

ПРИМЕНЕНИЕ СОДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СТРАТИФИКАЦИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ

Исследуется влияние синоптических условий на стратификацию нижнего 800-метрового воздушного слоя над Москвой. Используются почасовые данные непрерывного содарного зондирования за 7 месяцев. Предложена методика параллельного анализа барического поля и географического типа господствующей воздушной массы (когда последний определяется однозначно). Особенность анализа – высокая дискретность во времени с точностью до 2–3 ч – позволяет впервые изучить в деталях кратковременные изменения температурной стратификации. Чем холоднее установившаяся воздушная масса, тем чаще отмечаются термическая конвекция в теплый период года и приземные инверсии – в холодный. Однако в часы самого вхождения холодных масс зимой в тылу циклонов приземные инверсии наблюдаются редко. Летом синоптически обусловленных различий в повторяемости приземных инверсий не обнаружено. Приподнятые инверсии всегда чаще отмечаются в центре антициклонов и на осях гребней, а в холодный период – еще и в теплых воздушных массах. Помимо основной задачи работы обсуждаются также особенности трансформации воздушных масс над Москвой в разные месяцы года.

Температурная стратификация атмосферного пограничного слоя (АПС) в городах довольно сложна и изменчива. Заметно влияют на нее и синоптические условия. Задачей настоящей работы явилось тщательное выявление тонких закономерностей этого влияния. Из всего многообразия синоптических связей здесь рассматриваются изменения вертикального градиента температуры T в зависимости от типа господствующей воздушной массы, а также от положения места относительно крупных барических образований и атмосферных фронтов.

Новизна работы заключается в том, что впервые для решения подобной задачи привлечен обширный архив содарных наблюдений, позволяющих исключительно подробно проследить самые тонкие нюансы в изменениях стратификации. Анализ содарных данных при правильном их истолковании обещает быть очень точным с учетом их детальности и высокого разрешения как по вертикали (около 10 м), так и во времени (звуковые импульсы посылаются в атмосферу каждые 10 с). Полученные выводы могут быть полезны для улучшения прогнозов уровней загрязнения воздуха с учетом синоптических условий.

Зондирование нижнего 800-метрового слоя атмосферы над Москвой с помощью вертикального содара «ЭХО-1» проводилось в МГУ совместно с ИФА АН СССР непрерывно более 3 лет. Рабочая частота составляла 1666 Гц, длительность и мощность зондирующего импульса – соответственно 75 мс и 75 Вт. Каждый часовой интервал непрерывной факсимильной записи эхосигнала в координатах «время–высота», показывающей вид турбулентной структуры АПС, анализировался отдельно. На основе методики [12], дополненной автором, по записи определялись тип температурной стратификации, а также высоты границ перьевидных изображений и горизонтальных слоев эхосигнала, связанных соответственно с конвективными термиками и с температур-

ными инверсиями. Достоверность такой интерпретации и ее экспериментальное обоснование подробно рассмотрены в [7, 8].

Очевидно, что стратификация приземного слоя атмосферы меняется ото дня к дню главным образом вследствие адвективных процессов и последующей трансформации пришедшего воздуха*. Поэтому положим адвективные изменения T в основу нашего синоптического анализа. При проведении его возможны по меньшей мере два подхода: на основе либо барического поля, либо типа воздушной массы. Будем использовать их параллельно. Для исследования выбраны 7 месяцев содарных наблюдений в 1991 г. С января по март, в августе, сентябре и ноябре зондирование проводилось в МГУ, а с 24/VI по 25/VII – в Останкине, в северной части Москвы. Предварительные результаты опубликованы в [9, 15].

Анализ барического поля

Для этой части анализа была составлена классификация синоптических ситуаций по признаку наличия и знака температурной адвекции.

Предложенная классификация наглядна и проста, а число классов в ней сведено к минимуму. В основе ее лежит приуроченность адвективных процессов к определенным участкам барического поля. Подобное соответствие очень хорошо выполняется летом, когда воздушные массы быстро трансформируются над сушей в средних широтах. В холодный же период так бывает не всегда. Например, 19 ноября вхождение на ЕТС холодного континентального умеренного воздуха (КУВ) происходило по западной периферии, т.е. в тылу отрога над

* Синоптические закономерности приподнятых инверсий в слое Экмана более сложные, о чем еще пойдет речь ниже.

Южным Уралом. Здесь в каждом конкретном случае нужно учитывать тип приходящей воздушной массы и очаг ее формирования.

Синоптическая ситуация	Основной процесс
1. Малоградиентное барическое поле в седловине, в центре антициклона, отрога или в районе оси гребня	Трансформация, формирование местной воздушной массы; заметной адвекции нет
2. Центр циклона, вторичного циклона или ось ложбины	Как правило, это зона фронта, активные фронтальные процессы
3(а). Тыловая область антициклона или гребня	Адвекция относительно теплой воздушной массы
3(б). Передняя часть циклона или ложбины перед теплым фронтом	
4(а). Передняя часть антициклона или гребня	Адвекция относительно холодной воздушной массы
4(б). Тыловая область циклона или ложбины за холодным фронтом	
5. Теплый сектор циклона	Адвекция относительно теплой воздушной массы

Границами классов 3, 4 и 5 служат обычно фронты и линии нулевой адвекции на осях гребней. Разграничение здесь, кроме редких случаев, не составляет труда. Обычно класс 4(б) постепенно переходит в 4(а). На осях подвижных гребней, разделяющих циклоны, 4(а) сменяется 3(а) вслед за достижением максимума в ходе давления и поворотом ветра. За классом 3(а) следует 3(б) в условиях уже циклональной кривизны изобар, а затем – 5 после прохождения теплого фронта. На смену классу 5 (или 3(б) в случае фронта окклюзии) обычно идет 4(б). В обширных же антициклонах, замыкающих циклонические серии, ситуация за холодным фронтом может характеризоваться и слабоградиентным полем (класс 1).

Для выделения этого класса предложим обобщенный критерий: нулевая или очень малая барическая тенденция ($\leq |0,2 - 0,3|$ гПа за 3 ч); штиль или $v \leq 2$ м/с у Земли; слабый геострофический ветер на поверхности 850 гПа ($\leq 10-15$ м/с); малая геострофическая составляющая температурной адвекции $(\partial T/\partial t)_a$ – не более нескольких десятых долей °С за 12 ч. Как подспорье при анализе полезны также карты относительной барической топографии. Но доверять им всецело не стоит, поскольку нас интересует отсутствие адвекции не во всем слое от 1000 до 500 гПа, а лишь в пределах АПС.

Учитывая эти показатели в целом, обычно трудно определить границы класса 1 с точностью до 3–4 ч. Правда, им может отвечать также класс 2. Но он выделяется редко на фоне низкого давления и с учетом ярко выраженных фронтальных процессов в погоде.

Сходство по знаку адвективных изменений T позволяет объединить родственные подклассы (а) и (б). Иногда примыкающие периферии соседних барических образований различают по характеру кри-

визны изобар [13]. Но нас пока интересуют самые общие закономерности. Поэтому будем использовать 5 главных классов, не разделяя их подробнее.

Анализ воздушных масс

Как уже говорилось, анализ барического поля недостаточен для понимания синоптических закономерностей стратификации АПС. Требуется отдельно распознавать тип воздушных масс с привлечением для этого возможно большего набора показателей. Такой анализ проведен на основе их географической классификации. Вначале тип массы предполагался соответствующим очагу ее формирования, определявшемуся по обратным траекториям воздушных частиц на уровнях 850 и 700 гПа. Затем он уточнялся с учетом среднесуточной T_{cp} , максимальной T_{max} , минимальной T_{min} и псевдопотенциальной θ_{ps} температур, °С; упругости водяного пара e , гПа; абсолютной влажности a , г/м³; удельной влажности q , г/кг; недостатка насыщения d , гПа; наименьшей относительной влажности f_{min} , %; дальности видимости D , км; показателя аэрозольной оптической толщины атмосферы τ ; формы облаков и атмосферных явлений. Характерные для разных типов масс диапазоны метеозаписей хорошо изучены в классической климатологии [1, 5, 6, 14].

Анализ проведен на основе карт приземного анализа, абсолютной и относительной барической топографии, а также метеонаблюдений в МГУ. Значения θ_{ps} определялись по профилям радиозондирования в ЦАО, $(\partial T/\partial t)_a$ – по картам АТ₈₅₀. Данные τ любезно предоставлены Е.В. Ярхо. Заметим, что полный набор показателей не всегда имелся в распоряжении автора.

Особенности примененного метода

Почасовая кодировка содарных данных требует высокой детализации анализа во времени. Поэтому границы всех классов и типов масс определялись с точностью 2–4 ч. В аспекте воздушных масс рассматривались лишь периоды с несомненным их типом, отвечавшим большинству характеристических значений. Из обработки исключалось время, отмеченное господством массы с промежуточными свойствами, а также постепенным изменением ее типа при трансформации. Не определялся тип массы и в часы нахождения Москвы в зонах стационарных фронтов (класс 2), когда характеристические значения метеозаписей непоказательны. Поэтому общее число часов наблюдений при анализе воздушных масс всегда меньше, чем при анализе синоптических ситуаций.

Задача столь подробного разделения во времени обычно не ставится в климатологии. Известно и скептическое отношение к составлению календарей воздушных масс [10]. Принято сомневаться в воз-

возможности надежного распознавания их географических типов. Если в [14] типы уверенно сопоставляются с диапазонами метеозадающих элементов, то в [6] отношение к их определению уже более осторожное. Конечно, разнообразие циркуляционных процессов и активная трансформация, особенно летом, создают много смешанных и переходных форм, но в отдельные периоды тип воздушной массы проявляется исключительно ярко и однозначно. По убеждению автора, тщательный анализ синоптических карт, данных наземных метеонаблюдений и радиозондирования позволяет надежно выявлять такие периоды.

Таким образом, новизна предложенного подхода состоит в рассмотрении не полного временного ряда, а лишь выбранных из него часов, когда тип воздушной массы можно определить объективно и однозначно.

В [10, 11] при изучении регионального климата исследуются конкретные районы поступления воздушных масс. Но наряду с получением более подробной климатической информации при этом теряется объективный предел дифференциации условий. Не ясно, до какой степени «дробления» таких районов следует доходить на практике. Объективность же рассмотрения основных географических типов масс определяется общей циркуляцией атмосферы и глобальным распределением площадей океанов и суши.

С другой стороны, каталоги известных типизаций синоптических процессов (Л.В. Клименко и др.) характеризуют отдельные дни в целом. Это оправ-

данно, если речь идет о многолетних рядах наблюдений. Своеобычие же содарных наблюдений (их климатически небольшой ряд и подробность во времени) требует к себе особого подхода. Здесь уже нельзя пренебречь погрешностями, связанными со сменой синоптической ситуации в течение суток. Поэтому выбор принятого здесь метода синоптического анализа диктовался особенностями данных дистанционного зондирования. Он близок к предложенному в [4] анализу типов погоды за небольшие периоды, проведенному там на примере одного месяца.

Однако в [4] рассматривались опять же отдельные дни, хотя смена синоптических условий редко приходится точно на начало суток. Использование только двух показателей – T и e – обедняет возможности анализа типов погоды по сравнению с рассмотрением воздушных масс. Например, зимой отличие условий морского арктического воздуха (МАВ) и КУВ ярко проявляется лишь в D , тогда как значения других метеозадающих элементов близки между собой.

Кроме того, в основе выделенных типов погоды («относительно теплая», «умеренно холодная, влажная») не видно объективного критерия. Качественные характеристики гидротермического эффекта затрудняют обобщение такого анализа для других мест, поскольку пороговые значения T и e всюду свои. Заметим, что в ряду таких типов в [4] не оказалось «нормальной» погоды с условиями, близкими к климатической норме. Отметим также, что многолетние данные о четырех типах погоды в Москве обобщены в [3].

Результаты синоптического анализа данных содарного зондирования о температурной стратификации в Москве в 1991 г:
а – холодный период; б – теплый период

Повторяемость*, %	Синоптическая ситуация				Тип воздушной массы					
	5	3	1	4	МУВ	МАВ	КУВ	КАВ⇒КУВ	КАВ	Неоднозначный или переходный
а										
<i>2–30 ноября</i>										
Приземных инверсий**	68	51	48	53	49	–	70	79	–	
Приподнятых инверсий	35	35	53	19	47	–	20	4	–	
Конвекций	5	2	5	5	4	–	2	–	–	
Слабостойчивой и безразличной стратификации	27	47	47	42	47	–	28	21	–	
Количество часов содарных наблюдений***	44	347	159	49	389	–	57	24	–	129
<i>3–31 января</i>										
Приземных инверсий	62	57	62	41	43	50	46	–	76	–
Приподнятых инверсий	3	33	53	19	15	6	15	–	16	–
Конвекций	–	4	7	4	1	–	4	–	5	–
Слабостойчивой и безразличной стратификации	38	39	31	55	56	50	50	–	19	–
Количество часов содарных наблюдений	88	173	40	235	215	45	79	–	83	114
<i>февраль</i>										
Приземных инверсий	44	65	75	56	50	48	62	–	94	–
Приподнятых инверсий	37	22	22	17	30	29	13	–	19	–
Конвекций	2	–	5	3	2	10	5	–	–	–
Слабостойчивой и безразличной стратификации	54	35	20	41	48	42	33	–	6	–
Количество часов содарных наблюдений	68	173	165	174	135	63	206	–	54	122
<i>март</i>										
Приземных инверсий	69	64	59	35	57	53	57	–	–	–
Приподнятых инверсий	23	28	31	9	28	9	25	–	–	–
Конвекций	4	14	25	31	5	31	27	–	–	–
Слабостойчивой и безразличной стратификации	27	22	16	34	38	16	16	–	–	–
Количество часов содарных наблюдений	103	190	204	206	162	59	347	–	–	135

Повторяемость, %	Синоптическая ситуация					Тип воздушной массы						Неоднозначный или переходный		
	2	5	3	1	4	КТВ	КТВ ⇒ КУВ	КУВ	МУВ	МАВ	КАВ			
б														
<i>24 июня–25 июля</i>														
Приземных инверсий	55	35	38	31	36	40	32	35		37		37		
Приподнятых инверсий	23	15	11	18	16	17	28	17		15		4		
Конвекций	2	36	30	47	46	30	46	45		49		42		
Слабоустойчивой и безразличной стратификации	43	29	32	22	18	30	22	20		14		21		
Количество часов содарных наблюдений	40	88	49	181	298	99	66	157		120		26	188	
<i>29 июля–31 августа</i>														
Приземных инверсий	44	65		50	52			60		53		50		
Приподнятых инверсий	29	15		16	18			18		16		8		
Конвекций	8	23		35	29			26		25		41		
Слабоустойчивой и безразличной стратификации	48	12		15	19			14		22		9		
Количество часов содарных наблюдений	119	115		207	316			178		228		44	307	
<i>сентябрь</i>														
Приземных инверсий		62		45	54	62		50		63		61	54	
Приподнятых инверсий		20		25	19	28		30		18		13	10	
Конвекций		13		17	18	8		8		11		31	31	
Слабоустойчивой и безразличной стратификации		25		38	28	30		42		26		8	15	
Количество часов содарных наблюдений		244		87	239	78		95		85		40	69	203

* При вычислении повторяемостей за 100% принята сумма часов с тремя возможными типами стратификации в нижнем воздушном слое ($\gamma < 0$, $0 \leq \gamma \leq 1$ и $\gamma > 1$ °C/100 м), а повторяемость приподнятых инверсий вычислена по отношению к этой сумме.

** Инверсии: $\gamma < 0$, где $\gamma = -\partial T/\partial z$, °C/100 м; слабоустойчивая и безразличная стратификация: $0 \leq \gamma \leq 1$; конвекция: $\gamma > 1$.

*** Часы наблюдений, пришедшиеся на выпадение сильных и умеренных осадков, затрудняющих надежную интерпретацию содарных факсимильных записей, исключены из рассмотрения.

Рассмотрим вкратце **синоптические условия некоторых месяцев 1991 г.**, выбранных для анализа. Сделанные здесь попутно выводы, возможно, представляют некоторый климатологический интерес. Кроме того, описание показывает, сколько раз тот или иной тип массы отмечался в течение месяца, т.е. насколько показательны результаты расчетов в таблице.

1) В целом **январь**, особенно 1-я декада, был очень теплым (на 3,3°C теплее нормы) и влажным из-за сильно развитой исландской депрессии и ослабленного сибирского максимума. Усиление западного переноса определило 6 случаев выноса на ЕТС морского умеренного воздуха – МУВ. 11/1 T_{cp} и T_{max} достигли в МГУ рекордных значений +3,4 и +5,2°C, характерных даже для тропического воздуха МТВ [5]! Но другие показатели остались типичными для МУВ, подтверждая общее правило: циклоны полярного фронта зимой почти всегда окклюдируются в Москве [1]. Очень глубокий циклон охватил 26/1 всю ЕТС. С прохождением его сложной фронтальной системы связана быстрая смена трех воздушных масс, когда за сутки T понизилась на 20°C! В тыловой его части произошло ультраполярное вхождение континентального арктического воздуха (КАВ), несомненно, отмечавшегося у Земли с двумя короткими перерывами ≈ 145 ч с 27/1 по 4/II.

2) Синоптические условия в **феврале** также были разнообразными. Холодные первые дни сменились обычной T в середине месяца, когда почти 9

суток беспрерывно господствовал КУВ. Третья декада была очень теплой вследствие двух подряд вхождений МУВ (второй раз – возвращающегося). Дважды отмечены недолгие, примерно по 30 ч каждый раз, вхождения МАВ.

3) **Март** выдался умеренно теплым и очень сухим. Всю первую декаду Москва находилась в размытом барическом поле в центре блокирующего антициклона (рис. 1, а). Длительное отсутствие адвекции у Земли и на высотах позволяет считать значения метеозаписей в эти дни практически эталонными для местной массы (КУВ) в начале марта. Они таковы: $T_{cp} = -4-5^\circ\text{C}$; $T_{max} = +1+3^\circ\text{C}$; $e = 2-3$ гПа; $q = 1-2$ г/кг; $a = 1-3$ г/м³; $D = 15$ км. К середине месяца восстановился западный перенос и связанная с ним циклоническая деятельность. Классы сменялись по схеме: $3 \Rightarrow 5 \Rightarrow 4$, прерывавшейся иногда ослаблением барических градиентов на осях гребней и в седловинах: $4 \Rightarrow 1 \Rightarrow 3$. Интересно, что одна и та же ситуация тыла циклона (класса 4) сопровождалась в марте вхождениями трех типов масс: КУВ, МАВ и даже атлантического МУВ (последний сменил за холодным фронтом более теплый МУВ из Средиземноморья, заполнявший теплый сектор циклона 22–24/III). Это показывает недостаточность анализа только в аспекте барического поля и в отрыве от изучения типа воздушной массы.

4) **Период с 24/VI по 25/VII** можно разделить на 2 части. Жаркая погода до 3/VII была обусловлена ад-

векцией КТВ из Средней Азии по юго-западной периферии антициклона (рис. 1, б). Отдельно рассмотрен период трансформации КТВ в местную массу. Интересно, что по ее завершении 2/VII, когда в условиях малоградиентного поля и $(\partial T/\partial t)_a \approx 0$ понижение T_{cp} почти прекратилось, сформировавшийся КУВ сохранил по многим показателям значения, типичные для тропического воздуха: $T_{max} = 29^\circ\text{C}$; $T_{min} = 20^\circ\text{C}$; $a = 13\text{--}15 \text{ г/м}^3$; $q = 11\text{--}13 \text{ г/кг}$; $e = 18\text{--}21 \text{ гПа}$. Как видим, благодаря высокой инсоляции в середине лета трансформация КТВ даже на 56-й параллели не завершается окончательно. Другими словами, свойства местной массы, сформировавшейся здесь из тропического воздуха, занимают в это время промежуточное положение в классификации их типов. В последующие прохладные три недели в тылу атлантических циклонов произошло четыре вхождения МУВ и МАВ, которые быстро преобразовывались над прогретым материком в КУВ. Единственное вхождение КАВ на ЕТС 9–10/VII было представлено воздушной массой, частично трансформированной по температуре.

5) **Август** был близким к норме по T и влажностям. Вплоть до 6-го числа трижды отмечались не-

долгие (от 12 до 24 ч) вхождения свежего МАВ на периферии антициклона над Балтикой. При ослаблении меридиональных потоков значения e , q , а вскоре и D быстро становились переходными от МАВ к КУВ. Впоследствии ситуации застоев с частыми стационарными фронтами в малоподвижных депрессиях на фоне размытого барического поля (рис. 1, в) лишь дважды сменялись усилением зонального переноса и адвекцией МУВ. Застои воздуха вообще характерны для летнего сезона в Москве [2]. Интересно, что в конце августа при небольшой уже инсоляции МУВ трансформируется в местную массу очень медленно: потребовалось почти 60 ч нахождения Москвы на оси гребня 24–26/VIII; чтобы значения только q и a стали, наконец, выше типичных для морского воздуха в августе.

6) **Сентябрь** в этот год по температуре и количеству осадков почти точно соответствовал климатической норме. Вместе с тем он был крайне разнообразным с точки зрения синоптических условий. Дважды отмечались периоды господства КАВ, трижды – МАВ, четырежды – МУВ и КУВ.



Рис. 1. Фрагменты синоптических карт: а – карта AT_{850} за 12 ч 8 марта 1991 г., класс 1, КУВ; б – приземный анализ за 12 ч 28 июня 1991 г., класс 3, КТВ; в – приземный анализ за 6 ч 21 августа 1991 г., класс 2; г – приземный анализ за 7 сентября 1991 г. 6 ч, класс 4, КАВ. Москва показана звездочкой

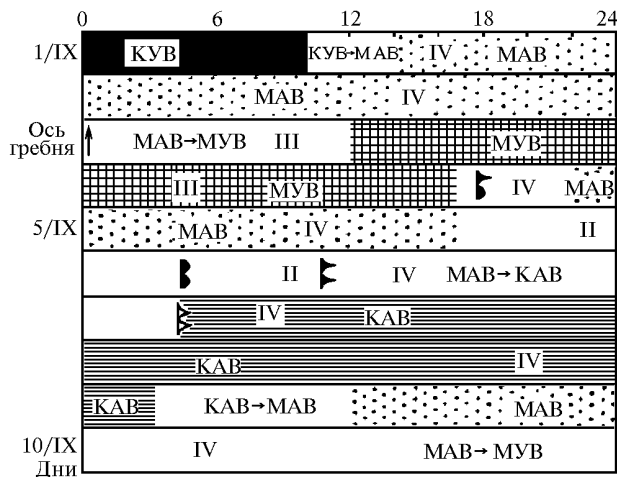


Рис. 2. Пример синоптического анализа с высоким временным разрешением за период с 1 по 10 сентября 1991 г. Римские цифры – обозначения классов синоптических ситуаций. Стрелка – ось гребня, обозначения атмосферных фронтов – стандартные

Анализ первых дней приведен на рис. 2. Вынос МАВ из р-на Гренландии и Норвежского моря происходил 1, 2-го и 5-го числа, а 3-го – МУВ в зональных потоках из Центральной Атлантики. Если тип последнего подтвердился всеми показателями, то первые две очень прозрачные и сухие массы были немного теплее обычного МАВ в сентябре. Заметим, что окончательная смена типа наступает в среднем полусутками позже установления соответствующей циркуляции у Земли. Так, основная ветвь арктического фронта прошла около полудня 6/IX. Но значения метеозлементов еще в полночь 7-го оставались в МГУ в лучшем случае переходными от морского воздуха к КАВ. Лишь к 6 ч резко падает от 9 до 6–7 гПа, q – от 5,9 до 3,9–4,7 г/кг, a – от 7,1 до 4,7–5,7 г/м³ в течение дня. Арктический тип этой массы, сформировавшейся прежде над Карским морем (рис. 1, з), однозначно подтверждается всеми показателями в последующие 45–48 ч.

В последние дни месяца почти на 90 ч установилась очень теплая воздушная масса $T_{cp} = 16–17^{\circ}\text{C}$ и T_{max} до 23°C , а также с исключительно высокими характеристиками влажности (e – до 15–17 гПа; q – до 10–11 г/кг) и низкой D . По совокупности показателей она определена как КТВ, хотя очаг ее не вполне ясен: на уровне 850 гПа вынос происходил из Восточного Средиземноморья, у Земли, возможно, из Ирана и Средней Азии по южной периферии антициклона с центром над Каспийским морем.

7) **Ноябрь** оказался теплее обычного на $2,2^{\circ}\text{C}$. Начало наблюдений пришлось на период трансформации КАВ в местную массу, выделенный здесь отдельно. Не считая его, а также трех недолгих вхождений КУВ с востока ЕТС, весь месяц был отмечен интенсивным западным и юго-западным переносом, т.е. господством воздуха средиземноморских и атлантических циклонов. К периодам с явным МУВ отнесены

18 полных и неполных суток, и данные именно этого типа статистически наиболее достоверны.

Результаты анализа

Рассмотрим их сперва в отдельные месяцы. Все расчеты в таблице приведены к равным долям для каждого часа суток. Итак, главная закономерность теплого времени года – более частая регистрация **конвективных содарных изображений** при господстве холодных воздушных масс и соответственно в условиях нулевой или холодной адвекции. Так, в июне–июле конвекция наблюдалась в 45–50% всех часов в классах 1 и 4, т.е. при господстве как местной, так и относительно холодной воздушной массы. Намного реже – лишь в каждом третьем случае – она отмечена в классах 3 и 5, т.е. в теплом КТВ. Эта закономерность в целом подтверждается и в сентябре. Особенности отдельных месяцев таковы:

1) В малоградиентном поле в августе конвекция развивалась даже чаще, чем при явной адвекции холода, а в середине лета и в сентябре классы 1 и 4 показали почти одинаково высокую ее повторяемость. При адвекции же тепла конвекция всегда отмечалась реже.

2) При рассмотрении воздушных масс конвекция наблюдалась в июне–июле почти одинаково часто в условиях как КУВ, так и холодных их типов; в августе и в сентябре – чаще в холодных арктических воздушных массах.

Реже всего конвекция отмечается летом в зонах стационарных фронтов (класс 2) с частыми осадками и сплошной облачностью нижнего яруса, т.е. когда отсутствует прогрев поверхности. Стратификация здесь обычно безразличная или слабоустойчивая.

В холодный период число часов с конвекцией всюду очень мало, и статистические выводы здесь ненадежны. Однако уже в марте видна та же закономерность: расположение как классов, так и типов масс от теплых к холодным совпадает с последовательным увеличением в них повторяемости конвективной стратификации. Заметим, что в марте МАВ уже холоднее КУВ – особенно после раннего в 1991 г. схода снежного покрова.

Что касается **приземных инверсий**, повторяемость их в теплые месяцы либо всюду близка, либо проявляет слабую обратную тенденцию по отношению к конвекции. Это видно при рассмотрении циркуляционных условий августа и сентября (приземные инверсии отмечались чаще при адвекции тепла), а также воздушных масс в июне–июле и в августе (чаще – в самых теплых массах). Однако реже всего приземные инверсии наблюдались не при адвекции холода, а в слабоградиентном барическом поле.

В холодные месяцы картина иная. Приземные инверсии отмечаются чаще при адвекции тепла (та же тенденция, что и летом, но лучше выраженная), а также если адвекции нет. В тылу циклонов повторяемость их всегда небольшая, а в январе и марте –

наименьшая из всех классов. Но это верно лишь до тех пор, пока подстилающая поверхность остается теплее приходящего воздуха. Как только вхождение завершается и холодная масса устанавливается над Москвой, повторяемость приземных инверсий в классе 1 резко возрастает на 20–25% по сравнению с классом 4.

При рассмотрении воздушных масс этот же эффект ярко виден на примере КАВ. Зимой его господство сопровождается обычно ясной, маловетренной и очень морозной погодой. Перенос же тепла из глубоких слоев почвы к поверхности слабый из-за малой теплопроводности снега. В результате поверхность снега сильно выхолаживается и образуются исключительно устойчивые приземные инверсии, существующие порой по двое–трое суток кряду. Поэтому повторяемость их в самых холодных массах составляет зимой 75–80 и даже 94% в марте. Именно в этом эффекте ярче всего проявляется влияние синоптических условий в холодное время года.

Закономерности **приподнятых инверсий** более сложные, что связано с многообразием их происхождения. В целом они больше зависят от действия динамических причин. Так, в холодный период приподнятые инверсии чаще отмечались в области центра антициклона или оси гребня (класс 1), очевидно, за счет частых при этом инверсий оседания. Кроме того, повторяемость приподнятых инверсий при теплой адвекции выше, чем при холодной. Влияние адвективных условий здесь косвенное и проявляется,

по-видимому, через увеличение числа инверсий, связанных с границами слоя тумана и облаков St, типичных при теплых вхождениях.

Летом приподнятые инверсии наблюдаются почти одинаково часто как при теплой, так и при холодной адвекции. Повторяемость их наибольшая в зонах стационарных фронтов – как за счет собственно фронтальных инверсий на поверхностях раздела воздушных масс, так и вследствие более частых здесь надоблачных и подоблачных инверсий.

Обратимся теперь к общим результатам, усредненным отдельно для теплого и холодного времени года (рис. 3). При этом исключаются случайности, связанные с недостаточной статистической обеспеченностью некоторых месячных выборок. Но и особенности условий отдельных месяцев также теряются при таком подходе. Как видим, расположение типов воздушных масс в ряд от теплых к холодным совпадает с последовательным возрастанием в них с ноября по март доли приземных инверсий (горизонтальная штриховка: от 49% в МУВ до 82% в КАВ); а с июня по сентябрь – конвекции (точки: от 22% в КТВ до 33% в КАВ). Итак, обе главные закономерности ярко проявились при усреднении. Различий в повторяемости приземных инверсий в целом за теплый период не видно. Приподнятые же инверсии чаще всего отмечены в самом теплом с ноября по март морском полярном воздухе – 33%. В остальных типах воздушных масс их повторяемость за 4 месяца составила лишь 15–20%.

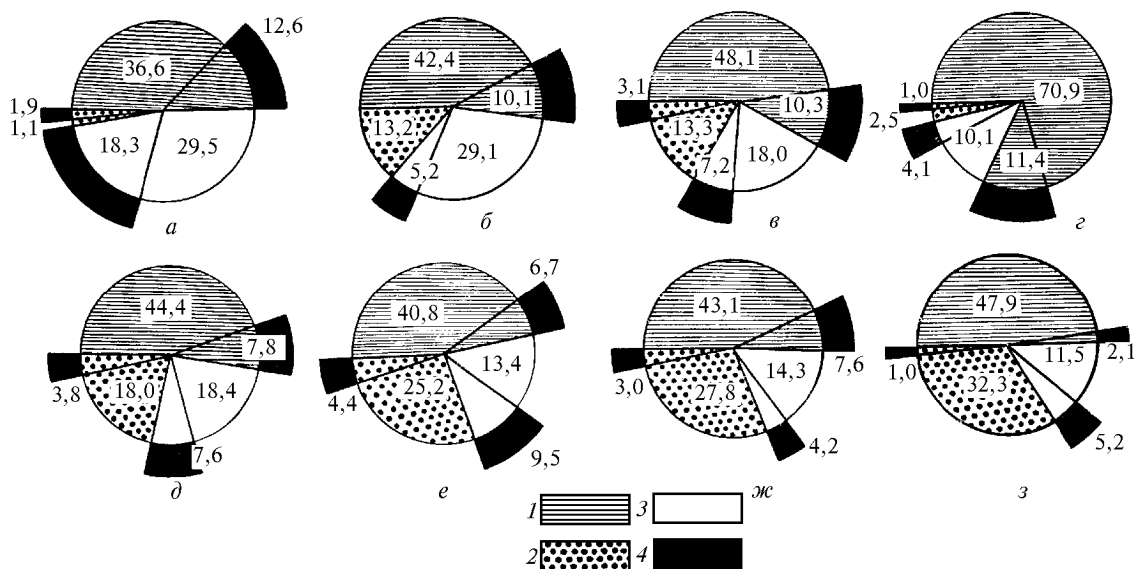


Рис. 3. Повторяемость типов стратификации температуры в Москве в часы господства различных воздушных масс: а – холодный период (с 3 января по 31 марта и со 2 по 30 ноября 1991 г.); б – теплый период (с 24 июня по 25 июля и с 29 июля по 30 сентября 1991 г.). Обозначения типов воздушных масс: а – слева направо: 1 – МУВ, 2 – МАВ, 3 – КУВ, 4 – КАВ; б – слева направо: 5 – КТВ, 6 – КУВ, 7 – МУВ и МАВ (здесь – вместе), 8 – КАВ. Горизонтальная штриховка – приземные инверсии, черные спектры – приподнятые инверсии, точки – термическая конвекция, светлые секторы – слабоустойчивая или безразличная стратификация. Цифры даны в %

Суточный ход повторяемости приземных инверсий в холодный период и конвекции в теплый приведен на рис. 4. Как видим, частое наблюдение приземных инверсий при господстве КАВ зимой связано в основном со светлым временем суток: ночью их повторяемость здесь ненамного выше, чем в других воздушных массах. Конвекция летом в морских и в местных массах развивается чаще по сравнению с тропическим воздухом за счет утренних и, особенно, вечерних часов. В континентальном арктическом воздухе повторяемость ее еще выше даже в середине дня.

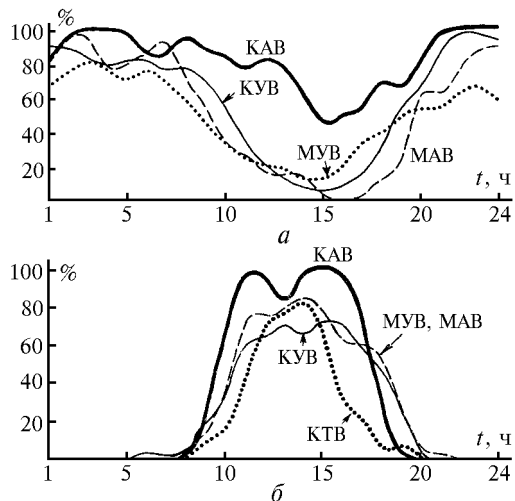


Рис. 4. Суточный ход повторяемости видов температурной стратификации в условиях различных типов воздушных масс. *a* – общая повторяемость приземных инверсий (как одиночных, так и прикрытых приподнятыми в холодный период года). Обозначения кривых: жирные сплошные – КАВ, тонкая сплошная – КУВ, точки – МУВ, штрихи – МАВ; *б* – повторяемость конвекции в отсутствие приподнятых инверсионных слоев до высоты 800 м в теплый период года. Обозначения кривых: жирная сплошная – КАВ, тонкая сплошная – КУВ, точки – КТВ, штрихи – МУВ, МАВ (здесь – вместе)

Выводы

Итак, синоптические условия заметно влияют на режим температурной стратификации в Москве. Летом при холодной адвекции и в холодных воздушных массах термическая конвекция развивается чаще (в основном за счет утренних и вечерних часов, днем различия выражены слабее). Что касается повторяемости приземных инверсий, то синоптических закономерностей здесь в теплый период не видно. Это результат неожиданный и требующий дальнейшего осмысления. По-видимому, причина кроется в нали-

чии ярко выраженного суточного хода, на фоне которого адвективные процессы оказываются слишком слабыми, чтобы заметно повлиять на время жизни ночных приземных инверсий.

Зимой приземные инверсии регистрировались тем чаще, чем холоднее была воздушная масса, установившаяся над Москвой. При этом в часы собственно вхождения холодного воздуха они оказывались сравнительно редкими. Наконец, приподнятые инверсии в слое 800 м наблюдаются всегда чаще в малоградиентном поле с высоким фоном давления, а зимой и поздней осенью также и в морском полярном воздухе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 97-05-65697.

1. Алисов Б.П. Климатические области и районы СССР. М.: ОГИЗ, Географгиз, 1947.
2. Алисов Б.П. Особенности климата Московского района. Вопросы географии. М.: ОГИЗ, Географгиз, 1948. Сб. 7. С. 101–122.
3. Алисов Б.П., Сорокина В.Н. Некоторые динамические характеристики климата Москвы // Метеорология и гидрология. 1965. № 11. С. 14–21.
4. Алисов Б.П., Сорокина В.Н., Мячкова Н.А. Погода как климатическая характеристика // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1971. № 2. С. 25–32.
5. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1977.
6. Кричак О.Г. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1956.
7. Локощенко М.А. Исследование приземных инверсий методом акустического зондирования // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 54–65.
8. Локощенко М.А. Применение вертикальных содаров в метеорологии (обзор) // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 7. С. 970–992.
9. Локощенко М.А., Семенченко Б.А., Каллистратова М.А., Пекур М.С. О связи с синоптическими условиями высоты слоя перемешивания // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 7. С. 976–985.
10. Мячкова Н.А. Географические особенности адвекции воздушных масс и формирование климата // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1979. № 5. С. 23–28.
11. Мячкова Н.А., Сорокина В.Н. Циркуляция атмосферы, адвективные особенности погоды // Климатические ресурсы и их прикладное использование. М.: МГУ, 1989. С. 27–37.
12. Пекур М.С. Предварительные результаты содарных исследований АПС над Москвой // Препринт ИФА. М., 1990. № 7. Ч. 1. С. 62–71.
13. Сенькин Л.Р. Синоптические условия формирования инверсий в нижнем 500-метровом слое // Труды ГГО. Л.: ГМИ, 1965. Вып. 172. С. 79–85.
14. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: ГМИ, 1948.
15. Lokoshchenko M.A. Influence of synoptical processes on thermal structure of the atmospheric boundary layer // Proc. 8-th Int. Symp. Acoustic Remote Sensing Atmos. and Oceans. Moscow, Russia, 1996.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
22 сентября 1997 г.

M.A. Lokoshchenko. Use of Sodar Sounding in Study of Synoptic Conditions Influence on Temperature Stratification.

The influence of synoptic conditions on stratification of low 800-meter air layer over Moscow is studied. The hourly data obtained during uninterrupted sodar sounding for 7 months are used. The method of parallel analysis of basic field and geographic type of the prevailing air mass (when the latter is determined uniquely) is proposed. The peculiarity of the analysis is in high temporal discreteness (up to 2–3 hour accuracy), which allowed us to study for the first time in details the short-term variations of the temperature stratifications. The peculiarities of the air masses monthly transformation over Moscow city are also under discussion.