

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

### Изменение приземной концентрации озона при выпадении осадков

В.Г. Аршинова<sup>1</sup>, Б.Д. Белан<sup>1</sup>, В.А. Лапченко<sup>2</sup>, Е.В. Лапченко<sup>2</sup>,  
Т.М. Рассказчикова<sup>1</sup>, Д.Е. Савкин<sup>1</sup>, Т.К. Скляднева<sup>1</sup>,  
Г.Н. Толмачев<sup>1</sup>, А.В. Фофонов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН  
298188, г. Феодосия, пгт Курортное, ул. Науки, 24, Республика Крым

Поступила в редакцию 23.03.2019 г.

В работе по данным мониторинга озона в приземном слое воздуха в г. Томске и на Карадаге исследуется изменение его концентрации при выпадении осадков. Выявлено, что эти изменения могут быть как положительными, так и отрицательными. Наибольшие скачки содержания озона наблюдаются при выпадении фронтальных осадков. В случае внутримассовых осадков знак и величину изменения определяет суточный ход концентрации озона. Анализ показал совпадение роста концентрации озона в осадках с его увеличением в суточном ходе в 59% случаев в Томске и в 63% – на Карадаге. Совпадение волны падения концентрации в суточном ходе с ее уменьшением в осадках еще выше – 85% в Томске и 79% на Карадаге. На основе данных самолетного зондирования показано, что в ряде случаев наблюдается оседание озона из пограничного слоя при переходе температурной стратификации в осадках к нейтральной.

*Ключевые слова:* атмосфера, газ, воздух, вымывание, озон, осадки, примеси, удаление; atmosphere, gas, air, washout, ozone, precipitation, impurity, removal.

#### Введение

Озон, относящийся к малым газовым примесям воздуха, не выбрасывается природными и антропогенными источниками, а образуется непосредственно в атмосфере в ходе фотохимических процессов из газов-предшественников. Многообразие газов-предшественников и сложность механизмов генерации озона определяет фундаментальное значение его исследований. А их практическая необходимость обусловлена свойствами озона, например тем, что он – сильнейший окислитель, оказывающий разрушающее действие на объекты окружающей среды, в больших концентрациях – яд, отравляющий биосферу, радиационно активный газ, вносящий четвертый по значимости вклад в парниковый эффект.

Озон относится к наиболее изучаемым примесям воздуха: на эту тему публикуются тысячи работ. Тем не менее многие фундаментальные вопросы его

образования и трансформации в атмосфере остаются мало или даже недостаточно изученными.

В обзоре [1], составленном международной группой ученых, отмечается, что вариации содержания озона в тропосфере определяются в основном его поступлением из стратосферы и фотохимическим образованием из газов-предшественников в зависимости от их состава и концентрации, притоком солнечной радиации и метеорологическими факторами. Одним из малоизученных метеорологических факторов, воздействующих на приземную концентрацию озона, являются осадки.

Процесс взаимодействия озона и осадков был рассмотрен теоретически в [2]. Анализировались два варианта: адсорбция молекул газа на поверхность частицы и химическая реакция с ее поверхностью. Сведений о проверке этих теорий в литературе найти не удалось, однако имеются косвенные указания на возможность связи между осадками и озоном. Так, в ряде работ показано, что в муссонный период концентрация озона уменьшается в 2 раза [3–6]. Осадки входят в статистические прогностические модели озона в качестве предиктора [7, 8]. Самые большие концентрации озона наблюдаются при минимальном количестве осадков [9]. По данным самолетных измерений в облаках [10], содержание озона при их пересечении немного уменьшается (3–4 млрд<sup>-1</sup>). По результатам наших измерений концентрация озона в облаках уменьшается в среднем

\* Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Владимир Александрович Лапченко (ozon.karadag@gmail.com); Елена Витальевна Лапченко (ozon.karadag@gmail.com); Татьяна Михайловна Рассказчикова (gtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (densavkin88@rambler.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

на 15 млрд<sup>-1</sup> [11]. В работах [12, 13] получены промежуточные по отношению к [10, 11] значения. Имеются публикации, в которых показано, что осадки слабо влияют на концентрацию озона [14, 15].

Таким образом, в настоящее время нет единого представления о воздействии осадков на приземную концентрацию озона, поэтому цель настоящей работы — анализ наличия или отсутствия изменений содержания O<sub>3</sub> при выпадении осадков.

## Данные и районы исследования

Для исследования использовались данные мониторинга состава воздуха в районе томского Академгородка с помощью TOR-станции, расположение и современное состояние измерительного комплекса которой описаны ранее в [16], и данные станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) «Карадаг» (44°55' с.ш., 35°14' в.д., 180 м над ур. м.) ФГБУН «КНС-ПЗ РАН». На СФЭМ до 20 марта 2013 г. измерение озона проводилось хемиллюминесцентным методом с помощью автоматического газоанализатора 3.02П-А (ОПТЕК, Россия). С указанного момента по настоящее время мониторинг осуществляется оптическим методом газоанализатором АРОА-370 (HORIBA, Япон). Отбор проб производится с использованием тefлоновых трубок на высоте 2 м от поверхности земли. Для анализа привле-

кались метеорологические данные, полученные с помощью метеостанции WS-600 (Germany).

В работе использовались результаты измерений за 2013 и 2018 гг., когда в Томске наблюдались минимальные и максимальные за последнее десятилетие среднегодовые значения озона. Для синхронности сопоставления данные за эти же годы взяты для Карадага. Поскольку целью работы является выявление физического механизма взаимодействия озона с осадками, выбор периода не принципиален, так как механизм должен проявляться независимо от периода и географического положения пунктов измерений.

## Результаты анализа и их обсуждение

Для исследования были отобраны дни с осадками и проведен анализ изменения приземной концентрации озона в период их выпадения. Выявлено, что независимо от вида осадков содержание озона может как уменьшаться, так и возрастать. На рис. 1 показаны конкретные случаи для г. Томска и Карадага.

На рис. 1, *а, б* видно, что в период выпадения осадков приземная концентрация озона уменьшилась на 24 и 12 мкг/м<sup>3</sup> в Томске и на Карадаге соответственно. На рис. 1, *в* показан рост концентрации озона на 6 мкг/м<sup>3</sup> во время осадков в Томске.

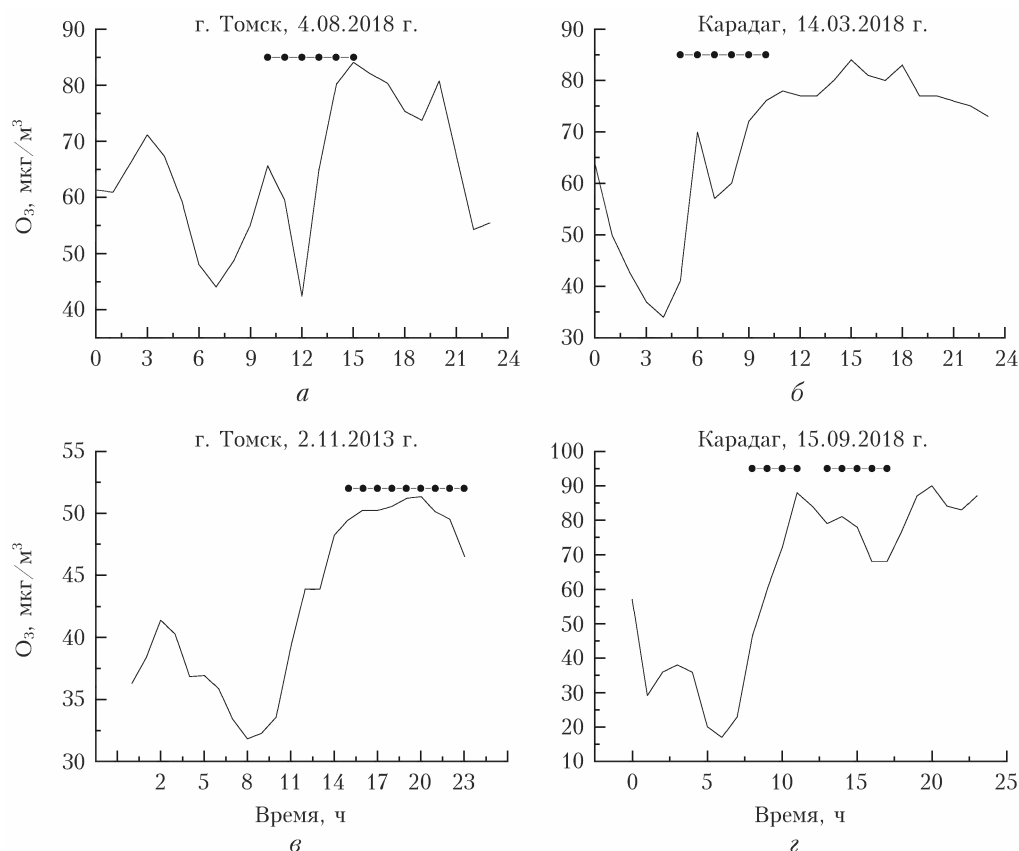


Рис. 1. Изменения приземной концентрации озона в Томске (*а, в*) и на Карадаге (*б, г*); горизонтальной линией с точками показаны периоды выпадения осадков

На Карадаге 15 сентября 2018 г. (рис. 1, з) дождь шел с перерывом, при этом во время первого дождя концентрация озона возросла на 28 мкг/м<sup>3</sup>, второго — упала на 16 мкг/м<sup>3</sup>.

Анализ показал, что интенсивность, вид и продолжительность осадков не влияют на изменение концентрации озона (рис. 2).

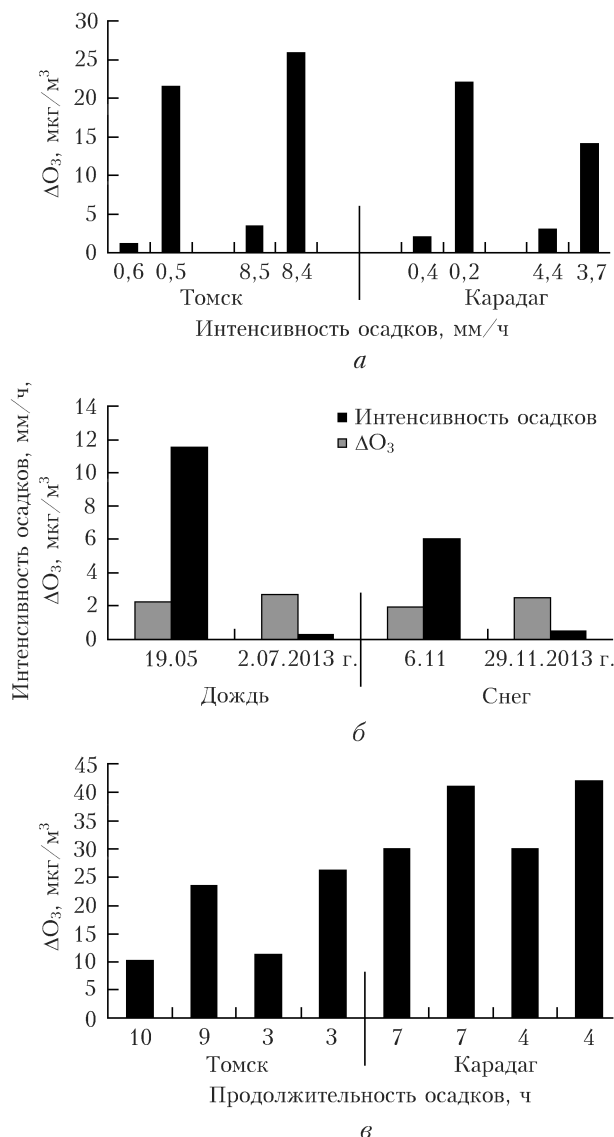


Рис. 2. Изменение приземной концентрации озона в Томске и на Карадаге в зависимости от интенсивности (а), вида (б) и продолжительности осадков (в)

Для построения рис. 2, а использованы данные за 16 и 29 мая, 3 июня и 3 сентября 2013 г. для Томска, 12 февраля, 3 марта, 28 июля и 2 октября 2018 г. для Карадага. Видно, что при интенсивности осадков 0,6 и 0,5 мм/ч в Томске концентрация озона может измениться на 1,2 и 21,5 мкг/м<sup>3</sup> соответственно, при интенсивности 8,5 и 8,4 мм/ч — на 3,4 и 25,8 мкг/м<sup>3</sup>. Такая же неоднозначная картина фиксируется на Карадаге: при малой интенсивности осадков (0,4 и 0,2 мм/ч) изменения озона могут составлять 2,0 и 22,0 мкг/м<sup>3</sup>, увеличение интенсивно-

сти до 4,4 и 3,7 мм/ч может сопровождаться изменением концентрации как на 3,0, так и на 14,0 мкг/м<sup>3</sup>. Таким образом, на рис. 2, а не выявлено однозначной связи между изменением концентрации озона и интенсивностью осадков.

Для сопоставления величины изменения концентрации озона в дожде и снеге были отобраны случаи с приблизительно одинаковой интенсивностью осадков в Томске (рис. 2, б). Для Карадага эту процедуру провести не удалось из-за небольшого количества случаев выпадения снега. Показано, что однозначной зависимости концентрации озона ни от вида осадков, ни от их интенсивности не наблюдается. Разницу между концентрацией озона в дожде и снеге можно объяснить особенностями годового хода озона, у которого максимум обычно фиксируется весной — летом, а минимум в конце осени — начале зимы [17].

Не удается также обнаружить какой-либо зависимости вариаций содержания озона в приземном слое воздуха от продолжительности осадков на рис. 2, в. Для его построения использованы данные за 23 апреля, 11 июня, 25 августа, 2 ноября 2018 г. для Томска и за 8 мая, 6 июля, 15 сентября и 2 октября 2018 г. для Карадага. Отметим, что на Карадаге изменения концентрации озона в осадках несколько выше. Это может быть обусловлено географическими особенностями регионов.

В 2013 г. в г. Томске было зафиксировано 115 дней с осадками, а в 2018 г. — 88 (табл. 1). На Карадаге количество дней с осадками меньше: 54 в 2013 г. и 57 в 2018 г. В табл. 1 посчитано количество случаев с осадками, при которых наблюдалось увеличение или уменьшение концентрации озона.

Таблица 1

**Повторяемость случаев роста и падения концентрации озона в Томске и на Карадаге**

Район	Год	Рост	Падение	Всего
Томск	2013	45	70	115
	2018	31	57	88
Карадаг	2013	19	35	54
	2018	24	33	57

Из данных табл. 1 следует, что и в Томске, и на Карадаге падение концентрации озона в период осадков наблюдается чаще, чем рост. Можно предположить, что при осадках более вероятно очищение атмосферы от озона.

На зафиксированной несимметричности остановаемся чуть ниже. Здесь же отметим, что вымывание озона вряд ли возможно, так как этот газ относится к плохо растворимым в воде [18, 19]. По-видимому, изменение концентрации озона происходит под действием иных механизмов.

Анализ динамики концентрации озона при прохождении фронтов [20] показывает, что появление осадков приводит как к уменьшению, так и к увеличению концентрации озона в среднем на 30%. Этот эффект был обнаружен и другими исследователями [21–24]. При этом, как показано в [25], содержание озона внутри воздушной массы достаточно однородно, а скачок концентрации происходит при смене

масс. Рост или падение концентрации зависит от того, какая воздушная масса приходит на смену предыдущей в месте наблюдений. Анализ [25] выявил, что в районе Томска наибольшая концентрация озона наблюдается в тропической воздушной массе, наименьшая — в арктической, следовательно, при смене умеренной воздушной массы на арктическую происходит уменьшение концентрации и наоборот. Важно подчеркнуть, что описанная выше схема в реальной атмосфере работает не всегда. Как отмечал еще С.П. Хромов в [26], фронты могут сильно различаться между собой, в них по-разному формируется поле вертикальных движений, поэтому в 20–25% случаев наблюдаются отклонения от идеальной схемы, обусловленные особенностями динамических процессов во фронтальных зонах [20, 27]. Поэтому мы исключили случаи с фронтальными осадками из рассмотрения.

Это, с одной стороны, уменьшило общую статистику. С другой стороны, при внутримассовых осадках асимметрия повторяемости роста и падения приземной концентрации озона в период их прохождения не изменилась, что свидетельствует об ином механизме изменения содержания  $O_3$  в осадках. По нашему мнению, таким механизмом может быть суточный ход приземной концентрации озона, хорошо выраженный в обоих рассматриваемых регионах [28–30].

С целью проверки этого предположения все случаи внутримассовых осадков были разделены на

две группы. К первой отнесли осадки, наблюдаемые на волне роста концентрации озона в суточном ходе, ко второй — на волне падения. Согласно [28] волна роста концентрации  $O_3$  в Томске наблюдается с 9:00 до 16:00 по местному времени в холодный период и до 18:00 в теплый, а волна падения — с 17:00 до 8:00 часов в холодный период и с 19:00 до 8:00 в теплый. На Карадаге [29, 30] волна роста наблюдается с 9:00 до 18:00 по местному времени, а падения — с 19:00 до 8:00.

Такое разделение существенно изменило соотношение повторяемости роста и падения концентрации озона при выпадении осадков, хотя и не со 100% результатом. Об этом можно судить по данным рис. 3.

На рис. 3, *а*, *б* видно, что во время осадков, наблюдаемых на волне падения концентрации озона в суточном ходе, фиксируется уменьшение содержания озона как в Томске, так и на Карадаге. Согласно рис. 3, *в*, *г* рост концентрации озона в осадках может происходить на той же волне падения в суточном ходе.

Результаты анализа по всем случаям представлены в табл. 2. Надо отметить, что из-за малой остаточной статистики разбиение по годам не проводилось.

Данные табл. 2 демонстрируют совпадение увеличения концентрации озона при выпадении осадков с ее ростом в суточном ходе в 59% случаев в Томске и в 63% случаев на Карадаге. Совпадение на волне падения концентрации в суточном ходе с ее уменьшением во время осадков еще выше — 85%

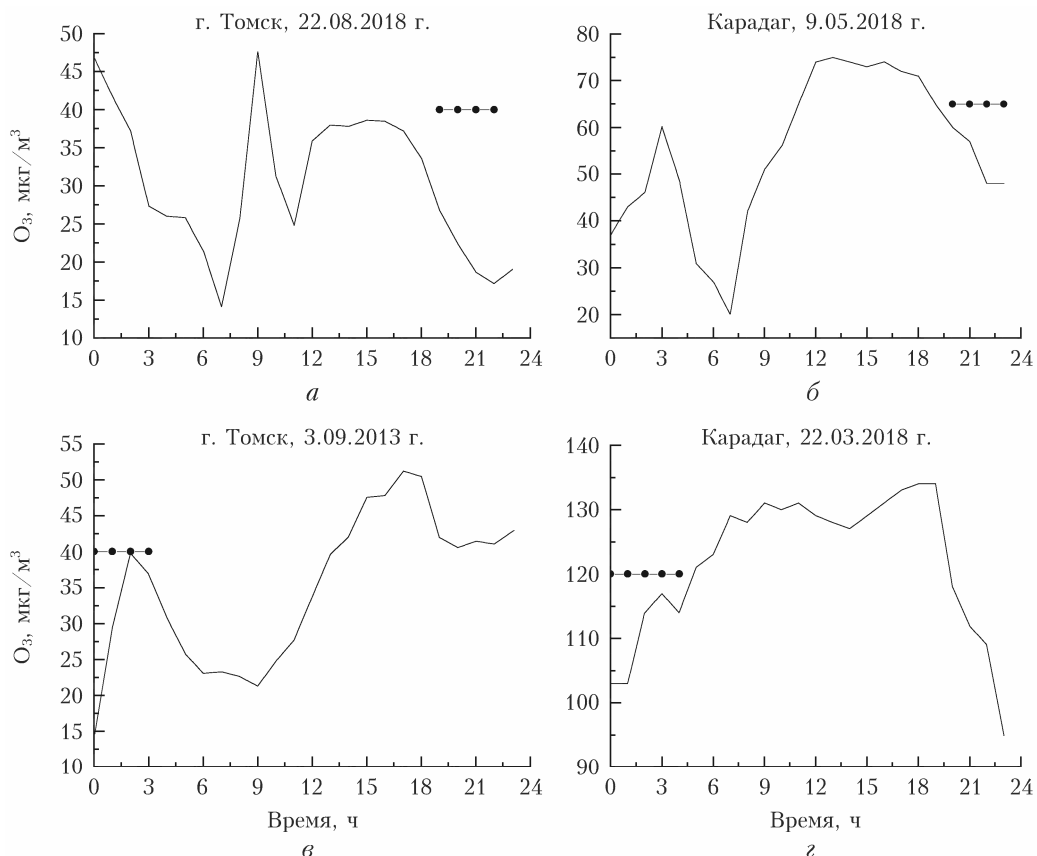


Рис. 3. Изменение приземной концентрации озона в Томске (*а*, *в*) и на Карадаге (*б*, *г*) во время внутримассовых осадков (горизонтальная линия с точками)

Таблица 2

**Повторяемость случаев увеличения и уменьшения концентрации озона при выпадении осадков на волнах роста и падения концентрации  $O_3$  в суточном ходе в Томске и на Карадаге**

Район	Увеличение	Уменьшение	Всего случаев (100%)
	концентрации $O_3$ , число случаев (%)		
<i>Волна роста</i>			
Томск	17 (59)	12 (41)	29
Карадаг	12 (63)	7 (37)	19
<i>Волна падения</i>			
Томск	7 (15)	39 (85)	46
Карадаг	4 (21)	15 (79)	19

в Томске и 79% на Карадаге. Эти показатели можно было бы улучшить за счет индивидуального отбора и сдвига периодов падения и роста концентрации  $O_3$  в суточном ходе, однако при этом неизбежно влияние субъективного фактора, поэтому был сохранен формальный подход.

Таким образом, определяющим фактором изменения концентрации озона во время внутримассовых осадков является период их выпадения. Если осадки наблюдаются на волне роста концентрации озона в суточном ходе, то в большинстве случаев фиксируется и рост содержания озона в приземном слое во время осадков. Если дождь или снег совпадает по времени с волной падения концентрации в суточном ходе, то в основном наблюдается уменьшение содержания  $O_3$ .

Такой результат позволяет объяснить и асимметричность повторяемости случаев роста и падения концентрации озона во время осадков. Он отражает время выпадения осадков относительно суточного хода озона. Так, период роста концентрации озона в суточном ходе составляет 7–9 ч в зависимости от времени года или региона, а период падения – 13–15 ч. Если вероятность выпадения осадков одинакова в любое время суток, то повторяемость их выпадения на волне снижения концентрации озона в суточном ходе будет значительно выше из-за большей длительности этого периода. Это и было отмечено в начале статьи.

Из приведенных выше данных следует, что в 15–40% случаев наблюдается отклонение изменения концентрации  $O_3$  во время осадков от описанного механизма. Скорее всего, это обусловлено тем, что в суточном ходе максимум фотохимического образования озона не всегда наблюдается у поверхности земли. В [31, 32] было теоретически показано, что максимум фотохимической генерации  $O_3$  должен наблюдаться внутри пограничного слоя на высоте, достигаемой озонобразующими соединениями, поступающими с поверхности. Экспериментально это было подтверждено в [33–35].

В осадках падающая капля или снежинка захватывает некоторую порцию воздуха и доставляет ее к поверхности земли [36]. Взамен поступает воздух из нижележащих слоев. В результате такого динамического процесса происходит выравнивание концентрации примесей по вертикали, а также тем-

пературной стратификации [37, 38]. В ходе этого процесса растворимые газы и аэрозоль выводятся из атмосферы, тем самым очищая ее [39–41]. Нерастворимые газы переносятся либо вверх, либо вниз. Так, в [42] показано, что в подоблачный слой поступает оксид углерода, а в приземный слой – озон, если его концентрация в пограничном слое выше.

Покажем это на примере данных самолетного зондирования, выполненного по маршруту Мирный–Ленск–Братск 8 сентября 2006 г. Использованное оборудование описано в [43]. Синоптическая обстановка в период эксперимента показана на рис. 4 (цв. вкладка), данные вертикальной стратификации представлены на рис. 5.

Взлет из г. Мирный осуществлялся в умеренной воздушной массе, посадка в г. Ленске – в арктической перед приближающимся теплым фронтом. Осадков во время посадки не наблюдалось. За 1 час до вылета начался моросящий дождь, взлет производился в осадках средней интенсивности. После пересечения теплого фронта была сделана посадка в Братске.

Профили температуры и относительной влажности на рис. 5 отражают характер их распределения в пунктах взлета и посадки.

На рис. 5, а видно, что при посадке в г. Ленске в нижнем 400-метровом слое воздуха температурная стратификация атмосферы была неустойчивая,

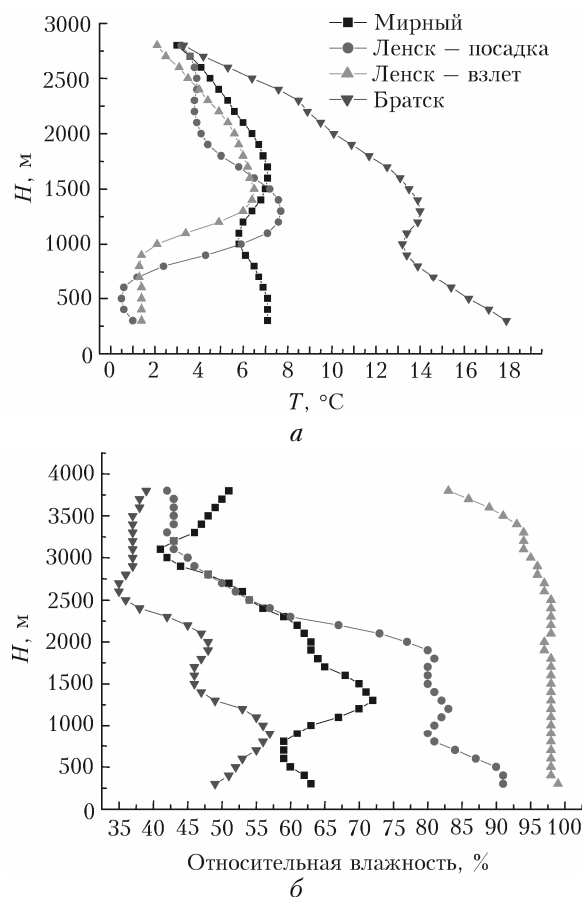


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры (а) и относительной влажности воздуха (б) 8 сентября 2006 г.

а выше атмосферы — устойчивая. Во время взлета температурная стратификация в слое от 200 до 1000 м стала нейтральной, что подтверждает результаты, полученные в работах [37, 38]. Нижняя кромка облаков находилась на уровне 850 м, верхняя — около 3000 м. Это можно увидеть на рис. 5, б.

Как при этом изменялась концентрация озона, видно на рис. 6. При посадке концентрация озона

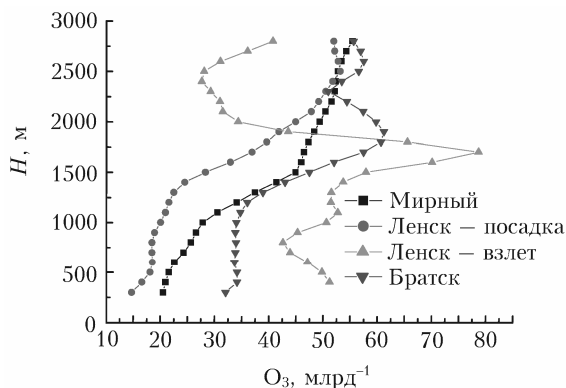


Рис. 6. Вертикальное распределение концентрации озона 8 сентября 2006 г.

в атмосфере г. Ленска была ниже, чем в соседних городах. Во время взлета она значительно возросла как в приземном воздухе, так и в подоблачном слое, и в результате образовался максимум концентрации на уровне 1700 м внутри облака. В условиях нейтральной температурной стратификации и интенсивного динамического перемешивания, создавшегося при падении капель дождя, озон поступил в приземный слой воздуха.

Подобный процесс был зафиксирован и на территории Амазонки [44]. В одном эпизоде, как и в нашем случае, он сопровождался ростом концентрации озона, во втором — падением.

### Заключение

Проведенное исследование показывает, что при атмосферных осадках может происходить рост и падение приземной концентрации озона независимо от их вида, интенсивности, продолжительности и района измерений.

Наибольшие изменения связаны с фронтальными осадками и отражают «скачок» концентраций озона при смене воздушных масс.

Во внутримассовых осадках знак изменения содержания озона зависит от периода суток, в который они выпадают. Если осадки наблюдаются на волне роста концентрации  $O_3$  в суточном ходе, то в большинстве случаев содержание озона увеличивается. Если же осадки приходятся на волну падения концентрации  $O_3$  в суточном ходе, то содержание озона уменьшается.

При изменении стратификации пограничного слоя атмосферы в период осадков могут наблюдаться рост и падение концентрации озона в зависимости от того, на какой высоте она больше.

Процесс вымывания озона осадками выявить не удалось.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН за данные проведенного ими мониторинга и сотрудникам станции фонового экологического мониторинга ФГБУН «КНС-ПЗ РАН» Д.Н. Давидовичу, Л.А. Столярову, В.Г. Медведеву и А.Н. Родионову за обеспечение устойчивой работы приборов и участие в сборе первичной информации, а также В.П. Горбатенко (ТГУ), И.Н. Кузнецовой (Гидрометеоцентр РФ) и С.В. Смирнову (ИМКЭС СО РАН) за помощь в получении архивной метеорологической и синоптической информации.

Мониторинг состава воздуха выполнен в рамках государственных заданий ИОА СО РАН (№ АААА-А17-117021310142-5) и ФГБУН «КНС-ПЗ РАН» (№ АААА-А19-119012490044-3) при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00374).

1. Monks P.S., Archibald A.T., Colette A., Cooper O., Coyle M., Derwent R., Fowler D., Granier C., Law K.S., Mills G.E., Stevenson D.S., Tarasova O., Thouret V., von Schneidmesser E., Sommariva R., Wild O., Williams M.L. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 15. P. 8889–8973.
2. Хайклин Дж. Выведение газов из атмосферы аэрозольными частицами // *Гетерогенная химия атмосферы*. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 171–182.
3. Nair P.R., David L.M., Aryasree A., George K.S. Distribution of ozone in the marine boundary layer of Arabian Sea prior to monsoon: Prevailing airmass and effect of aerosols // *Atmos Environ.* 2013. V. 74. P. 18–28.
4. Gopal K.R., Lingaswamy A.P., Arafath S.M., Balakrishnaiah G.S., Kumari P., Devi K.U., Reddy N.S.K., Reddy K.R.O., Reddy R.R., Azeem P.A., Lal S. Seasonal heterogeneity in ozone and its precursors (NOx) by in-situ and model observations on semi-arid station in Anantapur (A.P), South India // *Atmos. Environ.* 2014. V. 84. P. 294–306.
5. Bela M.M., Longo K.M., Freitas S.R., Moreira D.S., Beck V., Wofsy S.C., Gerbig C., Wiedemann K., Andreae M.O., Artaxo P. Ozone production and transport over the Amazon Basin during the dry-to-wet and wet-to-dry transition seasons // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 2. P. 757–782.
6. Gunthe S.S., Beig G., Sahu L.K. Study of relationship between daily maxima in ozone and temperature in an urban site in India // *Curr. Sci.* 2016. V. 110, N 10. P. 1994–1999.
7. Liu P.-W.G., Tsai J.-H., Lai H.C., Tsai D.-M., Li L.-W. Establishing multiple regression models for ozone sensitivity analysis to temperature variation in Taiwan // *Atmos. Environ.* 2013. V. 79. P. 225–235.
8. Balashov N.V., Thompson A.M., Piketh S.J., Langerman K.E. Surface ozone variability and trends over the South African Highveld from 1990 to 2007 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119, N 7. P. 4323–4342.
9. Toh Y.Y., Lim S.F., von Glasow R. The influence of meteorological factors and biomass burning on surface ozone concentrations at Tanah Rata, Malaysia // *Atmos. Environ.* 2013. V. 70. P. 435–446.
10. Wang Z., Sassen K. Ozone destruction in continental status clouds: An aircraft case study // *J. Appl. Meteorol.* 2000. V. 39, N 6. P. 875–886.

11. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Масштаб деструкции тропосферного озона в облаках // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 43–46; *Arshinov M.Yu., Belan B.D., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* The scale of tropospheric ozone destruction in clouds // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 2. P. 106–110.
12. *Jacob D.* Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 12–14. P. 2131–2159.
13. *Reichardt J., Ansmann A., Serwazi M., Weitkamp C., Michaelis W.* Unexpectedly low ozone concentration in midlatitude tropospheric ice clouds: A case study // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23, N 15. P. 1929–1932.
14. *Tawfik A.B., Steiner A.L.* A proposed physical mechanism for ozone-meteorology correlations using land-atmosphere coupling regimes // Atmos. Environ. 2013. V. 72. P. 50–59.
15. *Melkonyan A., Wagner P.* Ozone and its projection in regard to climate change // Atmos. Environ. 2013. V. 67. P. 287–295.
16. *Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Ахлестич А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В.* Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; *Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlyostin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V.* Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.
17. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
18. *Лушин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
19. *Коган В.Б., Фридман В.Н., Кофаров В.В.* Справочник по растворимости, 1961. Т. 1, кн. 1. 380 с.
20. *Аришинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Рогов А.Н., Толмачев Г.Н.* Изменение концентрации озона в приземном слое воздуха при прохождении атмосферных фронтов // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 4. С. 625–631.
21. *Блюм О.Б., Будаг І.В., Дячук В.А., Сосонкін М.Г., Шаврина А.В.* Приземный озон у Києві, умови його утворення і стоку // Наук. Праці УкрНДГМІ. 2002. Вип. 250. С. 68–76.
22. *Ojha N., Naja M., Singh K.P., Sarangi T., Kumar R., Lal S., Lawrence M.G., Butler T.M., Chandola H.C.* Variabilities in ozone at a semi-urban site in the Indo-Gangetic Plain region: Association with the meteorology and regional processes // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, N D20301. DOI: 10.1029/2012JD017716.
23. *Oyola O.I., Schneider A., Campbell J., Joseph E.* Meteorological influences on tropospheric ozone over suburban Washington, DC // Aerosol Air Qual. Res. 2018. V. 18, N 5. P. 1168–1182.
24. *Wang H., Lyu X., Guo H., Wang Y., Zou S., Ling Z., Wang X., Jiang F., Zeren Y., Pan W., Huang X., Shen J.* Ozone pollution around a coastal region of South China Sea: Interaction between marine and continental air // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18, N 6. P. 4277–4295.
25. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Исследование состава воздуха в различных воздушных массах // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 752–759; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Study of the composition of air masses of different types // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 72–79.
26. *Хромов С.П.* Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 700 с.
27. *Белан Б.Д., Заде Г.О., Плотников А.П., Рассказчикова Т.М., Скляднева Т.К.* Изменение состава воздуха при прохождении атмосферных фронтов // Метеорол. и гидрол. 1999. № 11. С. 34–39.
28. *Белан Б.Д., Скляднева Т.К.* Суточный ход концентрации приземного озона в районе г. Томска // Метеорол. и гидрол. 2001. № 5. С. 50–60.
29. *Лапченко В.А., Звягинцев А.М.* Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 178–181; *Lapchenko V.A., Zvyagintsev A.M.* Trace atmospheric gases in the Karadag nature reserve in Crimea // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 4. P. 308–311.
30. *Шальгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Лапченко В.А.* Приземный озон на побережьях Балканского полуострова и Крыма // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 515–523.
31. *Pregger T., Friedrich R.* Effective pollutant emission heights for atmospheric transport modeling based on real-world information // Environ. Pollut. 2009. V. 157, N 2. P. 552–560.
32. *Pozzer A., Jockel P., Van Ardenne J.* The influence of the vertical distribution of emissions on tropospheric chemistry // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 24. P. 9417–9432.
33. *Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Краснов О.А., Пестунов Д.А., Праслова О.В., Фофанов А.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh.Sh., Shimooyama K., Sutoh H.* Применение самолета Ан-2 для исследования состава воздуха в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 714–720.
34. *Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Краснов О.А., Праслова О.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Суточная динамика вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы в районе Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 665–672.
35. *Kalabokas P.D., Thouret V., Cammas J.-P., Volz-Thomas A., Boulanger D., Reparis C.C.* The geographical distribution of meteorological parameters associated with high and low summer ozone levels in the lower troposphere and the boundary layer over the eastern Mediterranean (Cairo case) // Tellus B. 2015. V. 67. P. 27853. [Electronic resource]. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v67.27853>.

36. Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г., Костарев В.В., Мазин И.П., Минервин В.Е., Хрзуан А.Х., Шметер С.М. Физика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 459 с.
37. Wonaschuetz A., Sorooshian A., Ervens B., Chuang P.Y., Feingold G., Murphy S.M., de Gouw J., Warneke C., Jonsson H.H. Aerosol and gas re-distribution by shallow cumulus clouds: An investigation using airborne measurements // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, N D17202. DOI: 10.1029/2012JD018089.
38. Croft B., Lohmann U., Martin R.V., Stier P., Wurzler S., Feichter J., Hoose C., Heikkila U., van Donkelaar A., Ferrachat S. Influences of in-cloud aerosol scavenging parameterizations on aerosol concentrations and wet deposition in ECHAM5-HAM // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 4. P. 1511–1543.
39. Elperin T., Fominykh A., Krasovtsov B., Vikhansky V. Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 14. P. 2427–2433.
40. Duhanyan N., Roustan Y. Below-cloud scavenging by rain of atmospheric gases and particulates // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 39. P. 7201–7217.
41. Paramonov M., Gronholm T., Virkkula A. Below-cloud scavenging of aerosol particles by snow at an urban site in Finland // *Boreal Environ. Res.* 2011. V. 16, N 4. P. 304–320.
42. Crawford J., Olson J., Davis D., Chen G., Barrick J., Shetter R., Lefer B., Jordan C., Anderson B., Clarke A., Sachse G., Blake D., Singh H., Sandolm S., Tan D., Kondo Y., Avery M., Flocke F., Eisele F., Mauldin L., Zondlo M., Brune W., Harder H., Martinez M., Talbot R., Bandy A., Thornton D. Clouds and trace gas distributions during TRACE-P // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D21. P. 8818. DOI: 10.1029/2002JD003177.
43. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сафатов А.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Шамнаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследований окружающей среды // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
44. Gerken T., Wei D., Chase R.J., Fuentes J.D., Schumacher C., Machado L.A.T., Andreoli R.V., Chamecki M., Ferreira de Souza R.A., Freire L.S., Jardine A.B., Manzi A.O., Nascimento dos Santos R.M., von Randow C., Costa P.S., Stoy P.C., Tota J., Trowbridge A.M. Downward transport of ozone rich air and implications for atmospheric chemistry in the Amazon rainforest // *Atmos. Environ.* 2016. V. 124. P. 64–76.

V.G. Arshinova, B.D. Belan, V.A. Lapchenko, E.V. Lapchenko, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Variations in the ozone concentration in precipitation.**

Changes in the ozone concentration during precipitation is studied on the basis of surface ozone monitoring data in Tomsk and on the Karadag. It is revealed that these changes can be both positive and negative. The maximal ozone content jumps are observed during frontal precipitations. During air mass precipitation, the sign and magnitude of the changes are defined by the daily ozone cycle. The analysis showed coincidence between an increase in the ozone concentration during precipitation with its increase in the daily cycle in 59% of cases in Tomsk and in 63% of cases on the Karadag. The coincidence of a decrease in the O<sub>3</sub> concentration during precipitation with the ozone decrease wave in the daily cycle is observed even more often, in 85% of cases in Tomsk and in 79% of cases on the Karadag. Based on the aircraft sounding data, ozone sink from the boundary air layer is observed in some cases when the temperature stratification is changing to neutral in precipitation.



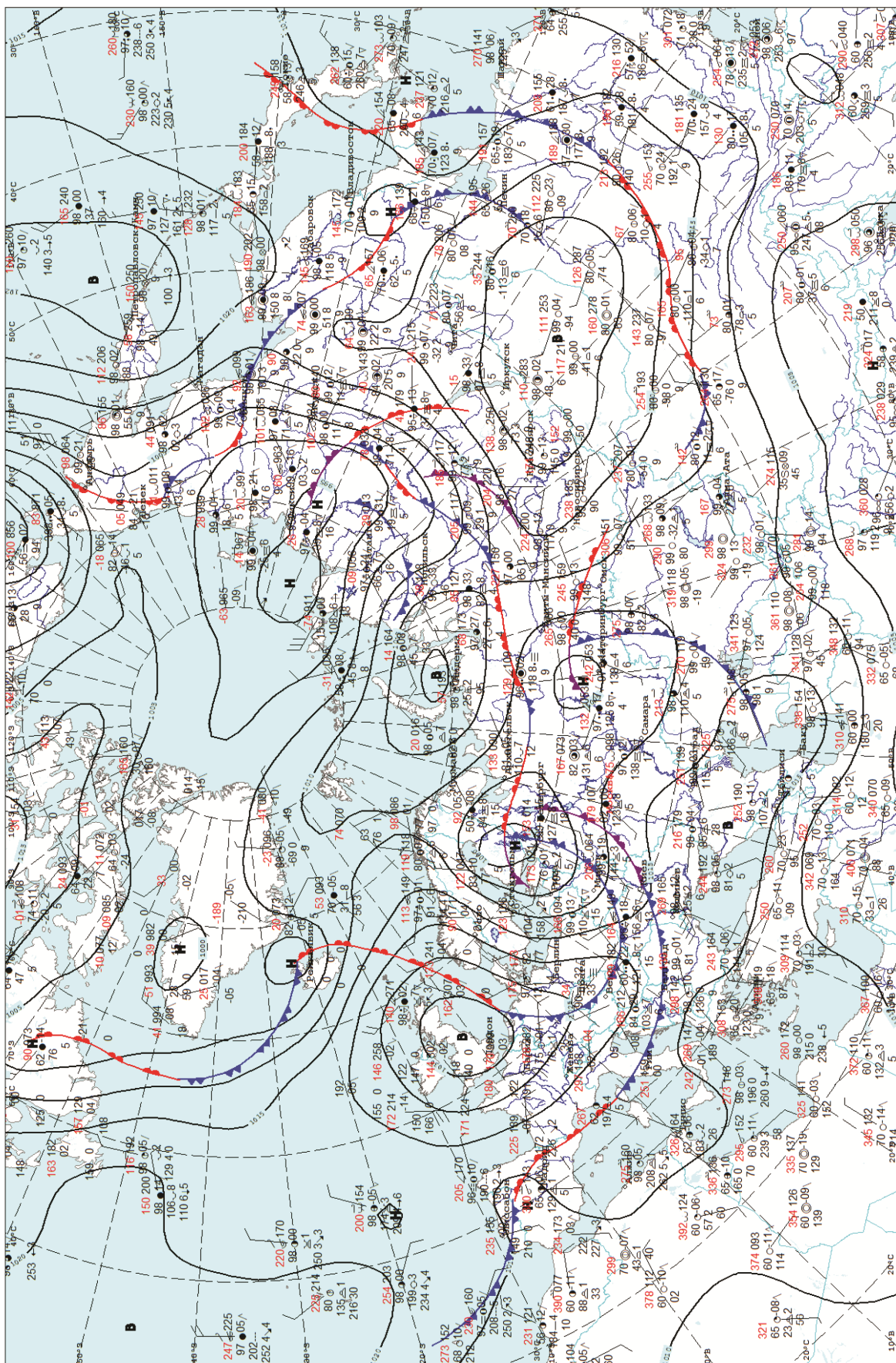


Рис. 4. Приземная карта погоды 8 сентября 2006 г. (12:00 UTC)