

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 556.02.637

## Распределение концентрации углекислого газа в поверхностной воде оз. Байкал в весенний период

Д.А. Пестунов<sup>✉1</sup>, М.В. Панченко<sup>1</sup>, В.М. Домышева<sup>2</sup>, М.В. Сакирко<sup>2</sup>,  
А.М. Шамрин<sup>1</sup>, В.П. Шмаргунов<sup>1</sup>, В.Г. Иванов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Лимнологический институт СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

Поступила в редакцию 15.05.2025;

после доработки 14.08.2025;

принята к печати 15.08.2025

Для корректной оценки потоков парниковых газов и глобального цикла углерода остро необходимы хорошо обеспеченные данные об источниках и стоках парниковых газов в системе «поверхность – атмосфера» на различных природных объектах. В статье впервые обобщены результаты судовых измерений концентрации углекислого газа в поверхностной воде по всей акватории озера Байкал, полученные в восьми весенних циклах. Именно весенний период представляет особый интерес для исследований, поскольку из-за большой географической протяженности озера с юга на север после вскрытия ледового покрова идет постепенный прогрев воды, что дает возможность за ограниченную по времени экспедицию провести измерения в условно разные «сезонные периоды». Показано, что на фоне межгодовой изменчивости пространственного распределения концентрации CO<sub>2</sub> в поверхностной воде в этот период она устойчиво снижается от Южной котловины озера к Северной и растет по мере удаления от прибрежной зоны (до глубин менее 200 м) к центральной части акватории. Результаты исследования представляют интерес для специалистов по проблемам климата, а также биологов, поскольку углекислый газ – один из неотъемлемых компонентов углеродного цикла в процессе фотосинтеза водного планктона в воде Байкала.

*Ключевые слова:* углекислый газ, концентрация, озеро Байкал, гомотермия, фитопланктон, коэффициент фотосинтетической активности, котловины озера; dissolved carbon dioxide, concentration, Lake Baikal, homothermy, plankton, coefficient of photosynthetic activity, lake basins.

### Введение

Для корректной оценки вклада различных природных экосистем в глобальные климатические изменения в настоящее время одной из наиболее востребованных задач является получение детальных инструментальных данных об источниках и стоках парниковых газов в системе «поверхность–атмосфера» на различных временных и пространственных масштабах [1–6]. Известно, что в бореальной зоне Северного полушария значительную роль в балансе парниковых газов играют небольшие озера, которые занимают примерно 14% от общей площади, но в пе-

риод освобождения от ледового покрова эмиссия углеродсодержащих газов составляет до 20–25% от всех природных комплексов региона [7–14].

Байкал представляет собой уникальный природный объект, который во многом отличается от всех других водоемов планеты. Следовательно, ритмы температурного режима, продуктивности водного планктона, изменения углеродсодержащих газов в воде озера и их газообмен с атмосферой регулируются гидрологическими и биологическими процессами иного пространственного и временного масштабов.

Настоящая работа является продолжением комплексных исследований по изучению газообмена углеродсодержащих парниковых газов в системе «вода–атмосфера» оз. Байкал (см., например, [15, 16]). В ней анализируются результаты восьми циклов судовых измерений концентрации углекислого газа в поверхностной воде акватории озера в весенние периоды. Исследования пространственного распределения концентраций парниковых газов в это время года, на наш взгляд, представляют большой интерес.

\* Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Валентина Михайловна Домышева (hydrochem@lin.irk.ru); Мария Владимировна Сакирко (sakira@lin.irk.ru); Артём Михайлович Шамрин (shamrin.ar@yandex.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru); Вячеслав Геннадьевич Иванов (vigo@lin.irk.ru).

С началом весны вскрытие ледового покрова и постепенный прогрев поверхности озера происходят неравномерно из-за его большой протяженности с юга на север. Следовательно, за ограниченную по времени экспедицию появляется возможность провести измерения в условно разные «сезонные периоды»: в Южной котловине — «начало летнего формирования водорослей»; в Средней котловине — «весенний сезон», а в Северной — «завершение зимнего сезона».

Термический режим, регулирующий время начала вскрытия рек и темп схода льда в акватории озера, зависит не только от весенней погоды в регионе, но и существенно от температуры и длительности холодного периода года [17]. В свою очередь, на содержании газов в воде и распределении их по пространству озера сказывается весь комплекс гидрологических процессов и собственных ритмов жизнедеятельности водной биоты. Гидрологические и биологические процессы в определенной степени взаимосвязаны, но имеют свою внутреннюю сезонную и межгодовую изменчивость.

Более того, для фитопланктона Байкала характерны не только большие межгодовые и сезонные колебания численности и видового состава, но и неоднородное пространственное распределение их биомассы по акватории озера даже в конкретный период пространственных измерений [18, 19]. Естественно, что совокупность этих факторов воздействует на концентрацию углекислого газа в воде, который является одним из неотъемлемых компонентов углеродного цикла в процессе фотосинтеза водного планктона.

Известно, что в мелководных озерах бореальной зоны в подледный период и до схода льда преобладает процесс деструкции органического вещества и, следовательно, содержание углекислого газа растет. В то же время в воде Байкала (в отличие от малых озер) на период подледного нагрева [17] приходится пик продуктивности фитопланктона [20], и к началу вскрытия ледового покрова наблюдается заметное снижение концентраций углекислого газа и биогенных элементов в воде [21].

Цель настоящей работы — по данным измерений на фоне межгодовой изменчивости выделить наиболее устойчивые особенности пространственного распределения содержания углекислого газа в поверхностной воде оз. Байкал весной.

## Материалы и методы

### *Аппаратура и постановка измерений*

Учитывая, что описание используемой аппаратуры представлено в ряде наших публикаций (см., например, [15, 16]), здесь ограничимся кратким обзором. В состав судового приборного оборудования входят мобильный газоаналитический комплекс (ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН), проточный и лабораторный флуориметры, ультразвуковая метеостанция. В газоаналитическом комплексе опре-

деление концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в поверхностной воде осуществляется проточным многокаскадным эквипратором. Регистрация парциальных давлений газов в приводной атмосфере и эквипраторе проводится одним газоанализатором  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  (с 2013 г. — «Picarro G2301-f», с 2021 г. — «Picarro G4301»). Комплекс работает в режиме часового цикла, в котором по заданной программе выполняется поочередный опрос всех каналов.

Парциальное давление газов в приводной атмосфере измеряется в течение 5–10 мин. Далее на газоанализатор переключается поток воздуха из эквипратора, через который постоянно со скоростью 4–5 л/мин прокачивается вода с глубины 0,2–0,5 м от поверхности (в зависимости от волновой обстановки). Концентрация углекислого газа в воде вычисляется автоматически по данным равновесного парциального давления  $\text{CO}_2$  в замкнутом объеме камеры эквипратора с учетом растворимости при данной температуре, объема прокачиваемой воды и скорости отбора воздуха для измерения в газоанализаторе. Неопределенность измеряемого с периодичностью 1 мин парциального давления углекислого газа в воде не превышает 10%. Следовательно, при скорости судна 15 км/ч пространственное разрешение содержания  $\text{CO}_2$  составляет ~250 м. Флуоресцентные характеристики при непрерывной прокачке поверхностной воды через кювету флуориметра определяются в течение 15 мин. Измерения метеорологических характеристик ультразвуковой метеостанцией ведутся непрерывно.

В каждом рейсе во время стоянки судна на гидрологических станциях проводится отбор проб воды с разных глубин от поверхности до придонной области. Далее в судовых лабораториях оперативно измеряются концентрации кислорода, метана, величины рН (используется для расчета вертикального распределения концентрации  $\text{CO}_2$ ), биогенных элементов и флуоресцентных характеристик, а часть проб фильтруется и замораживается для определения содержания хлорофилла при камеральной обработке.

Обсуждаемые в работе результаты получены в восьми комплексных экспедициях на научно-исследовательском судне «Г.Ю. Верещагин» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала» ЛИН СО РАН) в весенние периоды 2013, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022, 2023 и 2024 гг. На рис. 1 представлены маршруты прохода судна в разные годы, где проводились измерения растворенного углекислого газа. Пропуски в траекториях связаны с регулярными кратковременными переключениями газоанализатора на атмосферный канал, а в некоторых случаях — с обслуживанием газоаналитического оборудования и водных магистралей.

Во всех экспедициях проход судна начинается с южной оконечности озера и далее судно идет в северном направлении до пос. Нижнеангарск. В каждом рейсе отбор проб обязательно проводится на 20 центральных станциях и в нескольких точках

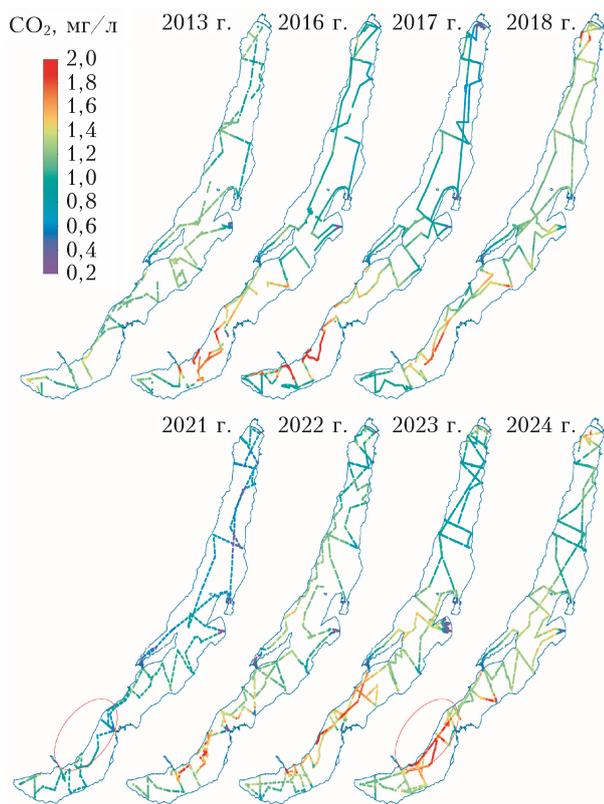


Рис. 1. Пространственное распределение концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде оз. Байкал в весенних экспедициях 2013–2024 гг. (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.10>)

на канонических разрезах при проходе от одного берега до другого (см., например, [15, 16]). Помимо этого, в зависимости от задач разных исследовательских групп, судно останавливается еще на 20–35 станциях. Стоянка судна во время отбора проб в течение одного-двух часов позволяет обеспечить хорошее осреднение измеренных концентраций  $\text{CO}_2$  и показаний проточного флуориметра, поступающих с периодичностью 1 и 15 мин соответственно.

### **Процессы, определяющие концентрацию углекислого газа в поверхностной воде оз. Байкал весной**

При интерпретации результатов измерений концентрации  $\text{CO}_2$  следует учитывать следующие важные аспекты специфики наблюдений в судовых экспедициях по всей акватории оз. Байкал.

1. Ранней весной после постепенного схода ледового покрова (его начало и темп продвижения по акватории во многом зависят от региональных межгодовых изменений погоды в зимний период) идет относительно быстрый, но неоднородный нагрев поверхностной воды. По мере продвижения судна с юга на север (в среднем около 6–7 сут) на различных участках акватории при приближении температуры поверхностной воды к температуре макси-

мальной плотности ( $T = 3,96\text{ }^\circ\text{C}$ ) развивается процесс весенней гомотермии [17], т.е. поступление воды к поверхности из нижележащих горизонтов с повышенным содержанием углекислого газа под действием вертикального обмена. Из рис. 1 видно, что в шести из восьми экспедиций на акватории Южного Байкала в отдельных областях наблюдаются высокие значения  $\text{CO}_2$  от 1,4 до 2 мг/л, которые с определенной вероятностью могут быть обусловлены гомотермией. Однако следует заметить, что даже температура поверхностной воды не может быть основным аргументом наличия этого процесса. В ранний весенний период суточный ход температуры воды в диапазоне 2,5–4 °C (ночное выхолаживание и дневной нагрев) в определенной степени влияет на направление и интенсивность обменного процесса и, следовательно, на изменчивость содержания  $\text{CO}_2$  на поверхности.

Для обоснования того, что на конкретном участке увеличение концентрации газа происходит по причине вертикального обмена, необходимо привлечение дополнительных данных, в первую очередь результатов измерений распределения  $\text{CO}_2$  по глубине. Например, по данным весенней экспедиции 2024 г. на рис. 1 отмечена область на Южном Байкале, где по трассе прохода судна наблюдалось высокое содержание  $\text{CO}_2$ . В этом районе отбор проб по вертикали осуществляется на шести станциях. Для сравнения из восьми серий наблюдений в разные годы были выбраны данные 2021 г., когда здесь регистрировались значительно меньшие концентрации углекислого газа. На рис. 2 приведено вертикальное распределение величины рН от поверхности до 100 м глубины и рассчитанная концентрация  $\text{CO}_2$  для этих двух массивов. Как видим, в измерениях 2021 г. наблюдается хорошо выраженная обратная стратификация содержания  $\text{CO}_2$ , а в 2024 г. уже явно проявляется влияние весенней гомотермии.

2. На Байкале пространственное распределение биомассы фитопланктона в поверхностной воде «имеет пятнистую структуру» [18, 19], перемещение которой во многом зависит от переменчивых скорости и направления ветра. Следовательно, это обстоятельство определяет «случайные» вариации концентраций углекислого газа, регистрируемые на разных участках при проходе судна по акватории.

3. Известно, что фитопланктону в воде озера, как и другим фотосинтезирующим растениям, свойствен суточный ритм продуцирования органического вещества (фотопериодизм) [22, 23]. Кратко отметим ключевые моменты: после восхода солнца начинается процесс фотосинтеза и потребление  $\text{CO}_2$  начинает превышать его выделение в результате дыхания и деструкции органического вещества; в полуполуденное время интенсивность фотосинтеза снижается и постепенно в воде растет концентрация углекислого газа, которая достигает максимума к началу следующего восхода. В исследованиях фотосинтетической деятельности биоты широко

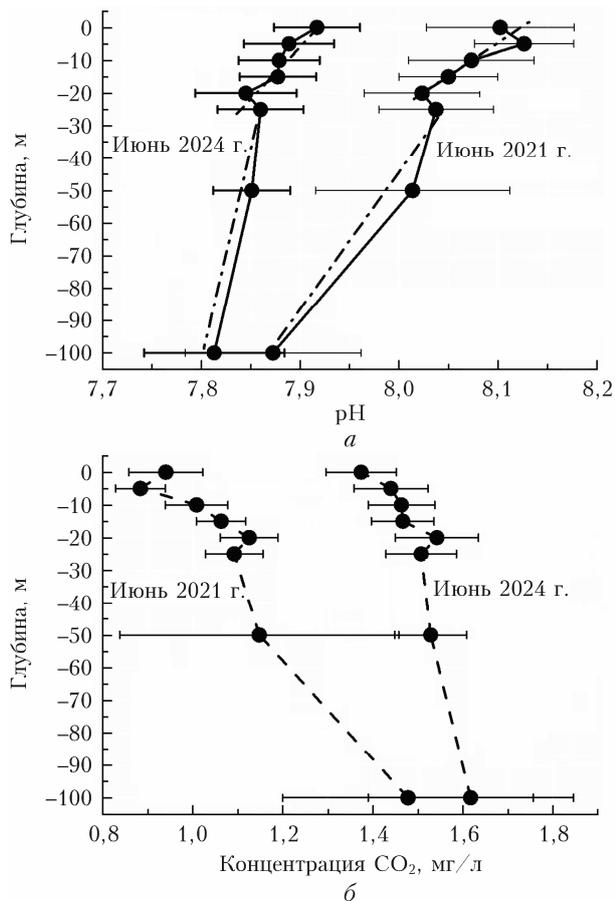


Рис. 2. Сравнение вертикального распределения pH (а) и рассчитанной концентрации CO<sub>2</sub> (б) на шести станциях отбора проб в Южном Байкале в экспедициях 2021 и 2024 гг.

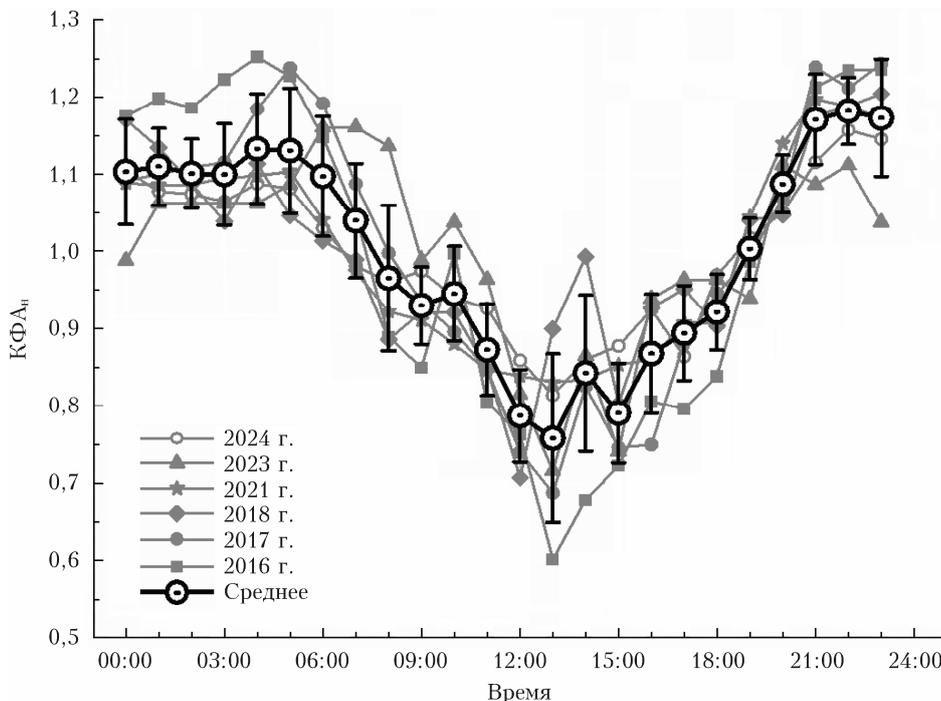


Рис. 3. Суточный ход коэффициента фотосинтетической активности, нормированного на среднее за измерительный цикл

используются различные методы измерения флуоресцентных характеристик (например, [24–30]). В настоящей работе интенсивность процессов фотосинтеза водной биоты оценивается по вариабельной флуоресценции или коэффициенту фотосинтетической активности (КФА).

Специфика маршрутных экспедиций такова, что флуоресцентные характеристики регистрируются в разное время суток в разных точках пространства. Во время измерений при перемещении судна по акватории наблюдаются значительные вариации концентраций, видового состава планктона, температур и т.п., что, несомненно, отражается на величине измеряемых флуоресцентных характеристик. Однако представленный на рис. 3 КФА, нормированный на среднее значение за весь цикл измерений в каждой экспедиции, отчетливо показывает хорошо выраженный суточный ход фотосинтетической активности. Следовательно, и этот процесс необходимо принимать во внимание при анализе результатов.

4. В разное время на отдельных участках акватории могут происходить относительно кратковременные вариации температуры воды и концентрации CO<sub>2</sub> под воздействием изменений погодных условий (ветровое перемешивание верхнего слоя воды, выпадение осадков, чередование облачных и солнечных дней и т.д.). Поэтому результаты, полученные на каждом участке трассы и в разное время суток, которые определяются спецификой межгодовой изменчивости содержания CO<sub>2</sub> в поверхностной воде, в определенной степени будут завуалированы из-за влияния сложной совокупности этих относительно быстро протекающих процессов.

## Результаты и обсуждение

Известно, что Байкал разделен поднятиями дна на три котловины (например, [31]). В каждой из них содержание биогенных элементов, планктона и растворенных газов в воде (например, [10]) обусловлено спецификой температурного режима, особенностями вертикального водного обмена, а также горизонтальной циркуляцией вод, связанной с особенностями полей течений и ветрового режима [32]. По схеме регулярных судовых экспедиций граница между Южной и Средней котловинами проходит по разрезу «мыс Красный Яр – протока Харауз» (центральная станция № 6), а между Средней и Северной котловинами – по широте станции № 12 «Академический хребет».

На рис. 4 приведены результаты измерений температуры и концентрации углекислого газа в поверхностной воде на 20 центральных станциях, полученные в экспедициях 2013–2024 гг. Видно, что на фоне большого диапазона межгодовой изменчивости вполне отчетливо проявились следующие характерные черты пространственного распределения температуры и концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностной

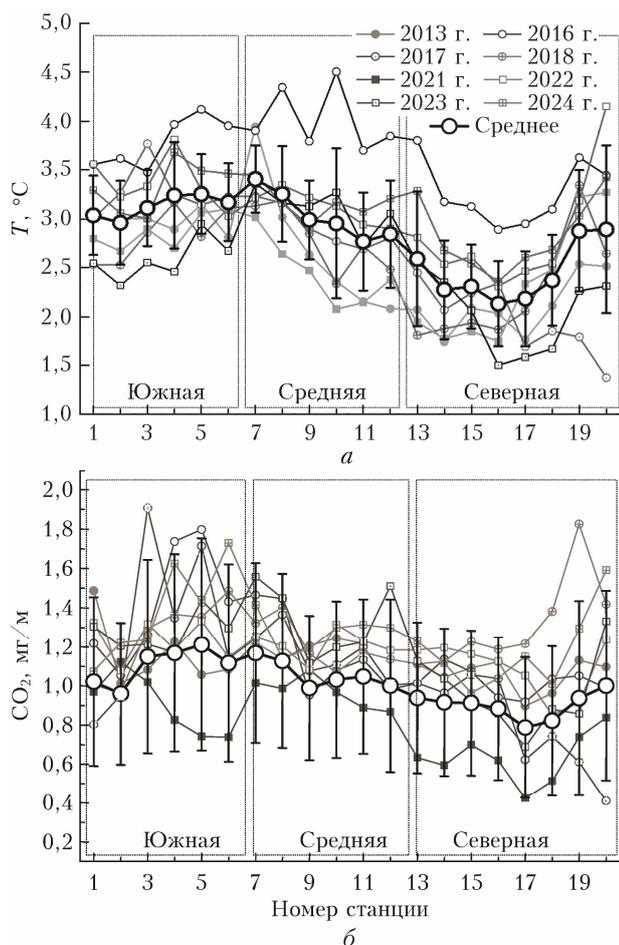


Рис. 4. Температура поверхностной воды (а) и концентрация  $\text{CO}_2$  (б) на 20 центральных станциях в разных котловинах Байкала; станция № 1 (12 км от пос. Култук), № 20 (7 км от Нижнеангарска) (б)

воде по центру акватории Байкала. В Южной котловине по мере продвижения в северном направлении увеличивается температура и концентрация углекислого газа, затем при переходе в Среднюю и Северную котловины их значения снижаются вплоть до северной оконечности озера, где в области небольших глубин наблюдается их рост.

### Межгодовая изменчивость пространственного распределения концентрации углекислого газа в поверхностной воде

Прежде чем приступить к обсуждению результатов, необходимо отметить следующие особенности проведения наблюдений в разные годы. В общей базе данных, полученных в восьми весенних циклах, содержится 87700 значений концентрации  $\text{CO}_2$ . В каждой экспедиции обязательно проводились измерения только на 20 центральных станциях. Количество других станций (измерений во время стоянки судна) и трассы прохода судна по акватории озера несколько различались в разные годы и зависели от программы комплексных исследований (см. рис. 1). Во время работ на гидрологических станциях в течение 1–1,5 ч регистрировалось от 50 до 80 отсчетов, а при различных скоростях движения судна – от 4 до 10 на 1 км пути.

Для того чтобы урвать статистический вес регистрируемых данных по пространству, для каждого измерительного цикла была осуществлена следующая процедура. Всю акваторию Байкала разбили на сегменты (ячейки) размерами  $0,01^\circ$  по широте ( $1,11$  км) и  $0,02^\circ$  по долготе ( $1,25$ – $1,38$  км). По данным отдельных весенних циклов было сформировано восемь подмассивов, в которых измеренные концентрации  $\text{CO}_2$  распределялись по соответствующим координатным сегментам. В случае, если в одну ячейку попадало несколько отсчетов, проводился расчет их среднего значения, которое и сохранялось в данном сегменте. В табл. 1 указаны даты начала и окончания измерений в разные годы и количество заполненных ячеек площадью  $1,38$ – $1,52$  км<sup>2</sup> в соответствующем массиве.

Таблица 1

Количество сегментов, в которых проводились измерения в каждом цикле, и доля исследованной площади от всей акватории озера

Период	Количество сегментов, шт.	Доля исследованной площади, %
29.05–7.06.2013 г.	1359	6,3
25.05–6.06.2016 г.	1445	6,7
26.05–5.06.2017 г.	1726	8,0
25.05–6.06.2018 г.	1755	8,2
1.06–13.06.2021 г.	1363	6,3
4.06–14.06.2022 г.	1681	7,8
30.05–12.06.2023 г.	2062	9,6
30.05–14.06.2024 г.	2001	9,3

Как видно из рис. 5, а, на фоне заметной межгодовой изменчивости осредненных по котловинам значений концентрации  $\text{CO}_2$  проявляется тенденция снижения концентрации от Южной к Северной котловине. Следует отметить, что максимальные концентрации  $\text{CO}_2$  в каждой из котловин наблюдались в разных весенних массивах (в Южной (1,43 мг/л) в 2016 и 2024 гг.; в Средней (1,25 мг/л) в 2023 г. и в Северной (1,23 мг/л) в 2018 г.). По-видимому, это указывает на определенную специфику межгодового развития совокупности гидрохимических и биологических процессов, происходящих весной разных котловинах.

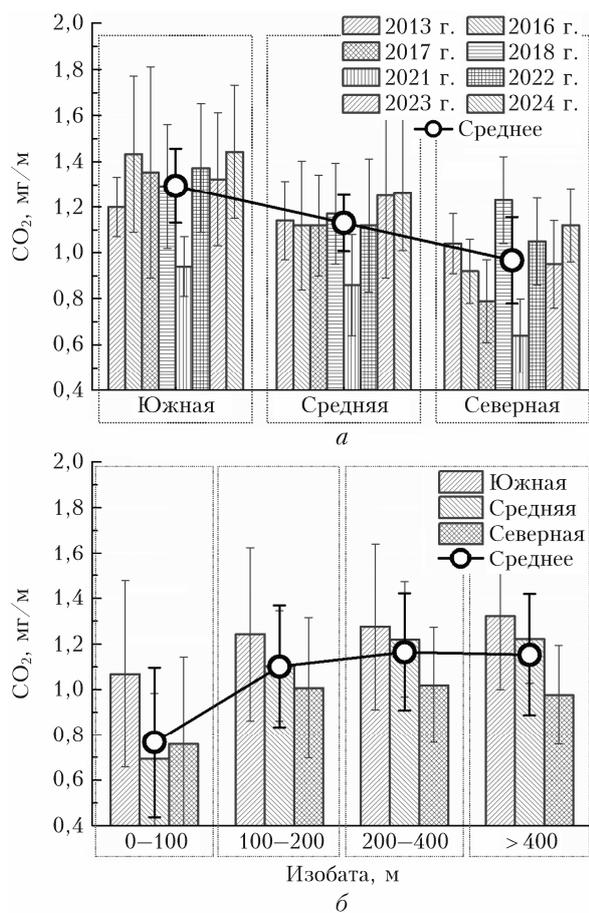


Рис. 5. Межгодовая изменчивость средних концентраций  $\text{CO}_2$ , группированных по котловинам Байкала, в восьми весенних экспедициях (а); средняя за восемь циклов концентрация  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде в области разных глубин (б)

Известно, что в период весеннего прогрева на разных участках акватории озера интенсивность гидродинамических и биологических процессов зависит от их глубины. На рис. 5, б приведены средние концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде за восемь весенних экспедиций в области разных глубин в трех котловинах. Как видим, по мере удаления от прибрежной зоны (диапазон глубин 0–100 м) до глубин > 200 м во всех котловинах наблюдается тенденция увеличения концентрации  $\text{CO}_2$ : в Южной котловине среднее содержание  $\text{CO}_2$  изменяется

от 1,06 до 1,25–1,35 мг/л, в Средней – от 0,70 до 1,1–1,2 мг/л, в Северной – от 0,75 до 0,95–1,05 мг/л.

### Пространственное распределение концентрации углекислого газа в поверхностной воде

Для того чтобы снизить вклад межгодовой изменчивости при определении наиболее устойчивых особенностей пространственного распределения концентрации углекислого газа в поверхностной воде акватории Байкала весной, был сформирован «результатирующий массив». Здесь по всей совокупности результатов измерений в тех же сегментах координатной сетки, что и на предыдущем этапе анализа, была рассчитана средняя концентрация  $\text{CO}_2$  по суммарным данным, полученным в весенних циклах 2013–2024 гг. Созданный таким искусственным способом «результатирующий массив» состоит из 7080 ячеек, каждая из которых содержит только одно среднее значение концентрации  $\text{CO}_2$ , и покрывает 10418 км<sup>2</sup>, или 33% от всей площади зеркала озера.

В табл. 2 приведены средние концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде в областях разных глубин, их суммарная площадь, охваченная нашими измерениями, и процентная доля от общей площади акватории Байкала для соответствующих диапазонов глубин озера.

Таблица 2

Концентрация растворенного  $\text{CO}_2$  в диапазоне разных глубин

Диапазон глубин, м	Средняя концентрация (медиана) $\text{CO}_2$ , мг/л	Площадь, км <sup>2</sup>	Доля от площади акватории между изобатами, %
0–100	0,77 ± 0,32 (0,749)	617,4	26,8
100–200	1,10 ± 0,26 (1,085)	430,1	26,6
200–400	1,16 ± 0,26 (1,164)	1068,2	34,8
> 400	1,15 ± 0,26 (1,148)	8302,1	35,5

На рис. 6 приведена карта пространственного распределения концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде оз. Байкал, построенная по данным «результатирующего массива».

На карте отражены наиболее устойчивые особенности пространственного распределения концентрации углекислого газа в поверхностной воде озера весной. В глубинной части Южной и Средней котловин наиболее часто наблюдаются области с повышенным содержанием растворенного  $\text{CO}_2$ . Весенний прогрев поверхностных вод до 3,5–4 °С в этом районе создает условия возникновения гомотермии, при которой в результате вертикального перемешивания на поверхность поступают глубинные воды, насыщенные  $\text{CO}_2$ . В Северной котловине еще не достигнуты условия для вертикального перемешивания и после схода ледового покрова в поверхностном слое сохраняется пониженное содержание растворенного  $\text{CO}_2$ .

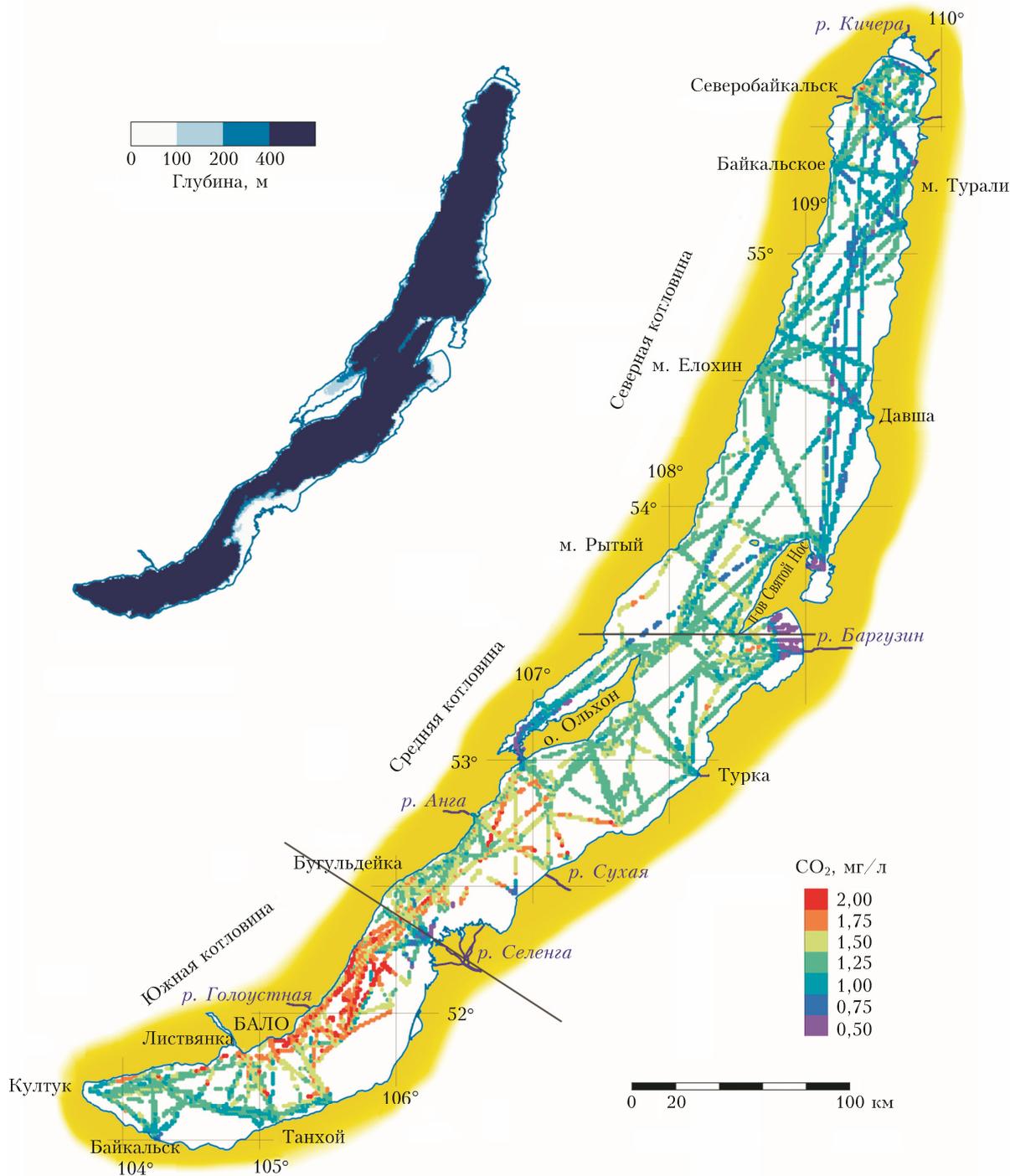


Рис. 6. Пространственное распределение концентрации растворенного углекислого газа в поверхностной воде оз. Байкал

### Заключение

В работе впервые по данным экспедиционных измерений 2013, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022, 2023 и 2024 гг. определены наиболее устойчивые особенности пространственного распределения концентрации углекислого газа в поверхностной воде всей акватории Байкала. Показано, что для весеннего периода характерно снижение средних концентраций  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде при переходе от

Южной котловины озера ( $1,32 \pm 0,31$  мг/л) к Средней ( $1,17 \pm 0,26$  мг/л) и далее к Северной ( $0,98 \pm 0,20$  мг/л). Выявлено, что весной по всей акватории Байкала по мере удаления от прибрежной зоны (глубины до 100 м) наблюдается рост концентрации  $\text{CO}_2$  от 0,77 до 1,15–1,16 мг/л.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность экипажам экспедиционного научно-исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» и всем участникам экспедиций – коллегам из ЛИИ СО РАН.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзаданий ИОА СО РАН (№ 121031500342-0) и ЛИИ СО РАН (№ 121032300199-9).

### Список литературы

1. *Мохов И.И.* Российские климатические исследования в 2019–2022 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2023. Т. 59, № 7. С. 830–851. DOI: 10.31857/S0002351523070106.
2. *Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Докл. РАН. 2019. Т. 488, № 1. С. 74–80.
3. *Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации* / под ред. А.А. Романовской. М.: ИГКЭ, Принт, 2023. 343 с.
4. *Arshinov M., Belan B., Belikov D., Davydov D., Fofonov A., Machida T., Sasakawa Motoki.* Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at tower network in Siberia during 2005–2016 // Atmosphere. 2019. V. 10, N 11. P. 689. DOI: 10.3390/atmos10110689.
5. *Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verschoor A.M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54, N 6. Part 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6\_part\_2.2298.
6. *Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I.C., Peylin P., Rödenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schmullius C.* Estimating the carbon balance of central Siberia using landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and dynamic global vegetation models // Glob. Change Biol. 2011. V. 17. P. 351–365. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02275.x.
7. *Alin S.R., Johnson T.C.* Carbon cycling in large lakes of the world: A synthesis of production, burial, and lake–atmosphere exchange estimates // Glob. Biogeochem. Cycl. 2007. V. 21, N GB3002. DOI: 10.1029/2006GB002881.
8. *Cole J.J., Caraco N.F.* Atmospheric exchange of carbon dioxide in low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub> // Limnol. Oceanogr. 1998. V. 43. P. 647–656. DOI: 10.4319/lo.1998.43.4.0647.
9. *Jonsson A., Aberg J., Lindroth A., Jansson M.* Gas transfer rate and CO<sub>2</sub> flux between an unproductive lake and the atmosphere in northern Sweden // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, N 9. G04006. DOI: 10.101029/2008JGG000688.
10. *Rantakari M., Kortelaint P.* Interannual variation and climatic regulation of the CO<sub>2</sub> emission from large boreal lakes // Glob. Change Biol. 2005. V. 11. P. 1368–1380. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00982.x.
11. *Sobek S., Algesten G., Bergstorm A.-K., Jansson M., Tranvik L.J.* The catchment and climate regulation of pCO<sub>2</sub> in boreal lakes // Glob. Change Biol. 2003. V. 9. P. 630–641. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00619.x.
12. *Denfeld B., Lupon A., Sponseller R., Laudon H., Karlsson J.* Heterogeneous CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> patterns across space and time in a small boreal lake // Inland Waters. 2020. V. 10. P. 348–359. DOI: 10.1080/20442041.2020.1787765.
13. *Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Pumpanen J., Hari P., Vesala T.* Temporal variations in surface water CO<sub>2</sub> concentration in a boreal humic lake based on high-frequency measurements // Boreal Environ. Res. 2009. V. 14. P. 48–60.
14. *Чунакова А.А., Прасолов С.Д., Морева О.Ю., Прилуцкая Н.С.* Биогенные элементы в разнотипных озерах бореальной зоны // Успехи современного естествознания. 2023. № 10. С. 101–106. DOI: 10.17513/use.38120.
15. *Домышева В.М., Усольцева М.В., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Шимараев М.Н., Поповская Г.И., Панченко М.В.* Пространственное распределение потоков углекислого газа, биогенных элементов и биомассы фитопланктона в пелагиали оз. Байкал в весенний период 2010–2012 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 539–545; *Domysheva V.M., Usoltseva M.V., Sakirko M.V., Pestunov D.A., Shimaraev M.N., Popovskaya G.I., Panchenko M.V.* Spatial distribution of carbon dioxide fluxes, biogenic elements, and phytoplankton biomass in the pelagic zone of Lake Baikal in spring period of 2010–2012 // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 529–535.
16. *Пестунов Д.А., Шамрин А.М., Домышева В.М., Сакирко М.В., Панченко М.В.* Пространственное распределение метана в поверхностной воде оз. Байкал в весенний период // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 12. С. 1038–1045. DOI: 10.15372/AOO20231211; *Pestunov D.A., Shamrin A.M., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Panchenko M.V.* Spatial distribution of methane concentration in Baikal surface water in the spring period // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 2. P. 281290.
17. *Шимараев М.Н.* Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977. 149 с.
18. *Поповская Г.И., Усольцева М.В., Фурсова А.Д., Лиховай Е.В.* Оценка состояния весеннего фитопланктона в озере Байкал // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 83–88.
19. *Bondarenko N.A., Ozersky T., Obolkina L.A., Tikhonova I.V., Sorokovikova E.G., Sakirko M.V., Potapov S.A., Blinov V.V., Zhdanov A.A., Belykh O.I.* Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal // Limnologica. 2019. V. 75. P. 19. DOI: 10.1016/j.limno.2019.01.002.
20. *Бондаренко Н.А., Оболкина Л.А., Тимошкин О.А.* Лед – хранитель жизни // Наука из первых рук. 2004. № 1. С. 76–83.
21. *Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Шамрин А.М., Панченко М.В.* Углекислый газ, кислород и биогенные элементы в подледной воде литорали Южного Байкала (2004–2016 гг.) // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1073–1079. DOI: 10.15372/AOO20161211; *Domysheva V.M., Pestunov D.A., Sakirko M.V., Shamrin A.M., Panchenko M.V.* Carbon dioxide, oxygen, and biogenic elements in subglacial water in the littoral zone of Southern Baikal (2004–2016) // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 277–283.
22. *Одум Ю.* Экология. Т. 1–2. М.: Прогресс, 1986. 620 с.
23. *Back R.C., Bolgrin D.W., Gusenikova N.E., Bondarenko N.A.* Phytoplankton photosynthesis in Southern Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 1991. V. 17, N 2. P. 194–202. DOI: 10.1016/S0380-1330(91)71356-7.
24. *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.

25. Пестунов Д.А., Шамрин А.М., Домышева В.М., Сакирко М.В., Панченко М.В. Суточный ход потока и парциального давления углекислого газа в поверхностной воде в координатах «солнечного времени» (период открытой воды в литорали Южного Байкала 2004–2015 гг.) // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 160–169. DOI: 10.15372/AOO20170209; Pestunov D.A., Shamrin A.M., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Panchenko M.V. Diurnal behavior of the flux and partial pressure of carbon dioxide in the surface water in solar time coordinates (the period of open water in the South Baikal littoral in 2004–2015) // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 372–381.
26. Анонасенко А.Д., Сидько Ф.Я., Балакчина Л.А. Флуоресцентный метод и аппаратура для изучения пространственного распределения фитопланктона // Биология внутренних вод. 1995. № 98. С. 53–57.
27. Маторин Д.Н. Использование флуоресцентных методов измерения активности фотосистемы II при биомониторинге фитопланктона // Биофизика. 2000. Т. 45, № 3. С. 491–494.
28. Левин Л.А., Заворуев В.В., Гранин Н.Г., Шимарев М.Н. Характеристики пространственно-временной изменчивости полей температуры и флуоресценции хлорофилла деятельного слоя оз. Байкал // Сибир. экологич. журн. 1996. № 5. С. 373–386.
29. Заворуев В.В., Анонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Качин С.В. Исследование корреляционных зависимостей физиологического состояния фитопланктона с флуоресцентными откликами на основе использования его максимального и стационарного параметров // Записки Горного института. 2001. Т. 149. С. 71–74.
30. Заворуев В.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Панченко М.В. Суточный ход потоков CO<sub>2</sub> в системе атмосфера–вода и вариабельной флуоресценции фитопланктона в период открытой воды на оз. Байкал по данным многолетних измерений // Докл. РАН. 2018. Т. 479, № 5. С. 574–577. DOI: 10.7868/S086956521811021X.
31. Тулохонов А.К., Грачев М.А., Пронин В.Н., Головина О.И., Батоев В.Б., Ширанова Г.С., Раднаева Л.Д., Болданова Н.Б., Хажеева З.И., Дмитриева Н.Г. Часть II. Озеро Байкал: среда обитания, биота и экосистема. Глава 25. Экологический мониторинг Байкала // Байкал: природа и люди: энциклопедический справочник / под ред. А.К. Тулохонова. Улан-Удэ: ЭКОС. Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 518–528.
32. Верболов В.И. Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 4. С. 413–423.

*D.A. Pestunov, M.V. Panchenko, V.M. Domysheva, M.V. Sakirko, A.M. Shamrin, V.P. Shmargunov, V.G. Ivanov. Spatial distribution of carbon dioxide concentration in Baikal surface water in spring.*

Correct assessments of greenhouse gas fluxes and the global carbon cycle require well-provided data on greenhouse gas sources and sinks in the surface – atmosphere system at various natural sites. The article summarizes the results of shipboard measurements of carbon dioxide concentration in surface water throughout the water area of Lake Baikal received in eight spring campaigns of Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. Spring period is of particular interest for research, since due to the large geographical extent of the lake from south to north, after the opening of the ice cover, the water gradually warms up. This makes it possible to take measurements in relatively different “seasons” during a time-limited expedition. Against the background of a noticeable interannual variability in the spatial distribution of CO<sub>2</sub> concentration in surface water in spring, its decrease from the Southern to the Northern basins of the lake is pronounced. While moving away from the coastal zone to the central part of the water area (to depths of more than 200 m), the concentration of dissolved carbon dioxide increases. The results of the study are of interest to specialists in climate issues and biologists, since carbon dioxide is one of the integral components of the carbon cycle during photosynthesis of aquatic plankton in the Baikal water.