

К оценке пространственной изменчивости направления потоков углекислого газа в разные гидрологические сезоны на озере Байкал

М.В. Сакирко¹, В.М. Домышева¹, О.И. Белых¹, Г.В. Помазкина¹,
М.Н. Шимараев¹, М.В. Панченко^{2*}

¹Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3
²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 28.01.2009 г.

По результатам судовых измерений, проведенных в пелагиали Байкала в мае–июне и сентябре 2008 г., анализируется пространственная и сезонная изменчивость направления потоков углекислого газа в системе «вода–атмосфера». Основной поток CO₂ в мае–июне направлен в атмосферу, а в сентябре наблюдается его сток на водную поверхность. Выявлена связь биомассы фито- и пикопланктона с содержанием углекислого газа и биогенных элементов в воде озера. Показано, что роль видовой смены биоты является основным фактором, определяющим сезонную изменчивость направления потока углекислого газа.

Ключевые слова: газообмен, углекислый газ, фито- и пикопланктон, пелагиаль, биогенные элементы.

Введение

Многолетние гидрохимические исследования, проводившиеся на Байкале в 50–90 гг. XX в., позволили получить пространственную картину изменчивости основных химических составляющих и концентрации растворенных газов в воде Байкала [1]. Применительно к современным проблемам исследования газообмена одного из самых важных парниковых газов – CO₂ – в системе «вода–атмосфера» на Байкале следует отметить, что необходимы дополнительные измерения, которые бы помогли обеспечить определение эмпирических характеристик этого процесса. Это обусловлено тем, что в ранее проведенных измерениях концентрации углекислого газа в атмосфере отсутствовали, а все оценки потоков осуществлялись на базе некоторых расчетных величин, ориентирующихся на его среднеглобальные концентрации [2–5].

Принимая во внимание наличие реально существующего межсезонного хода, а также наблюдающегося неуклонного роста углекислого газа в атмосфере, ранее полученные результаты могут рассматриваться только как очень важный этап осмысления

проблемы газообмена, но вряд ли могут быть применимы в современных условиях для более детальных выводов.

На хорошей методической основе, созданной в предыдущие годы [2–5], с 2002 г. нами начаты планомерные комплексные исследования процессов газообмена в системе «вода–атмосфера» оз. Байкал.

Поскольку большинство серий измерений процессов газообмена в наших работах проводится в литорали оз. Байкал [6–9], возникает вопрос о пространственной изменчивости составляющих этого процесса для всей акватории озера. В идеальном случае для решения этой задачи необходимо проведение измерений потоков углекислого газа синхронно в разных точках акватории на протяжении нескольких суток и более в разные гидрологические сезоны.

Очевидно, что для постановки подобного рода исследований потоков углекислого газа необходимы повторяющиеся серии специально организованных судовых наблюдений, которые требуют существенных материальных затрат.

С учетом ограниченных возможностей проведения широкомасштабного специализированного эксперимента нами на первых этапах была поставлена задача измерения пространственного распределения концентрации углекислого газа в приводной атмосфере, поверхностной воде и основных химических и биологических характеристик воды. Необходимо отметить следующие аспекты, которые определили цели настоящей работы и выбор применяемых нами методов. Регламент проведения судовых экспедиций

* Мария Владимировна Сакирко (sakira@lin.irk.ru); Валентина Михайловна Домышева (hydrochem@lin.irk.ru); Ольга Ивановна Белых (belykh@lin.irk.ru); Галина Владимировна Помазкина (galina@lin.irk.ru); Михаил Николаевич Шимараев (shimaraev@lin.irk.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

по акватории Байкала предполагает кратковременное пребывание на каждой из гидрологических станций, что не позволяет воспользоваться камерным методом для измерения потоков. Естественно, что, располагая экспериментальными данными о парциальном давлении углекислого газа в воде и в атмосфере, для оценки потоков можно применить какой-либо из методов расчета (например, [10–13]). Известно, что величина потока может быть рассчитана по следующей формуле:

$$F = k\Delta P_{\text{CO}_2},$$

где $\Delta P_{\text{CO}_2} = (P_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2})$, P_{CO_2} , p_{CO_2} — парциальные давления углекислого газа в поверхностной воде и в приводной атмосфере соответственно; k — коэффициент обмена, зависящий от скорости ветра, температуры и солености воды.

Отметим, что имеющиеся в публикациях у разных авторов эмпирические формулы определения коэффициента обмена очень заметно расходятся и, следовательно, могут привести к неконтролируемым ошибкам в определении потоков. Поэтому на данном этапе наших исследований ограничимся анализом только пространственной изменчивости разности парциальных давлений, которые определяют знак потока и измеряются в проводимом эксперименте.

Материалы и методы

Результаты были получены по данным судовых измерений в пелагиали Байкала в мае–июне и сентябре 2008 г. Схема станций отбора проб воды была такая же, как и в предыдущие годы [14]. Определялись химический состав проб воды, разнообразие, численность и биомасса фито- и пикопланктона, собиралась гидрометеорологическая информация. Химический анализ проб воды был выполнен по общепринятой методике [15, 16]. Фитопланктон фиксировали раствором Утермеля и концентрировали с помощью осадочного метода. Водоросли просчитывали при увеличении в 400 и в 1000 раз на световом микроскопе «Axiovert 200» («Карл Цейс Йена», Германия) в трех повторностях. Для оценки численности автотрофного пикопланктона (APP) пробы фиксировали формалином и фильтровали через поликарбонатные фильтры «Millipore» с диаметром пор 0,22 мкм. Учет проводили с помощью флуоресцентного микроскопа «Olympus BH2» при увеличении в 1250 раз. Концентрация углекислого газа в атмосфере измерялась на уровне 10 м от воды постоянно (с 15-минутным осреднением) в течение каждого рейса с помощью газоанализатора «NDIR Мод. ОПТОГАЗ-500.4С».

Анализ результатов

Весной 2008 г. (29 мая — 8 июня) рейс выполнялся по всей акватории озера с юга на север сразу после схода льда. В северной котловине Байкала еще встречались поля льда. Термическая структура вод озера на этапе весеннего прогрева характеризо-

валась обратной стратификацией при средней температуре водной поверхности в южной котловине 2,8 °С, в средней и северной 2,5 и 1,9 °С соответственно. Активная конвекция привела к формированию верхнего перемешанного слоя, достигавшего глубины 90–110 м, на севере озера глубина слоя 40–50 м. Прозрачность воды по белому диску находилась в пределах 12–18 м, несколько снижаясь в зонах влияния рек Селенги и Верхней Ангары. Физическая прозрачность воды (измерения прозрачностером с базой 10 см) была минимальна (77–83%) в слое конвективного перемешивания и достигала наибольших значений (86%) на глубинах 140–200 м.

Рейс 24–29 сентября 2008 г. был проведен в южной и средней котловинах озера и частично (одна станция) в северной. По температурным условиям он совпал с началом этапа осеннего охлаждения озера. Температура поверхности воды менялась от 7,4 до 11,2 °С, толщина перемешанного эпиплимниона от 10–20 в южной до 16–38 м в средней котловине при нижней границе слоя скачка температуры на глубинах 50–90 м.

На рис. 1, а приведена пространственная картина распределения разницы парциального давления углекислого газа между водой и атмосферой, наблюдавшаяся в мае–июне и сентябре 2008 г. Как видим, в разные гидрологические сезоны по акватории Байкала происходит изменение знака направления потоков углекислого газа.

В весенний период практически везде поток CO_2 направлен из воды в атмосферу, а в период гидрологического лета наблюдается сток в воду. Только физическими характеристиками воды и атмосферы изменение знака потока в эти сезоны объяснить невозможно. Напомним, что парциальное давление углекислого газа в воде обратно пропорционально его растворимости, которая падает при повышении температуры. Следовательно, при постоянстве концентрации CO_2 в воде его давление должно расти по мере прогрева озера. Атмосферное давление углекислого газа в пелагиали озера для массива наблюдений в двух рейсах, в среднем, было постоянно, максимальные вариации не превышали 30 ppm. Отсюда ясно, что причиной изменения амплитуд и знака ΔP_{CO_2} является изменчивость содержания углекислого газа в воде, обусловленная сезонными особенностями жизнедеятельности водной биоты Байкала.

Данные по распределению биогенных элементов приведены на рис. 1, б–г.

Из основных особенностей сезонного хода биогенных элементов отметим, что в весенний период содержание кремния в воде ниже, чем в сентябрьской серии измерений. В изменении концентрации нитратов и фосфатов наблюдается обратная ситуация, их концентрации весной выше, чем в сентябре.

Рассмотрим более детально характер пространственной картины распределения измеренных характеристик для каждого из сезонов.

В мае–июне содержание кремния в поверхностном слое воды было минимальным в средней котловине озера и максимальным — в северной (рис. 1, б).

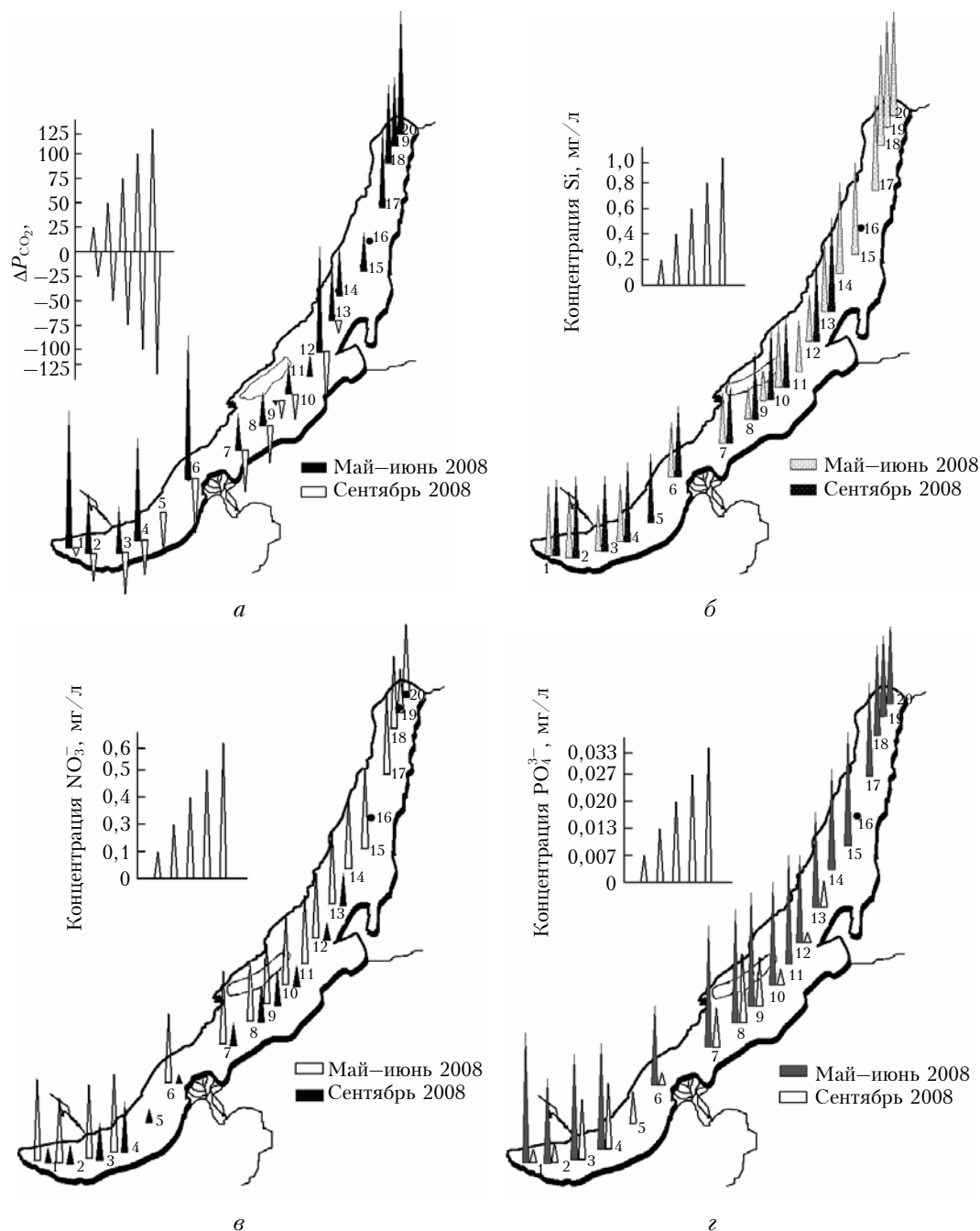


Рис. 1. Пространственное распределение ΔP_{CO_2} между водой и атмосферой (а), концентрации кремния (б), нитратов (в) и фосфатов (г) в поверхностном слое воды пелагиали оз. Байкал в мае–июне и сентябре 2008 г.

В сентябре концентрация кремния в южной котловине возросла в 1,5 раза, в средней — в 2 раза, а в северной котловине осталась практически на уровне мая–июня. Для весеннего цикла измерений характерно почти однородное распределение содержания нитратов в поверхностном слое воды всех котловин Байкала (рис. 1, в), но к сентябрю пространственная картина изменилась, а концентрация NO_3^- снизилась более чем в 2 раза. Минимальная концентрация PO_4^{3-} в мае–июне зарегистрирована в воде северной котловины, а в южной и средней котловинах их содержание было одинаково (рис. 1, г).

В сентябре содержание фосфатов значительно снизилось по всей акватории (на некоторых станциях на порядок величины), минимальные значения наблюдались в средней котловине Байкала. Очевидно, что подобная сезонная динамика содержания биогенных элементов вызвана не только изменением концентрации, но и видового состава планктона.

Обратимся к результатам, представленным на рис. 2, где для трех котловин Байкала приведены значения измеренной биомассы фито- и пикопланктона в слое 0–5 м в разные гидрологические сезоны. Как видим, картина горизонтального распределения

фитопланктона и пикопланктона в мае–июне и сентябре имела существенно разный характер.

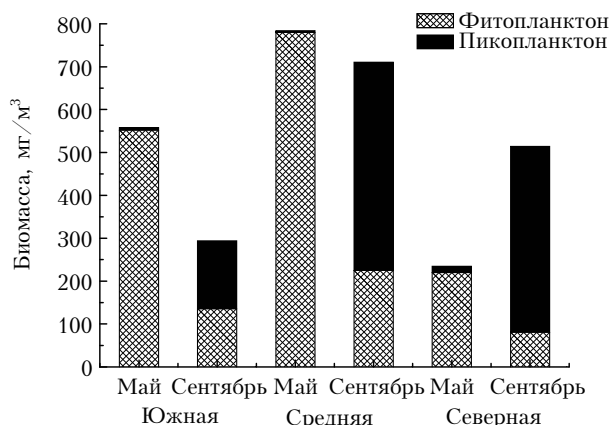


Рис. 2. Средневзвешенная биомасса фито- и пикопланктона в слое воды 0–5 м в котловинах оз. Байкал в разные гидрологические сезоны

В мае–июне в южной и средней котловинах озера массово вегетировала диатомея *Synedra acus* Kütz., максимальная концентрация наблюдалась в средней котловине Байкала (1,9 млн кл/л), что составляло 94% от общей численности фитопланктона. Северная котловина озера характеризовалась низким уровнем развития как диатомового, так и всех видов фитопланктона. В свою очередь, роль АРР в северной котловине была более значимой, чем в южной и средней его частях. В целом, общая биомасса фитопланктона, включая пикопланктон, была выше в средней котловине, в южной наблюдались средние показатели, а в северной – наименьшие.

В сентябре в Байкале доминировали диатомовые водоросли, но уже осенние представители – *Cyclotella minuta* (Skv.) Antipova. По всей акватории биомасса фитопланктона снизилась в 3–4 раза, фитопланктон северной котловины Байкала был самым малочисленным, а максимум осенних значений по-прежнему был получен в средней котловине. Здесь же в средней котловине в сентябре по сравнению с июнем отмечается максимальный уровень развития пикопланктона, биомасса которого увеличилась в 100 раз. В южной и северной котловине биомасса пикопланктона возросла в 30 раз. Минимальными показателями биомассы АРР в сентябре характеризовался Южный Байкал.

Исходя из представленных данных, можно заключить, что в мае–июне, несмотря на большую биомассу диатомового фитопланктона, потребление им углекислого газа, нитратов и фосфатов очень низкое, а кремния – высокое. В сентябре развитие пикопланктона приводит к значительному снижению концентрации как нитратов и фосфатов, так и углекислого газа. Многочисленная литература хорошо документировала огромную роль пикопланктона в создании глобальной первичной продукции в водных экосистемах [17, 18]. Так, в олиготрофных озерах, где значение АРР наиболее велико, от 50 до 70% углерода ежегодно производят

организмы, которые проходят через фильтр с размерами пор 1–2 мкм.

Не углубляясь в тонкие механизмы взаимодействия водной биоты с биогенными элементами и углекислым газом (например, тот факт, что «одним из преимуществ малого размера является менее ограниченное молекулярной диффузией проникновение нутриентов» [19]) для разных гидрологических сезонов, можно оценить роль видовой смены биоты через соотношение между суммарной поверхностью фито- и пикопланктона, которая и является основным физическим фактором, определяющим газообмен в любой системе.

Как следует из рис. 2, в мае–июне вклад пикопланктона в общую биомассу по всей акватории Байкала не превышает нескольких процентов. В сентябре картина кардинально изменяется. В южной котловине доля АРР уже составляет половину всей массы планктона, а на остальной площади даже превышает 70%. Принимая во внимание то, что средний размер фитопланктона на порядок и более превышает размер АРР, легко рассчитать, что в случае равенства масс суммарная поверхность пикопланктона на 2–3 порядка будет больше, чем у фитопланктона.

Соответственно такое увеличение общей поверхности взаимодействия АРР с водой и приводит к усиленному поглощению углекислого газа в сентябре. Мощное потребление CO_2 не успевает компенсироваться потоком из атмосферы, и в поверхностном слое воды в этот сезон наблюдается пониженное парциальное давление углекислого газа, которое и определяет знак ΔP_{CO_2} .

Заключение

Проведенные нами измерения в период двух гидрологических сезонов на акватории оз. Байкал позволили описать пространственную и сезонную изменчивость направления потоков углекислого газа в системе «вода–атмосфера». Показано, что в мае–июне основной поток CO_2 направлен в атмосферу, а в сентябре наблюдается его сток на водную поверхность, что согласуется с данными работы [5].

Анализ биогенных элементов и планктона в воде озера выявил, что в мае–июне, несмотря на большую биомассу диатомового фитопланктона, потребление им углекислого газа, нитратов и фосфатов очень низкое, а кремния – высокое.

Развитие пикопланктона в сентябре приводит к значительному снижению концентрации как нитратов и фосфатов, так и углекислого газа, а отсюда и к смене направления потока. Этот вывод вполне соответствует и результатам работы [20], в которой показано, что летом в Байкале около 80% содержания C^{14} фиксируется фракцией водной биоты размером менее 3 мкм.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 08-05-00258, 09-05-00222) и Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 11 «Оценка, прогноз и методы управления

водными ресурсами с учетом их качества и экологического состояния» (2009–2011 гг.), проект «Роль обменных процессов в системе «вода–атмосфера» в регулировании суточной и сезонной изменчивости химических и биологических характеристик воды озера Байкал».

1. *Вотинцев К.К., Верболова Н.В., Мещерякова А.И.* Горизонтальное распределение некоторых компонентов в верхнем слое воды озера Байкал // *Гидрохимические исследования озера Байкал*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 95–112.
2. *Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н.* Газообмен Байкала с атмосферой в период весеннего прогрева // *Геогр. и природ. ресурсы*. 1996. № 1. С. 74–84.
3. *Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Коровякова И.В., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н.* Газообмен Байкала с атмосферой в осенний период // *Геогр. и природ. ресурсы*. 1998. № 1. С. 61–69.
4. *Мизандронцев И.Б., Шимараев М.Н., Голобокова Л.П., Домышева В.М., Коровякова И.В., Мизандронцева К.Н., Жданов А.А., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Чубаров М.П.* Особенности газообмена Байкала с атмосферой при переходе от весеннего прогрева к летнему // *Геогр. и природ. ресурсы*. 2000. № 3. С. 55–62.
5. *Мизандронцев И.Б., Мизандронцева К.Н.* Газообмен между водной средой и атмосферой (на примере Байкала) // *Вод. ресурсы*. 1995. Т. 22. № 4. С. 439–445.
6. *Домышева В.М., Пестунов Д.А., Панченко М.В., Хохрова О.М., Мизандронцев И.Б., Шмаргунов В.П., Ходжер Т.В., Белан Б.Д.* О связи ритмов изменения содержания углекислого газа в приводном слое воздуха и химического состава воды озера Байкал // *Докл. РАН*. 2004. Т. 399. № 6. С. 825–828.
7. *Заворуев В.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Сакирко М.В., Белых О.В., Поповская Г.И.* Суточный ход газообмена CO₂ и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде озера Байкал // *Докл. РАН*. 2007. Т. 413. № 3. С. 403–407.
8. *Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л.* Экспериментальные исследования процессов газообмена CO₂ в системе «атмосфера–водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) // *Оптика атмосф. и океана*. 2007. Т. 20. № 5. С. 448–452.
9. *Сакирко М.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А.* Суточные ритмы концентрации диоксида углерода в приводном слое воздуха и в поверхностной воде оз. Байкал в разные гидрологические сезоны // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 2. С. 79–86.
10. *Wanninkhof R., McGillis W.R.* A cubic relationship between air–sea CO₂ exchange and wind speed // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 26. N 13. P. 1889–1892.
11. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7373–7382.
12. *Liss P., Merlivat L.* Air–Sea Gas Exchange Rates: Introduction and Synthesis // *The Role of Air–Sea Gas Exchange in Geochemical Cycling*. Washington: Reidel, 1986. P. 113–129.
13. *Nightingale P.D., Malin G., Law C.S., Watson A.J., Liss P.S., Liddicoat M.I., Boutin J., Upstill-Goddard R.C.* In situ evaluation of air–sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers // *Global Biogeochem. Cycles*. 2000. V. 14 (1). P. 373–387.
14. *Заворуев В.В., Домышева В.М., Шимараев М.Н., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В.* Пространственное распределение флуоресцентных характеристик фитопланктона в период формирования весенней гомотермии в оз. Байкал // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21. № 5. С. 377–380.
15. *Строганов Н.С., Бузинова Н.С.* Практическое руководство по гидрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1980. 196 с.
16. *Семенов А.Д.* Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 542 с.
17. *Stockner J.G.* Autotrophic picoplankton in freshwater ecosystems: the view from the summit // *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* 1991. V. 76. N 1. P. 483–492.
18. *Callieri C., Stockner J.G.* Freshwater autotrophic picoplankton: a review // *J. Limnol.* 2002. V. 61. N 1. P. 1–14.
19. *Chisholm S.W.* Phytoplankton size // *Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea*. NY: Plenum Press, 1992. P. 213–237.
20. *Nagata T., Takai K., Kawanobe K., Kim D.-S., Nakazato R., Guselnikova N., Bondarenko N., Mologawa O., Kostornova T., Drucker V., Satoh Y., Watanabe Y.* Autotrophic picoplankton in southern Lake Baikal: abundance, growth and grazing mortality during summer // *J. Plankton Res.* 1994. V. 16. N 8. P. 945–959.

M.V. Sakirko, V.M. Domyшева, O.I. Belykh, G.V. Pomazkina, M.N. Shimaraev, M.V. Panchenko.
To the estimation of spatal variability of CO₂ flow directions at different hydrological seasons at Lake Baikal.

By results of the ship measurements lead in pelagial of Lake Baikal in May–June and September 2008, spatial seasonal variability of a direction of carbonic gas streams in the system «water–atmosphere» is analyzed. Basic stream CO₂ in May–June is directed to the atmosphere, and in September its runoff to the water surface is observed. Connection of biomass of phito- and picoplankton with the contents of carbonic gas and biogenic elements in water of the lake is revealed. It is shown, that the role of specific change of biota is a major factor determining seasonal variability of the direction of the carbonic gas stream.