

УДК 551.510.42

Влияние динамических процессов на вариации озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны озера Байкал

А.С. Заяханов, Г.С. Жамсуева, В.В. Цыдыпов, Т.С. Бальжанов*

*Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8*

Поступила в редакцию 20.01.2015 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований суточной динамики приземного озона, окислов азота, диоксида серы на разных высотах с использованием 30-метровой метеорологической мачты на юго-восточном побережье оз. Байкал. Проведен анализ влияния термической стратификации на содержание озона и других малых газовых примесей в условиях бризовой циркуляции вблизи береговой зоны. Выявлены особенности высотного распределения озона и других малых газовых примесей. Отмечена важная роль в суточных вариациях озона бризовых циркуляций, которые в значительной степени влияют на перенос и рассеяние атмосферных примесей в регионе оз. Байкал.

Ключевые слова: озон, малые газовые примеси, бризовая циркуляция, оз. Байкал; ozone, small gaseous impurities, breeze circulation, Lake Baikal.

Введение

Чрезвычайно важная роль озона и связанных с ним атмосферных примесей в радиационных, химических и динамических процессах в атмосфере определяет актуальность всестороннего исследования их пространственной и временной изменчивости. Концентрация приземного озона зависит от многих факторов, таких как вертикальная устойчивость атмосферы, горизонтальный перенос, фотохимическое образование и разрушение, которые нелинейно зависят от температуры, солнечной радиации, химических взаимодействий с другими малыми газовыми примесями, присутствующими в атмосферном воздухе, и пр. Многообразие метеорологических ситуаций, природно-климатических условий обуславливает и особенности вариаций приземной концентрации озона (ПКО). В целом основные закономерности образования, трансформации и переноса тропосферного озона достаточно подробно изучены и изложены в многочисленных публикациях, наиболее полно они систематизированы в [1], однако имеют место и некоторые особенности в поведении озона в специфических условиях, которым уделялось мало внимания. Так, в [2–7] отмечено, что существенное влияние на вариации ПКО оказывают мезомасштабные циркуляционные процессы, такие как фоновые явления [2], влияние горно-долинной [3–6] и бризовой циркуляций [7].

При мониторинге приземного озона вблизи крупных водоемов, таких как оз. Байкал, необходимо также учитывать бризовые явления, которые оказывают заметное влияние на динамику ПКО. Водная поверхность крупного водоема за счет большей теплоемкости по сравнению с атмосферой является более инерционной системой. Бризовые ситуации — обычное явление вблизи береговой зоны оз. Байкал. Бризы сопровождаются переносом воздушных масс с озера в дневное время и с берега на озеро в вечерние, ночные часы. При этом воздушные массы, переносимые с озера и с суши, чаще всего различаются по составу и свойствам за счет разных условий их формирования. Над озером Байкал, вследствие орографической изолированности Байкальской котловины, процессы формирования химического состава атмосферы отличаются существенными особенностями, связанными со специфическим характером циркуляционного движения воздушных масс над акваторией озера, что способствует длительному сохранению аэрозольных и газовых примесей в чаше Байкала, поступающих как от близлежащих источников выбросов, так и в результате трансграничных дальних переносов [8]. С суши происходит перенос воздушных масс с территорий, где отсутствуют антропогенные источники (хребты Хамар-Дабана). С другой стороны, динамика метеорологических процессов в приземном слое атмосферы вблизи границы «вода–суша» в береговой зоне также имеет некоторые особенности, связанные с резкими температурными градиентами в этой области, которые приводят к формированию температурных инверсий в приземном слое атмосферы, восходящей ячейки в дневные часы

* Александр Савельевич Заяханов (Imza@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (lrf@ipms.bscnet.ru); Вадим Владимирович Цыдыпов; Тумэн Станиславович Бальжанов.

и нисходящей в вечернее время. Эти явления должны проявляться не только в метеорологических характеристиках, но и в динамике ПКО вблизи береговой зоны оз. Байкал.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований суточной динамики приземного озона, окислов азота, диоксида серы, метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы на разных высотных уровнях с использованием 30-метровой метеорологической мачты на юго-восточном побережье оз. Байкал в августе 2013 г. (стационар «Боярский»).

Условия эксперимента

Для детального изучения влияния термической стратификации атмосферы на содержание озона и других газовых примесей в условиях бризовых ситуаций проведены специальные измерения с использованием 30-метровой высотной мачты на научном стационаре «Боярский» в августе 2013 г. Отбор проб воздуха для определения содержания приземного озона, окислов азота, диоксида серы проводился на двух высотах – 2 и 20 м над уровнем Земли. Для проведения наблюдений применялись газоанализаторы озона 3-02 П-А, окислов азота Р-310, диоксида серы С-310 (ЗАО «ОПТЭК»). Для контроля погрешности измерений осуществлялась калибровка газоанализаторов с помощью калибратора «Mod. 8500 Monitor Labs». Одновременно на этих же высотах выполнялись измерения метеорологических и турбулентных параметров с помощью акустических метеорологических комплексов АМК-03, «ЭКСМЕТЕО».

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены суточные вариации средних десятиминутных значений концентрации приземного озона, скорости и направления ветра на высотах 2 и 20 м от земной поверхности за весь период экспериментов.

Как видно из рис. 1, *а*, наблюдаются существенные различия в суточных вариациях озона в приповерхностном слое (2 м) и в приземном слое на высоте 20 м, где влияние подстилающей поверхности заметно снижается. Наибольшие расхождения отмечаются в вечерние, ночные часы. В дневное время с ростом температуры и с усилением турбулентных процессов в приземном слое атмосферы концентрации озона на разных высотах выравниваются.

На рис. 1, *б*, *в* приведены результаты измерений ветровых характеристик (направление и скорость ветра) на разных высотах – 2 и 20 м. В дневные часы преобладающим направлением ветра является перенос воздушных масс с озера, в вечерние и утренние часы – с суши.

Несмотря на некоторые естественные различия погодных условий для разных суток, на рис. 1, *б* отчетливо выделяется характерная цикличность бризовой циркуляции: зарождение дневного бриза вблизи

береговой зоны в утренние часы (9:00–10:00), затухание в вечернее время суток и затем развитие ночного бриза (21:00–22:00). Отметим некоторые характерные черты бризовой циркуляции, которые можно видеть на рис. 1, *в*. Во-первых, наблюдается асимметрия дневного и ночного бризов, которая проявляется в величинах скорости ветра. Дневной бриз достигает скорости 4–5 м/с вблизи береговой зоны, в то время как скорость ветра при ночном бризе не превышает 3 м/с. Во-вторых, если в дневные часы чаще преобладают восходящие потоки, то в условиях берегового бриза вертикальная составляющая скорости ветра чаще всего направлена вниз, достигает максимума над сушей в утренние часы (рис. 1, *г*). Ночью вблизи береговой зоны она также максимальна, т.е. возникают нисходящие движения воздуха над сушей. Эти движения образуются в конце дня и достигают максимального развития в ночные часы. В это время суток с заходом солнца и при отсутствии других источников генерации озона начинают преобладать процессы стока, разрушения озона на подстилающей поверхности (2 м). На верхних уровнях атмосферы (20 м) скорость распада озона ниже, чем вблизи земной поверхности. Кроме того, дополнительно при преобладающих нисходящих потоках часть озона доставляется с верхних слоев с более высоким содержанием озона.

В условиях штормовой погоды, при устойчивом ветре с озера, который может сохраняться длительное время, как, например, с 01.08.13 по 04.08.13 г. (см. рис. 1, *б*, *в*), концентрации озона на разных высотах (2 и 20 м) выравниваются, нет различий и в суточных вариациях (см. рис. 1, *а*). В вечерние, ночные часы при слабом ветре и отсутствии УФ-радиации концентрация озона, как правило, выше на верхнем, чем на нижнем уровне. Такое распределение озона соответствует слабому перемешиванию воздуха за счет возникновения инверсий температуры в приземном слое атмосферы и доминирующей роли поглощения озона подстилающей поверхностью. С другой стороны, заметное влияние на содержание озона начинает оказывать смена направлений ветровых потоков в условиях возникновения бриза в вечерние-утренние часы, приводящих к смене воздушных масс. С заходом солнца процесс разрушения озона вблизи земной поверхности (2 м) за счет стока озона на подстилающую поверхность начинается раньше, чем на верхних уровнях атмосферы. Кроме того, в вечерние часы происходит формирование температурных инверсий, препятствующих развитию турбулентных процессов в подинверсном слое, о чем свидетельствуют малые значения коэффициента турбулентности и значительные градиенты температуры в слое 2–20 м. Для примера на рис. 2 более подробно представлены результаты синхронных измерений концентрации озона, коэффициента турбулентного обмена, вертикального градиента температур, скорости и направления ветровых потоков, наблюдавшихся в период экспериментов 7 августа в условиях слабой синоптической активности, в которых чаще всего формируются бризовые явления.

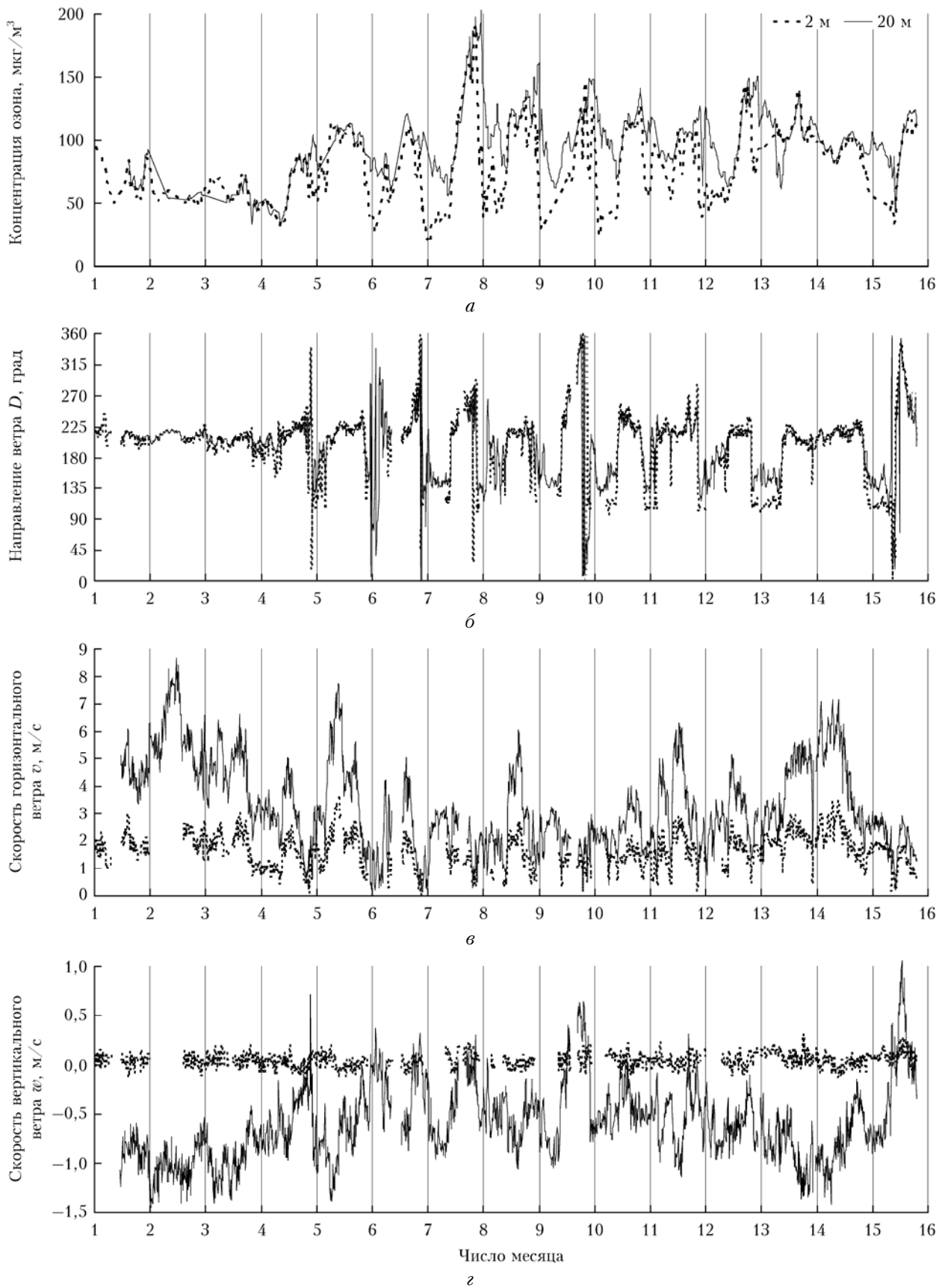


Рис. 1. Временная изменчивость ПКО (а), направления ветра (б), горизонтальной (в) и вертикальной скорости ветра (г) на высотах 2 и 20 м в августе 2013 г. на стационаре «Боярский»

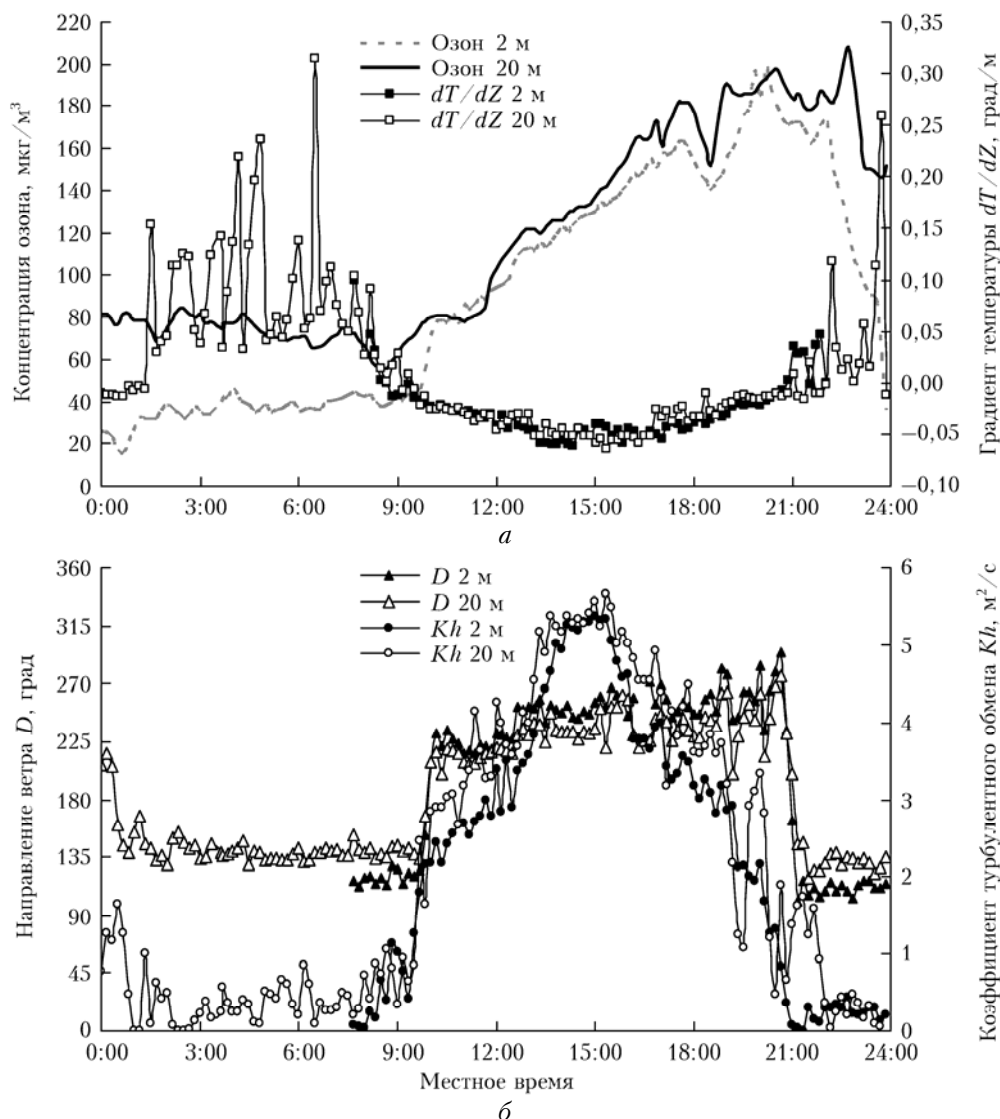


Рис. 2. Суточный ход концентрации озона и вертикального градиента температур (а), направления ветровых потоков и коэффициента турбулентного обмена (б) в период наблюдений 7 августа 2013 г. на высотах 2 и 20 м

Как видно из рис. 2, в утренние часы с прогревом земной поверхности за счет формирования конвективных потоков происходит разрушение приземной инверсии (рис. 2, а), усиливаются турбулентные процессы (рис. 2, б), которые приводят к постепенному росту и выравниванию концентрации озона на разных высотах. В эти часы береговой бриз сменяется на дневной, с озера (см. рис. 2, б). В вечернее время с заходом солнца и понижением температуры почвы формируются инверсии температуры в приземном слое атмосферы (см. рис. 2, а), снижение интенсивности турбулентных процессов (см. рис. 2, б). В отсутствие вертикального обмена, особенно в самом нижнем приповерхностном слое (2 м), содержание озона резко падает за счет его осаждения на подстилающую поверхность. На высоте 20 м скорость распада озона ниже, чем в приповерхностном слое (2 м). Кроме того, за счет нисходящих потоков на высоте 20 м поддерживается более высокое

содержание озона, поступающего с верхних уровней атмосферы в течение длительного времени.

Условия для формирования дневного бриза чаще всего возникают к 9:00–10:00 местного времени, однако в отдельные периоды при определенных метеорологических условиях, благоприятных для формирования бризовых ситуаций, могут наблюдаться и раньше, как, например, 5 августа начало дневного бриза отмечено в более ранние утренние часы, начиная с 4:00 (рис. 3, а). Также, еще раньше периодически происходила смена направления ветра с берега на озеро и с озера по направлению на берег. При этом содержание озона синхронно меняется со сменой направления ветра: с озера отмечаются более высокие концентрации, чем с лесного массива. Разница в концентрации значительна и составляет 30–50 $\text{мкг}/\text{м}^3$. Такому развитию событий способствовали особые метеорологические условия, которые сложились в этот период. Накануне 4 августа

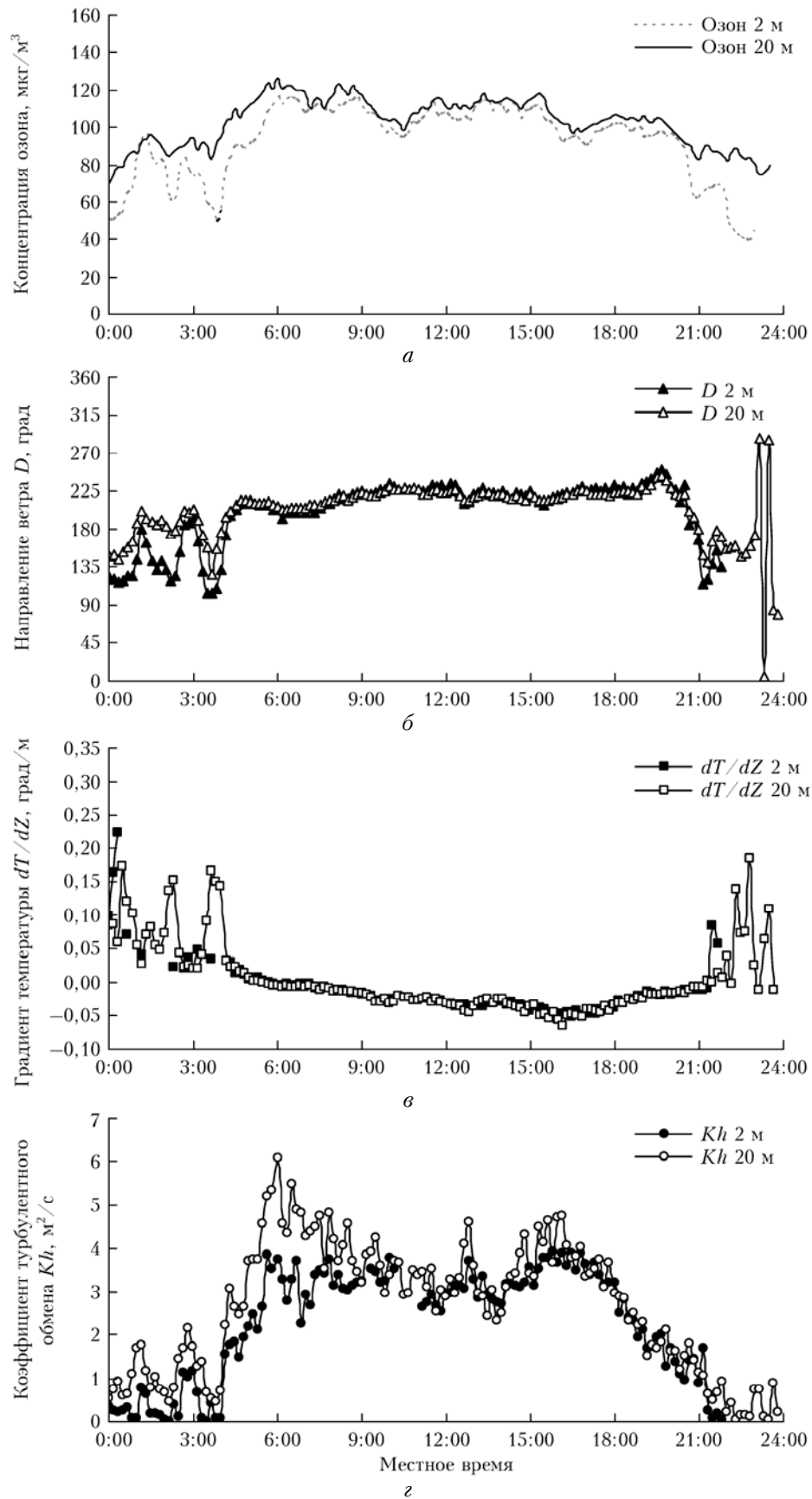


Рис. 3. Суточный ход концентрации озона (*a*), направления ветровых потоков (*б*), вертикального градиента температур (*в*), коэффициента турбулентного обмена (*г*) в период наблюдений 5 августа 2013 г. на высотах 2 и 20 м

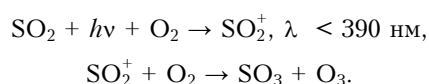
зарегистрирована достаточно высокая дневная температура — до 25 °С. Однако со сменой погоды и с приходом более холодных воздушных масс температура воздуха понизилась быстрее, чем температура почвы, поэтому в ночные часы наблюдалось небольшое повышение температуры (до 20 °С) в нижнем приповерхностном слое за счет отдачи тепла от земной поверхности. Инверсии температуры в ночные часы были непродолжительны (рис. 3, *в*). В ранние утренние часы, начиная с 4:00, активизируются турбулентные процессы (рис. 3, *г*), которые приводят к резкому увеличению концентрации озона до 120 мкг/м³ в течение 2 ч, превышающей дневные концентрации озона. Как видно из рис. 3, *г*, интенсивность турбулентного перемешивания в утренние часы гораздо выше, чем в дневное время.

В период экспериментов 2013 г. вблизи Байкала отмечены anomalно высокие концентрации озона, максимальные концентрации O₃ достигали значений до 200 мкг/м³ (см. рис. 1, *а*). Anomalно высокие концентрации озона были зафиксированы вечером 7 августа при высоком задымлении воздуха акватории Байкала и близлежащих территорий. При этом длительное время наблюдались достаточно высокие концентрации диоксида серы — до 18 мкг/м³, содержание окислов азота было на уровне 7–8 мкг/м³ (рис. 4).

Причиной появления дымовых шлейфов над Байкалом являлись лесные пожары, основные очаги

которых были зафиксированы в западной и южной частях Восточной Сибири, а также пожары лесотундры в Якутии, что подтверждают анализ обратных траекторий переноса воздушных масс, рассчитанных по модели HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajtype.pl.runtime=archive>) на время проведения экспериментов, в частности 7 августа 2013 г., и спутниковые данные о интенсивности пожаров в регионе (<http://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>). Следовательно, наблюдавшиеся в этот день высокие концентрации дымового аэрозоля, озона и диоксида серы, окислов азота являются следствием переноса в пункт наблюдения как антропогенных выбросов, так и продуктов горения лесов и лесотундры.

При высоких концентрациях диоксида серы в [9] отмечается следующий возможный механизм генерации озона за счет фотохимического окисления диоксида серы:



Считается, что механизмы окисления диоксида серы не являются эффективными для тропосферы. Однако оценок по их значимости в литературе обнаружить не удалось. Кроме того, с повышением температуры в воздухе резко возрастает и концентрация наиболее активных летучих органических соединений изопрена и суммы терпенов, особенно при

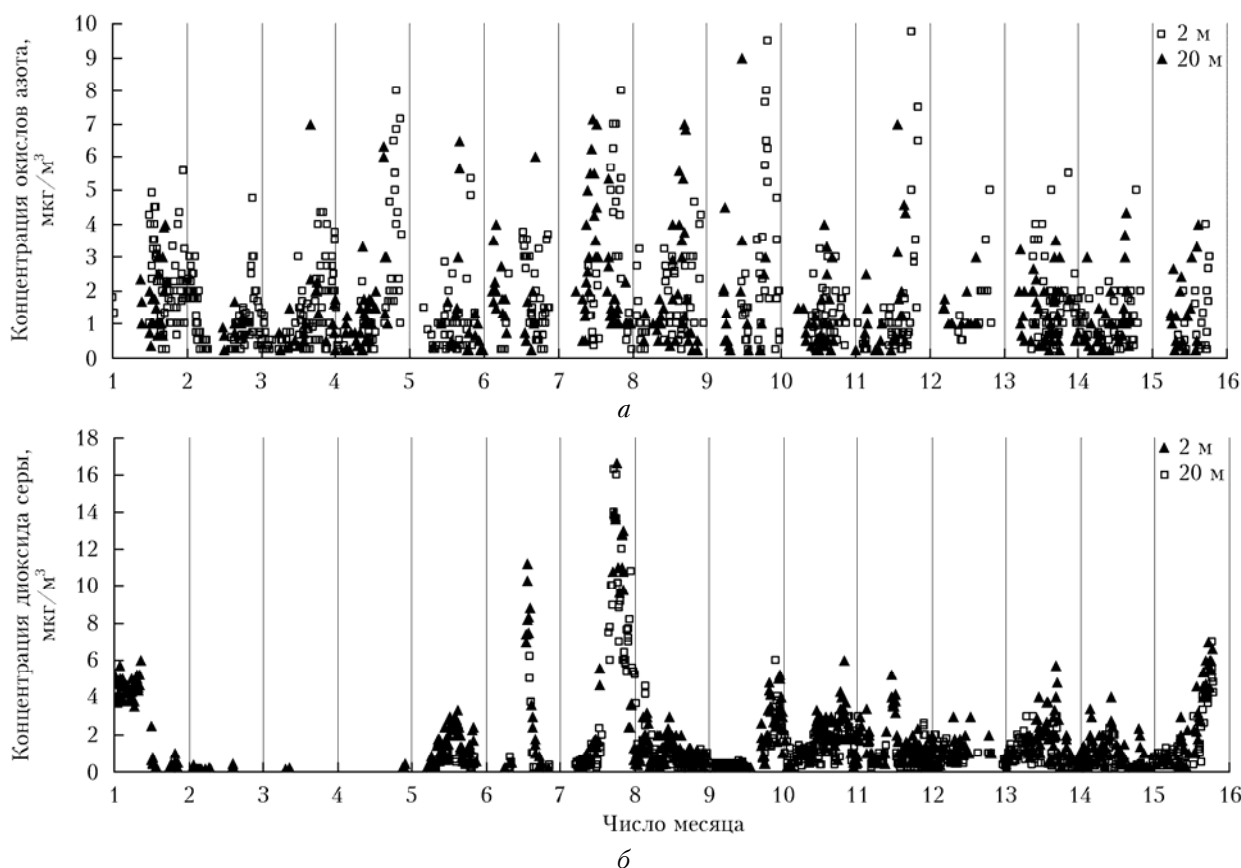


Рис. 4. Временные вариации окислов азота (*а*), диоксида серы (*б*) на высотах 2 и 20 м в августе 2013 г. на стационаре «Боярский»

пожарах [10]. Существенный рост озonoобразующих соединений, поступающих в воздушных массах с очагов лесных пожаров, и накопленные антропогенные примеси, вероятно, способствовали аномальному росту содержания приземного озона за счет фотохимических процессов [1].

Заключение

1. Проведен анализ результатов измерений приземной концентрации озона, окислов азота, диоксида серы вблизи береговой зоны оз. Байкал в периоды бризовых явлений.

2. Выявлены особенности высотного распределения озона и его суточной изменчивости вблизи береговой зоны оз. Байкал. Установлена важная роль в суточных вариациях озона и в его высотном распределении бризовых циркуляций вблизи береговой зоны оз. Байкал, которые в значительной степени влияют на перенос и рассеяние атмосферных примесей в регионе.

3. Отмечены некоторые особенности структуры и динамики метеорологических процессов в приземном слое атмосферы в береговой зоне оз. Байкал, влияющих на высотный профиль ПКО и его суточные вариации. Экспериментально показано существенное влияние температурных инверсий, турбулентных характеристик на условия трансформации, переноса и разрушения приземного озона.

4. Обнаружены аномально высокие концентрации приземного озона, ранее не наблюдавшиеся в регионе оз. Байкал. Установлено, что причиной аномально высоких концентраций озона являлись лесные пожары, которыми были охвачены южная и западная части Восточной Сибири и лесотундровые территории Якутии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 8 и Программы Президиума РАН № 4.12.

1. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 487 с.
2. Демин В.И., Белоглазов М.И., Мокров Е.Г. Феновые эффекты над Хибинами в изменениях концентрации приземного озона // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 7. С. 613–617.
3. Демин В.И., Белоглазов М.И. О влиянии местных циркуляционных процессов на динамику приземного озона // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 331–333.
4. Демин В.И., Белоглазов М.И., Еланский Н.Ф. О связи приземной концентрации озона и высоты слоя перемешивания // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 8. С. 662–665.
5. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Балжанов Т.С. Результаты мониторинга приземного озона в атмосфере г. Улан-Удэ // Метеорол. и гидрол. 2013. № 12. С. 76–84.
6. Сенник И.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лисицына Л.В., Галактионов В.В., Кортуннова З.В. Основные закономерности временной изменчивости приземного озона на высотах 870 и 2070 м в районе г. Кисловодска // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2005. Т. 41, № 1. С. 78–91.
7. Qin Y., Tonnesen G.S., Wang Z. Weekend/weekday differences of ozone, NO_x, CO, VOCs, PM₁₀ and the light scatterer during ozone season in southern California // Atmos. Environ. 2004. N 38. P. 3069–3087.
8. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д., Жбанов Э.Ф., Микушев М.К., Панченко М.В., Поданев А.В., Толмачев Г.Н., Щербатова А.В. Феномен круговой циркуляции в котловине озера Байкал // Докл. РАН. 1992. Т. 325, № 6. С. 1146–1150.
9. Брикард Дж. Химия окружающей среды. М.: Химия, 1982. С. 260–275.
10. Plass-Duelmer C., Berresheim H. Trends von atmosphärischen Kohlenwasserstoffen (VOC) und ihre Klimarelevanz // WMO-GAW Briefe. Meteorol. Observatorium Hohenpeibenberg. 2005. 2 s.

A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva, V.V. Tsydyпов, T.S. Balzhanov. Influence of dynamic processes on variations of ozone and other trace gases near the coastal zone of Lake Baikal.

The paper presents the results of expedition investigation of diurnal dynamics of ozone, nitrogen oxides, sulfur dioxide at different altitudes. The measurements were carried out to the south-east of Lake Baikal using a 30-m meteorological mast. Analysis of influence of thermal stratification on ozone content and other trace gases in a breeze circulation near the coastal zone is presented. Features of the altitude distribution of ozone and trace gases are revealed. Important role of breeze circulations in diurnal variations of ozone are noted, which influence transport and distribution of atmospheric impurities in Baikal region.