

## Пространственное распределение малых примесей воздуха в котловине озера Байкал

В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, С.Б. Белан, Г.А. Ивлев,  
Т.М. Рассказчикова, Д.В. Симоненков, А.В. Фофонов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 16.03.2012 г.

Приводятся результаты самолетного зондирования состава воздуха в котловине оз. Байкал, полученные в июле 2008 г. Показано, что по сравнению с предыдущим аналогичным исследованием, выполненным в 1991 г., атмосфера оз. Байкал стала заметно чище. По-видимому, сказалось действие двух факторов – уменьшение промышленной деятельности в регионе и проведение природоохранных мероприятий.

*Ключевые слова:* атмосфера, аэрозоль, воздух, газы, распределение, Байкал; atmosphere, aerosol, air, gas, distribution, Baikal.

### Введение

Озеро Байкал – самое глубокое озеро на планете, крупнейший природный резервуар пресной воды [1]. В 1996 г. Байкал из-за своей уникальности был внесен в Список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Озеро и прибрежные территории отличаются уникальным разнообразием флоры и фауны, большая часть их видов эндемична. Озеро находится в своеобразной котловине, со всех сторон окруженной горными хребтами и сопками. При этом западное побережье – скалистое и обрывистое, рельеф восточного побережья более пологий (местами горы отступают от берега на десятки километров). Это способствует тому, что здесь наблюдается большой набор местных ветров, таких как баргузин, сарма, верховик, култук [2]. Кроме местных ветров в котловине озера обнаружена особая циркуляция воздуха, способствующая переносу примесей над его акваторией [3–5]. Наличие системы местных ветров и локальной циркуляции воздуха в его котловине предполагает существование регулярного обмена примесями между водной поверхностью и атмосферой. Загрязнение воздуха способно существенно влиять на качество воды наряду с непосредственным сбросом в акваторию озера продуктов жизнедеятельности человека [6–9]. С учетом уникальности оз. Байкал для его сохранения весьма актуален контроль не

только качества воды, но и состава воздуха над его акваторией.

Мониторинг и разовые исследования состава атмосферы в котловине оз. Байкал в приземном слое воздуха осуществляются сотрудниками Лимнологического института СО РАН (г. Иркутск) [10–17]. Нами было проведено комплексное исследование концентрации примесей и циркуляции воздуха в 1991 г. на разных высотах над всей акваторией озера [3–7]. Оно показало высокие уровни загрязнения воздуха в слое 600–900 м над уровнем воды, причем примеси достаточно равномерно распределялись над всей акваторией. Высокий уровень загрязнения был обусловлен выбросами Иркутской промзоны, к которым добавлялись «местные» примеси от ЦБК.

За истекший период кардинально изменилась промышленная деятельность в регионе, был принят ряд законодательных актов по охране оз. Байкал. В связи с этим весьма интересно, как изменился состав воздуха в его котловине. Исследованию пространственного распределения примесей воздуха в атмосфере оз. Байкал и посвящена настоящая статья.

### Метод исследования и синоптическая обстановка

Работы по исследованию распределения концентрации примесей над оз. Байкал были выполнены 25 и 28 июля 2008 г. с помощью самолета-лаборатории ИОА СО РАН «Оптик-Э». Описание современного состава бортового измерительного комплекса самолета-лаборатории приведено в [18, 19].

Зондировочные полеты над Байкалом выполнялись по следующим схемам (рис. 1).

\* Виктория Геннадьевна Аршинова; Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан; Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова; Денис Валентинович Симоненков; Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

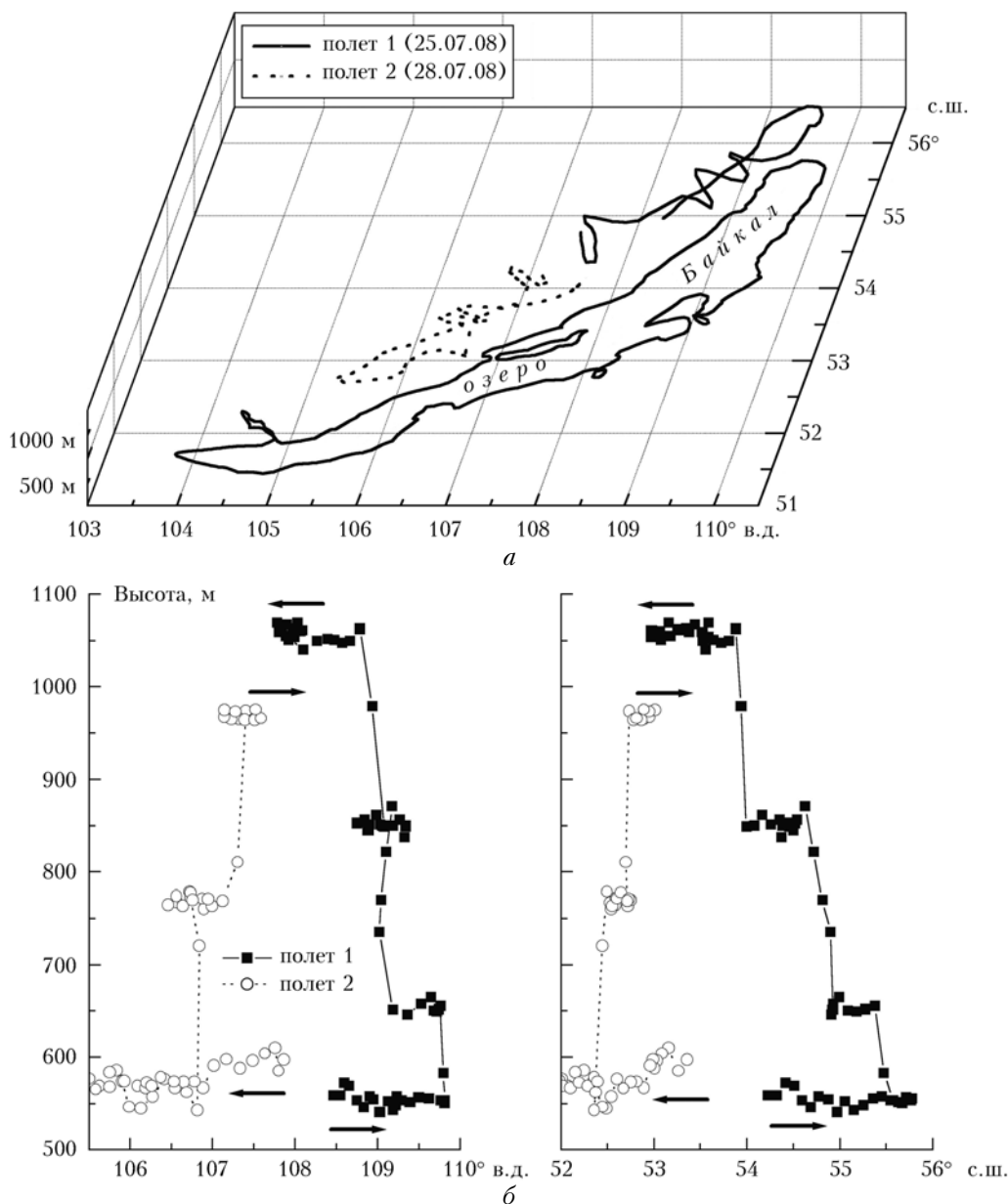


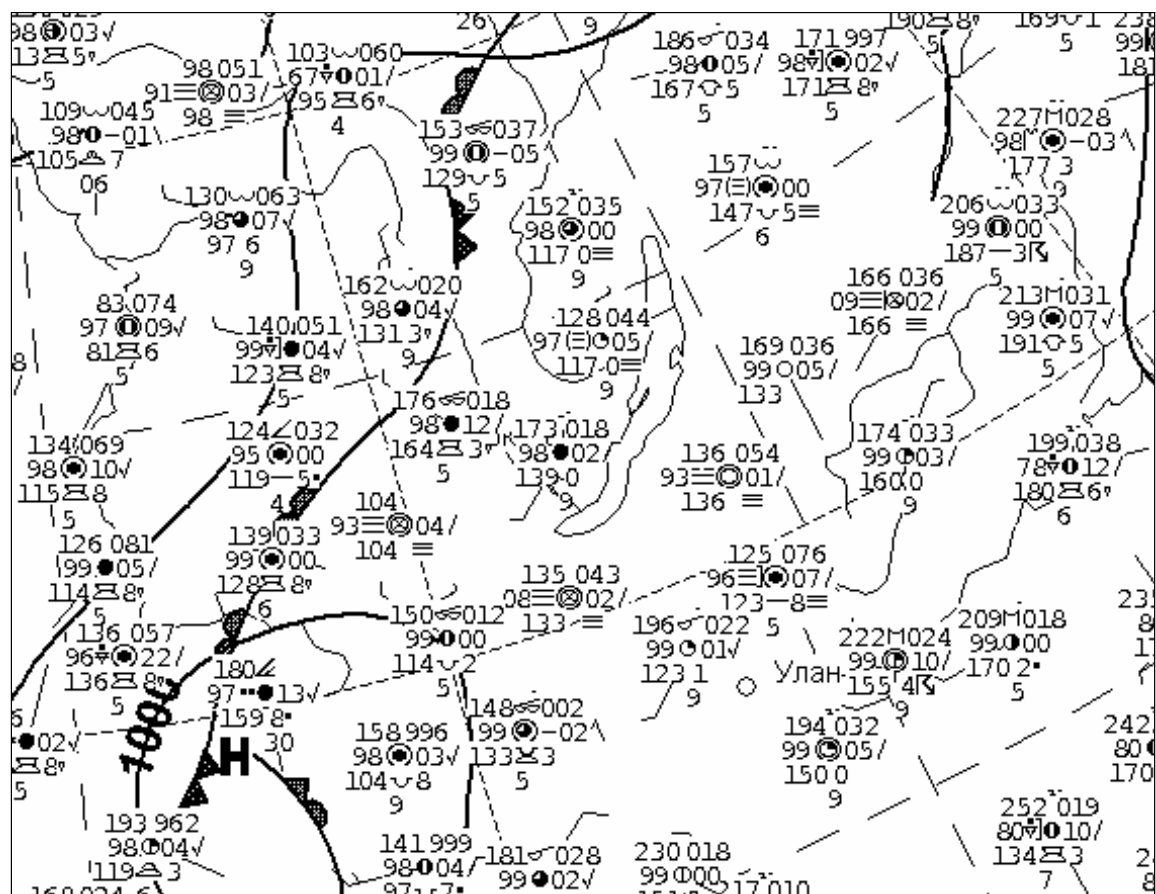
Рис. 1. Маршруты (а) и вертикальный профиль (б) полетов над оз. Байкал

Сначала в каждом из исследуемых районов проводился облет вдоль береговой линии озера и на некотором удалении от нее из-за превышения окружающего горного рельефа над высотой полета. Нижний уровень полета составлял 500–600 м над поверхностью озера. Далее исследования продолжались пересечением акватории озера галсами под различными углами и на разных высотах – от 500 до 1000–1100 м над поверхностью озера. Данные полетных измерений усреднялись по участкам для дальнейшего определения вертикальных и пространственных характеристик измеряемых величин.

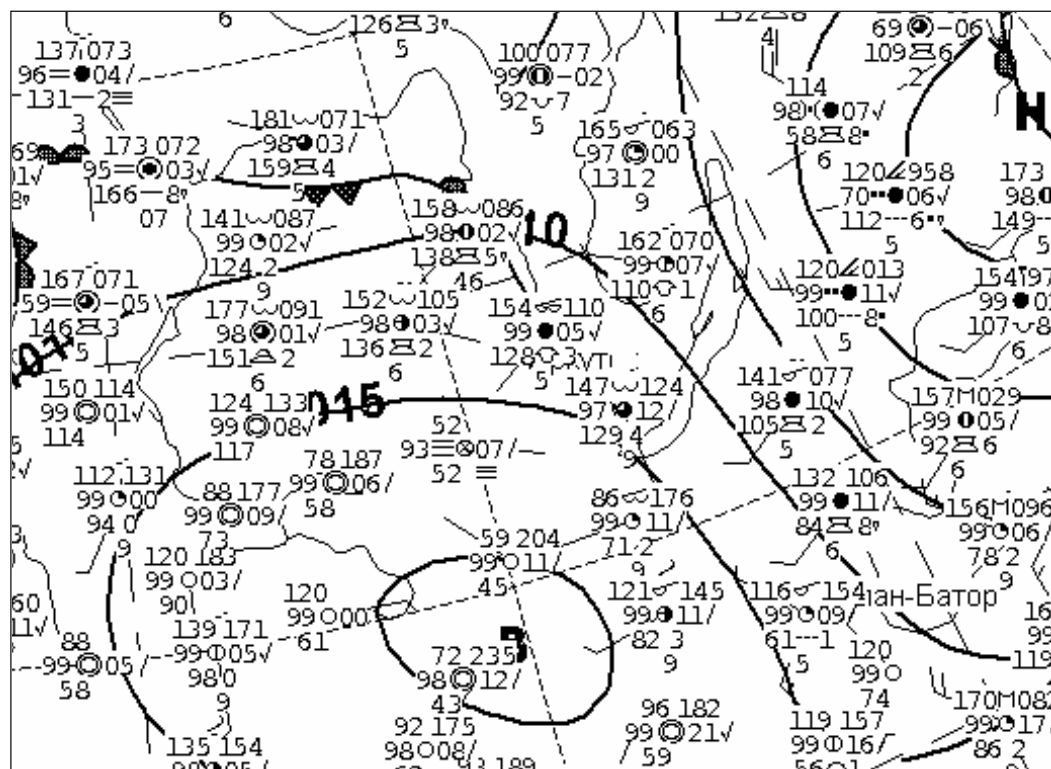
Неравномерное распределение измерений по исследуемым районам озера заставило нас прибегнуть к интерполяции геостатистическим методом Кригинга, который восстанавливает отсутствующие данные

в узлах пересечения масштабируемой координатной сетки на основе анализа вариограмм [20]. Для построения пространственных распределений измеряемых атмосферных величин был использован кригинг-алгоритм точечного типа для линейных вариограмм с наклоном  $S = 1$  и анизотропией  $A = 1$ , который предоставил приемлемое сглаживание данных по изолиниям.

Полеты проходили при разных погодных условиях. Первый полет был выполнен 25 июля 2008 г. Обследовалась северная часть Байкала. В этот день наблюдалась ясная маловетренная погода, что обуславливалось малоградиентным барическим полем у поверхности земли. Температурно-влажностный режим исследуемого региона в это время определяла умеренная воздушная масса (рис. 2, а).



a



b

Рис. 2. Синоптическая обстановка в период эксперимента: а – 25 июля, б – 28 июля 2008 г. (Фрагмент карты приземного анализа)

В период выполнения второго полета 28 июля в атмосфере над средней частью озера и южнее наблюдались штормовые условия с высоким волнением над водной поверхностью. Погодные условия определялись контрастной зоной, образованной антициклоном, расположенным юго-западнее Байкала, и циклоном, находящимся восточнее озера (рис. 2, б).

В промежуток между первым и вторым полетами по территории региона прошел холодный фронт, и режим температуры и влажности во втором полете определялся арктической воздушной массой.

Граница между первым и вторым полетами (см. рис. 1) находилась на меридиане северо-восточной оконечности о. Ольхон, который фактически разделяет Байкал на северную и южную части.

Таким образом, полученные результаты можно рассматривать как отдельные исследования двух различных зон, проведенные в разных метеорологических условиях. Поскольку все данные получены на разных высотах, то приводимые ниже пространственные распределения измеряемых величин являются характеристикой слоя воздуха, расположенного между 500 и 1000–1100 м над поверхностью озера.

### Вертикальное распределение примесей

На рис. 3 приведены вертикальные распределения исследуемых величин над поверхностью озера по результатам атмосферного зондирования.

Распределения температуры и влажности в первом полете указывают на смену воздушных масс: уменьшение значений с набором высоты сменилось резким скачком в сторону увеличения на 850 м и выше. Возможно, была пересечена граница воздушных масс.

В пользу этого предположения свидетельствует и изменение концентраций озона, отражающее резкое увеличение концентраций на высоте 850 м и выше в первом полете. Во втором полете эти показатели линейно убывали с высотой, не претерпевая резких изменений.

Высотные распределения счетной концентрации аэрозоля ( $0,3 < d < 20$  мкм) и углекислого газа в первом полете носили разнонаправленный характер, что особенно заметно при анализе данных измерений на высоте 650 м.

Следует также отметить значительное уменьшение концентрации  $\text{CO}_2$  во втором полете относительно показателей первого ( $\sim 10$  млн<sup>-1</sup>). Это свидетельствует о смене воздушной массы между полетами.

Распределения концентраций других газовых составляющих атмосферы от полета к полету отличались незначительно. При этом их концентрации были очень низкими, близкими к фоновым [21–25]. По-видимому, полученные низкие концентрации примесей в котловине озера являются результатом су-

щественного очищения атмосферы региона за исходный период.

### Пространственное распределение примесей воздуха

По данным самолетного зондирования атмосферы над оз. Байкал были построены пространственные распределения (плоскостные проекции на рис. 4).

С некоторыми оговорками можно утверждать, что с помощью этих исследований выявлены новые закономерности поведения воздушной массы над озером. В частности, из рис. 4, а видно, что о. Ольхон и п-ов Святой Нос оказывают влияние на воздушный обмен между севером Байкала и его южной частью.

Так, в ходе первого полета в центре северной части Байкала зарегистрирован холодный атмосферный остров, в то же время к югу от высот п-ова Святой Нос отмечается накопление теплых воздушных масс.

В холодном воздухе было зафиксировано увеличение счетной концентрации аэрозоля, а распределение концентрации  $\text{CO}_2$  выявило в основном обратную картину: с увеличением содержания аэрозоля она уменьшалась.

Распределение озона над северной частью Байкала показало рост концентраций в направлении с севера на юг, что совпало с температурным градиентом.

Построенные распределения из-за очень низких значений  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  имели неоднородный характер.

Измерения во втором полете дали более равномерные распределения исследуемых величин (рис. 4, б). Незначительные перепады обусловлены хорошим вертикальным перемешиванием в послештормовой воздушной массе.

Рост значений отдельных параметров (влажность, аэрозоль) в южном направлении можно связать с наблюдавшимся в районе полета увеличением низкой облачности.

Подводя итог работы в целом, можно заключить, что атмосфера в котловине оз. Байкал в июле 2008 г. находилась в достаточно чистом состоянии, не испытывая сколько-нибудь значимого антропогенного воздействия по сравнению с результатами предыдущего комплексного обследования, проведенного в 1991 г. [6, 7].

Регистрация перепада температуры, влажности и концентраций некоторых газовых составляющих атмосферы в северной части Байкала связана с существованием местной циркуляции воздуха.

Этот вывод сделан на основании того, что при наблюдавшихся синоптических условиях крупномасштабная циркуляция не оказывала существенного влияния на перенос воздуха и, соответственно, различные его составляющие в акватории озера.

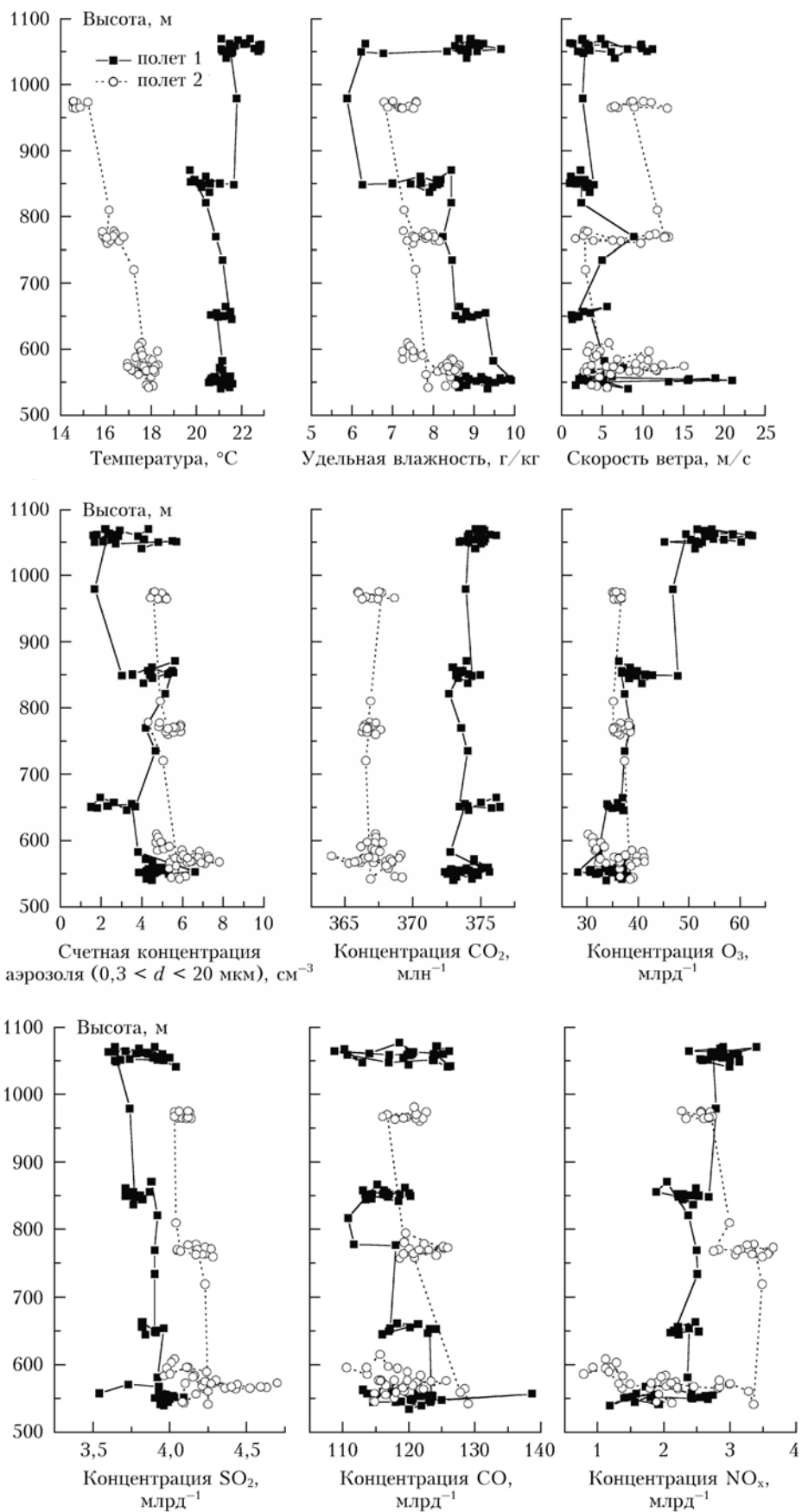


Рис. 3. Вертикальное распределение измеряемых величин в котловине оз. Байкал

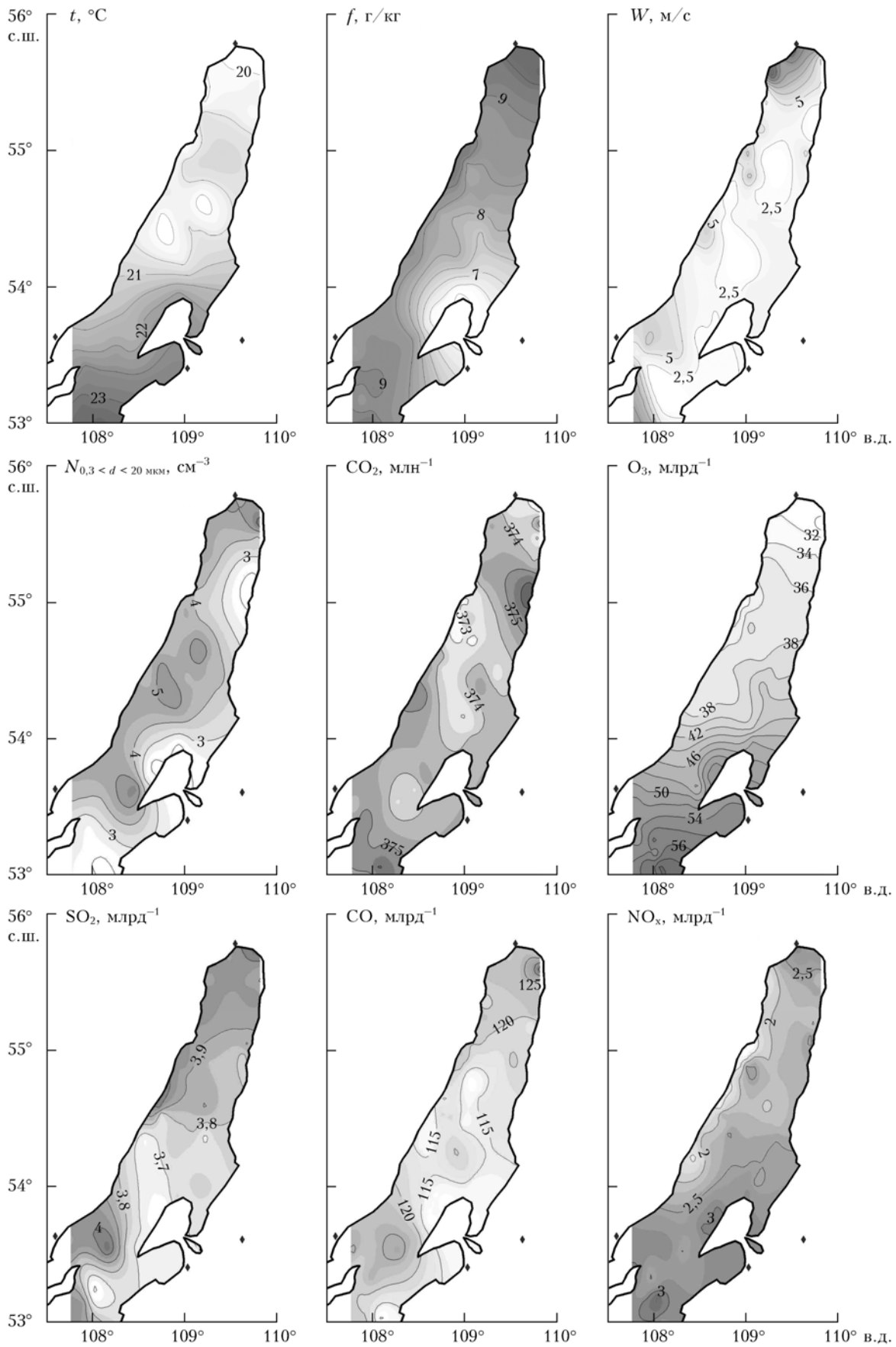


Рис. 4, а

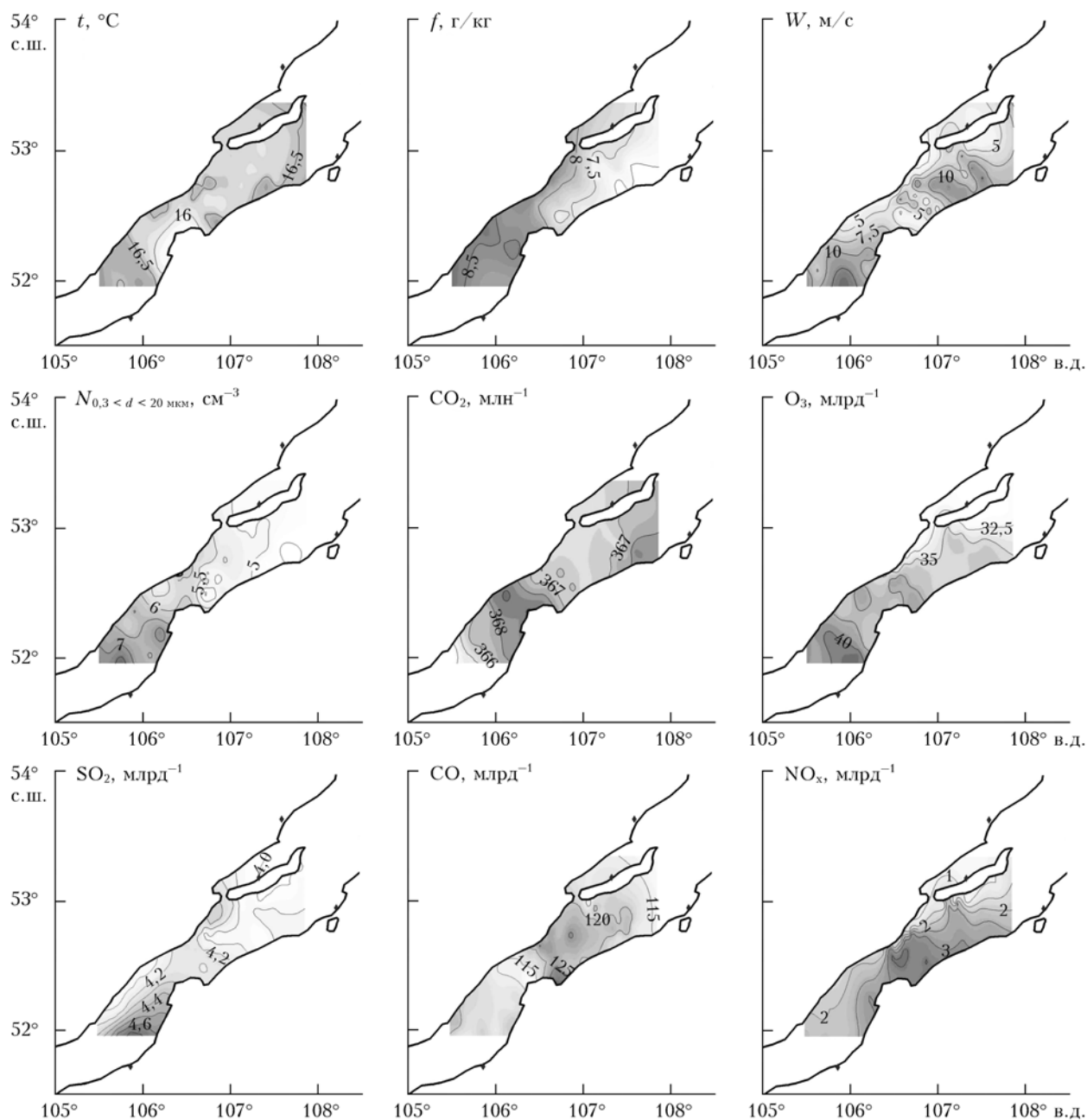


Рис. 4, б

Рис. 4. Пространственные распределения примесей над северной (а) и центральной частями (б) оз. Байкал, 25.07 и 28.07.2008 г. соответственно

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, 11-05-93116 и 11-05-93118, госконтрактов Минобрнауки № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204 и 11.519.11.5009.

1. Бухаров А.А. Байкал в цифрах (краткий справочник). Иркутск: Изд-во ИП «Макаров С. Е.», 2001. 72 с.
2. Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 288 с.

3. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Поданев А.В., Покровский Е.В., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К. Некоторые характеристики циркуляции воздуха вдоль периметра оз. Байкал // Метеорол. и гидрол. 1999. № 8. С. 66–71.
4. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М. Пространственно-временные характеристики циркуляции воздуха в котловине оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 4. С. 290–293.
5. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д., Жбанов М.В., Микушев М.К., Панченко М.В., Поданев А.В., Толмачев Г.Н., Щербатова А.В. Феномен круговой циркуляции воздуха в котловине озера Байкал // Докл. РАН. 1992. Т. 325, № 6. С. 1146–1150.

6. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Панченко М.В., Покровский Е.В., Рассказчикова Т.М., Толмачев Г.Н. К оценке загрязнения воды озера Байкал через атмосферный канал // Докл. РАН. 1996. Т. 347, № 3. С. 394–398.
7. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Панченко М.В. Основные результаты самолетного зондирования аэрозоля в ИОА СО РАН (1981–1991) // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 1–2. С. 131–156.
8. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Нагуслаев С.А., Цыдыпов В.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Тацилин М.А. Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 466–470.
9. Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Потемкин В.Л. О роли атмосферы в формировании химического состава вод оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 6. С. 512–515.
10. Макухин В.Л., Янченко Н.И., Баранов А.Н. Исследование процессов распространения, трансформации и осаждения соединений фтора и серы в районе г. Братск // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 525–528.
11. Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Гусева Е.А. Исследование процессов переноса и осаждения ртутьсодержащих веществ в атмосфере Южного Прибайкалья // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 906–909.
12. Аргуницев В.К., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Исследование распределения соединений серы и азота в приводном слое оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9, № 6. С. 748–752.
13. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 1. Гидрологическая весна // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1067–1074.
14. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 737–742.
15. Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Маринайте И.И., Белозерова О.Ю., Горшков А.Г., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Химический состав атмосферных аэрозолей над акваторией оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 236–241.
16. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Макухин В.Л., Тода К., Такеучи М., Обата Т., Хирота К. Динамика серосодержащих примесей в атмосфере вокруг точечного источника – Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (юго-восточное побережье оз. Байкал) // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 9. С. 853–858.
17. Потемкин В.Л., Макухин В.Л. Исследование динамики малых газовых примесей в атмосфере Байкальского региона // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 2. С. 154–157.
18. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Шаманаев В.С., Шморгунов В.П. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследования окружающей среды // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
19. Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Zhidovkin E.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Shamanaev V.S., Shmargunov V.P. Optik-E AN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // J. Atmos. Ocean. Technol. 2012. V. 29, N 11. P. 64–75.
20. Deutsch C.V., Journal A.G. GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide. N.Y.: Oxford University Press, 1992. 338 p.
21. Assonov S.S., Brenninkmeijer C.A.M., Jöckel P., Mulvaney R., Bernard S., Chappellaz J. Evidence for CO increase in the SH during the 20th century based on firn air samples from Berkner Island, Antarctica // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 2. P. 295–308.
22. Bardouki H., Berresheim H., Vrekoussis M. et al. Gaseous (DMS, MSA, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and DMSO) and particulate (sulfate and methanesulfonate) sulfur species over the northeastern coast of Crete // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3, N 4. P. 3869–3906.
23. Bottenheim J.W., Barrie L.A., Atlas E. The Partitioning of Nitrogen Oxides in the Lower Arctic Troposphere During Spring 1988 // J. Atmos. Chem. 1993. V. 17, N 1. P. 15–27.
24. Shon Z.-H., Lee G., Song S.-K., Lee M., Han J., Lee D. Characteristics of reactive nitrogen compounds and other relevant trace gases in the atmosphere at urban and rural areas of Korea during May–June, 2004 // J. Atmos. Chem. 2007. V. 58, N 3. P. 203–218.
25. Tu F.H., Thornton D.C., Bandy A.R. et al. Dynamics and transport of sulfur dioxide over the Yellow Sea during TRACE-P // J. Geophys. Res. 2003. V. 106. D20. D003227.

V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, G.A. Ivlev, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov. **Spatial distribution of small impurity of air in a hollow of lake Baikal.**

The plane sounding of air composition in a hollow of lake Baikal received in July, 2008 are presented. It is shown, that, in comparison with the previous similar research, executed in 1991, the atmosphere of lake Baikal became appreciably clearer. Apparently, the action of two factors, reduction of industrial activity in the region and the carrying out of protection actions gave this result.