаев со-

ставило 1,9, причем лишь в 14 случаях значение K оказалось больше 1,9. Примеры расчета приведены в табл. 2.

Как видим, исключительно длительные приподнятые инверсии, вопреки обычным представлениям о них, не всегда являются самыми опасными с точки зрения условий рассеивания примесей. Так, инверсия рекордной за все время содарных наблюдений в Москве продолжительности (77 ч) в ноябре 1991 г., явившаяся результатом оседания на периферии обширного антициклона и последующего развития под ее основанием слоистой облачности, обнаружила не очень высокое значение $K = 3,7$. В то же время гораздо менее долгая инверсия (9 часов) в том же месяце, связанная, по-видимому, с динамическими и радиационными процессами на границе облачного покрова, оказалась, в целом, существенно более опасной: $K = 12,4$.

Отметим также, что подавляющее большинство случаев с наиболее высокими значениями K приходится на холодный период года. В летние же месяцы величина этого параметра, по нашим данным, не превышала 2,5.

Таблица 2

Примеры расчета оценки влияния приподнятых инверсий на условия рассеивания примесей (параметр K), 1991 г.

Дата регистрации инверсии	h , м	t , ч	$(f+1)$	H , м	U , м/с	K , $\text{с}^2/\text{м}$
18 – 19 / I	43	37	1,6	459	4,9	1,0
7 / III	44	6	1,3	183	1,0	9,4
11 / III	176	5	2,6	150	3,7	5,0
7 – 8 / V	88	10	1,6	384	2,8	1,3
11 / VI	112	5	1,4	276	2,0	0,9
18 / VI	82	15	1,4	418	3,5	2,5
30 / VIII	96	7	1,6	451	6,5	0,4
20 – 21 / IX	70	19	1,6	240	1,3	8,2
6 / X	84	14	1,5	425	2,4	1,2
5 / XI	106	9	1,7	620	12,7	0,3
14 / XI	56	5	1,6	570	11,1	0,1
17 / XI	95	9	1,7	258	0,5	12,4
25 – 28 / XI	49	77	1,9	446	4,8	3,7
29 / XI	40	5	1,0	340	2,8	0,2

Подводя итог сказанному, заметим, что предложенный параметр служит лишь приближенной сравнительной оценкой возможного уровня загрязнения, создаваемого у земли источниками выбросов под приподнятой инверсией. Он может быть использован при анализе условий рассеивания примесей в нижней атмосфере, когда простейшие содарные наблюдения дополняются радиозондированием с достаточно хорошим разрешением по вертикали.

5. Выводы

1). По данным непрерывного акустического зондирования нижнего 800-метрового слоя Москвы в 1988 – 1992 гг. годовой ход как повторяемости, так и высот приподнятых температурных инверсий сложен и не обнаруживает очевидных сезонных закономерностей. Наиболее часто такие инверсии регистрировались в ноябре и декабре; они обнаружены несколько более высокими зимой и летом и относительно пониженными в переходные сезоны.

2). Высота основания приподнятых инверсий в Москве в среднем за месяц меняется в пределах от 300 до 450 м.

3). Предложена типизация факсимильных изображений приподнятых инверсий, косвенно характеризующая их интенсивность. На ее основе введен параметр обобщенной оценки влияния приподнятых инверсий на загрязнение воздушного бассейна. Пределы изменения его значений очень широкие, что говорит о существенно различном влиянии приподнятых инверсий на условия рассеивания примесей в атмосфере.

Авторы благодарят М.С. Пекура за большую помощь в работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
2. Исаев А.А., Локощенко М.А., Каллистратова М.А., Пекур М.С. Применение метода акустического зондирования в задачах экологии городского пограничного слоя (на примере Москвы). // Тр. науч.-практич. конф. <Стратегия экологической безопасности России>. Санкт - Петербург, 1992.
3. 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, N 1).
4. Локощенко М.А. Акустическое зондирование приподнятых инверсий. // Метеорология и гидрология. 1994. (в печати).
5. Локощенко М.А., Пекур М.С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 3. С. 313 – 316.
6. Локощенко М.А., Исаев А.А., Каллистратова М.А., Пекур М.С. Исследования атмосферного пограничного слоя над Москвой дистанционными и прямыми методами. // Метеорология и гидрология. 1993. N 9. С. 20–34.
7. Пекур М.С. Предварительные результаты содарных исследований АПС над Москвой. М., 1990. Ч. 1.С. 62 – 71. (Препринт / ИФА, N 7).
8. Семенченко Б.А., Белов П.Н. Метеорологические аспекты охраны природной среды. М.: Изд-во МГУ. 1984.
9. Brown E.H., Hall F.F. Advances in Atmospheric Acoustics. Reviews of Geophysics and Space Phys. 1978. V. 16. N 1. P. 47 – 110.
10. Caughey S.J., Dare W.M., Crease B.A. Meteorological Magazine. 1978. V. 107. P. 103 – 112.
11. Crease B., Caughey S., Tribble D. // Meteorological Magazine, 1977. V. 106. P. 42– 52.
12. Von Gogh R. Zib P. // J. Appl. Met. 1978. V. 17 N 1. P. 34 – 39.
13. Gossard E. et al. // J. Atm. Scienc. October. 1985. V. 42. N 20. P. 2156 – 2169.
14. Guedalia D. et al. // J. Appl. Met. 1980. V. 19. N 7. P. 839 – 848.
15. Parry H., Sanders M., Jensen H. // J. Appl. Met. 1975. V. 14. N 2. P. 67–77.
16. Singal S.P., Aggarwal S.K. et al. // Atm. Environment. 1985. V. 19. N 2. P. 221 – 228.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
15 ноября 1993 г.

**M.A. Lokoshchenko, A.A. Isaev, M.A. Kallistratova, B.A. Semenchko.
Lifted Inversions over Moscow and Their Influence on the Environment.**

In this paper we present data on the frequency of occurrence of lifted inversions in the atmosphere over Moscow obtained as a result of continuous sounding of the atmosphere with a sodar ECHO - 1 undertaken in the period from 1988 till 1992. Based on the results of this study we have proposed an integrated index to be used for a comparison of the influence of lifted inversions on the dispersal of contaminants in the atmospheric layer under the inversion.