

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 556.02.637

Пространственное распределение метана в поверхностной воде оз. Байкал в весенний период

Д.А. Пестунов¹, А.М. Шамрин¹, В.М. Домышева²,
М.В. Сакирко², М.В. Панченко^{✉ 1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зueva, 1

²Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

Поступила в редакцию 26.07.2023 г.;

после доработки 13.09.2023 г.;

принята к печати 24.10.2023 г.

Представлены результаты исследования пространственного распределения концентрации метана в поверхностной воде оз. Байкал в весенний период. Основой послужили данные измерений, которые впервые были проведены в режиме круглосуточной непрерывной регистрации содержания CH_4 по всей трассе прохода исследовательского судна в комплексных экспедициях ЛИН СО РАН в весенние сезоны 2013, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022 гг. По результатам шести экспедиций сформирован объединенный массив данных из 12100 сегментов (шаг $0,005^\circ$ по широте и $0,01^\circ$ долготы), суммарная площадь которых составила $4466,7 \text{ км}^2$, или 14% от поверхности оз. Байкал. Расчет статистических характеристик был осуществлен в четырех зонах: между изобатами 0 и 100 м, 100 и 200 м, 200 и 400 м, свыше 400 м. Проведенное сравнение концентраций метана в анализируемом массиве с данными других исследователей, полученными в разные годы на близких участках акватории, позволило заключить, что представленные в работе результаты адекватно отражают наиболее устойчивые особенности пространственной картины распределения концентрации CH_4 в поверхностной воде оз. Байкал в весенние сезоны.

Ключевые слова: озеро Байкал, парниковый эффект, климат, концентрация, метан, поверхностная вода, кислород, биогенные элементы, парциальное давление, эквипотенциал, изобаты; Lake Baikal, greenhouse effect, climate, concentration, methane, surface water, oxygen, biogenic element, partial pressure, equilibrator, isobath.

Введение

Метан является неотъемлемой составляющей углеродного цикла в природной системе Земли [1–3]. Это парниковый газ, который интенсивно поглощает тепловое излучение Земли в инфракрасной области спектра [4–6]. В последние годы при выборе приоритетных мер по предотвращению возможных негативных последствий изменения климата заметное внимание уделяется именно метану в рамках идеи о том, что антропогенные выбросы «короткоживущих факторов изменения климата» легче регулировать и сократить [7, 8]. Источники метана, поступающего в атмосферу, многочисленны, но большая его часть имеет биогенное происхождение [1]. Слабая обеспеченность данными натурных измерений

приводит к тому, что модельные оценки естественных источников метана даже в глобальном масштабе характеризуются большим разбросом [3, 4]; значительные неопределенности тем более отмечаются на региональном уровне [6, 9].

Учитывая уникальность водной экосистемы Байкала, площадь которого более $31,5 \text{ тыс. км}^2$, и огромную территорию водосбора (порядка 570 тыс. км^2) [10], можно полагать, что озеро является одним из значимых природных источников метана в регионе. В 1990-х гг. на Байкале были начаты исследования процессов образования метана в донных осадках [11] и распределения концентрации метана в воде и донных отложениях [12]; обнаружены газогидраты в осадочной толще озера [13, 14]. К настоящему времени специалисты располагают большим объемом информации о пространственном распределении содержания метана в поверхностной воде [15], источниках и стоках CH_4 [16–18], процессах образования углеводородных газов микробным сообществом в донных осадках [19–21] и о вертикальном профиле концентрации метана в водной толще [22]. Следует отметить,

* Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru);
Артем Михайлович Шамрин (shamrin.ar@yandex.ru);
Валентина Михайловна Домышева (hydrochem@lin.irk.ru);
Мария Владимировна Сакирко (sakirko@lin.irk.ru);
Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

что все данные были получены по результатам анализа проб воды, отобранных во время стоянок исследовательских судов на отдельных станциях.

Цель настоящей работы — анализ пространственного распределения концентрации метана по данным непрерывных измерений по трассе прохода исследовательского судна по акватории Байкала в весенние периоды 2013, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022 гг.

Материалы и методы исследования

Измерения

В 2013 г. нами впервые были начаты непрерывные круглосуточные измерения содержания CO_2 и CH_4 в приводной атмосфере и поверхностной воде на всей акватории Байкала [23]. Пространственное распределение метана изучалось в ходе комплексных кругобайкальских экспедиций на научно-исследовательских судах (НИС) ЛИН СО РАН в весенний сезон (29.05–7.06.2013 г.; 25.05–6.06.2016 г.; 26.05–5.06.2017 г.; 25.05–6.06.2018 г.; 1.06–13.06.2021 г.; 4.06–14.06.2022 г.). В каждом рейсе осуществлялся отбор проб воды от поверхности до придонной области на одних и тех же 20 центральных станциях [24, 25] и на нескольких поперечных разрезах [23]; в судовой лаборатории оперативно определялись концентрации растворенных газов и биогенных элементов.

Выбор времени проведения измерений основывался на следующих соображениях. Именно весенний период, когда постепенно с юга на север идет прогрев озера и сход ледового покрова [23], характеризуется наиболее сильной пространственно-временной изменчивостью практически всех гидрологических и биологических процессов [26]. В это время на собственные межгодовые и сезонные ритмы водной биоты серьезно влияет температурный режим региона, определяющий темп схода льда озера и вскрытия рек, который, в свою очередь, зависит не только от весенней погоды, но и от температуры и длительности предшествующего холодного периода года. Также в процессе таяния в поверхностные воды озера поступает множество органических и неорганических соединений, накопленных в зимний сезон на большой площади водосбора и ледовом покрове Байкала [27]. Этот сложный комплекс процессов, проявляясь наиболее сильно в прибрежной зоне, сказывается и на всей акватории озера.

Необходимо отметить, что описываемая серия экспедиций была проведена в период, когда на Байкале наблюдались межгодовые вариации уровня воды большой амплитуды. В 2013 г. завершился продолжительный относительно стабильный период. С наступлением экстремально маловодных лет 2014–2017 гг. уровень воды начал снижаться и достиг минимальной отметки в весенне-летние сезоны 2016–2017 гг., затем в теплый сезон 2018 г. начался его рост [28] и к 2021–2022 гг. уровень

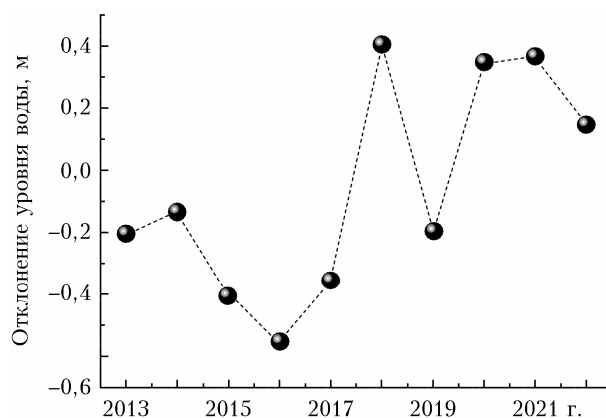


Рис. 1. Отклонение уровня воды в Байкале от среднего за период проведения экспедиций с 2013 по 2022 г. 456,2 м (<https://allrivers.info/gauge/baykal>)

воды приблизился к максимальным значениям (<https://allrivers.info/gauge/baykal>) (рис. 1).

Аппаратура

Описание используемых приборов и основные методические аспекты представлены в [23]. Здесь кратко напомним состав мобильного комплекса, обеспечивающего регистрацию парциальных давлений углекислого газа и метана в приводной атмосфере и поверхностной воде. В него входят газоанализатор CO_2/CH_4 «Picarro G2301-f»; селектор на пять пробоотборных каналов (три канала эквиператора + два атмосферных канала); эквиператор, снабженный датчиками температуры и расхода воды; метеостанция; навигатор и система непрерывной подачи поверхностной воды. Комплекс входит в перечень оборудования ЦКП «Атмосфера». Концентрация CH_4 в воде рассчитывалась по результатам измерений парциального давления метана в камере эквиператора и его растворимости при данной температуре. Равновесное парциальное давление метана вычисляется с учетом контролируемой скорости расхода прокачиваемой воды и скорости подачи воздуха в газоанализатор.

Важный методический аспект: в 2013 г. измерение проводилось с эквиператором большого объема, в котором время достижения равновесного давления CH_4 в камере прибора составляло 16 мин [23]. Время измерений на гидрологических станциях гораздо больше (1–2 ч), что гарантирует высокое качество определения парциального давления. Но при движении судна длительность выхода на режим равновесного парциального давления CH_4 существенно сказывается на определении пространственного разрешения распределений концентрации. Анализ [23] показал, что при скорости судна 15 км/ч неопределенность координатной привязки концентрации CH_4 была около 2 км.

В последующих рейсах применялся малообъемный многокаскадный эквиператор. По сравнению с предыдущей версией его конструкция претерпела кардинальные изменения, которые обеспечили

существенное снижение времени достижения равновесного парциального давления исследуемых газов непосредственно в камерах прибора (для метана — менее 3 мин). Также была модернизирована система датчиков, контролирующих расход и температуру потока воды, что позволило усовершенствовать программу обработки данных. В этой конструкции эквипиратора неопределенность измеренного парциального давления метана с использованием контролируемых параметров не превышает 10%, а пространственное разрешение снижено до 200 м при скорости судна 15 км/ч. Очевидно, что в случае быстрого прохода НИС по локальному источнику выхода метана, когда скорость изменения содержания газа в воде превышает скорость релаксации эквипиратора, ошибки заметно возрастают.

Результаты и их обсуждение

Для того чтобы оценить возможное проявление межгодовых изменений в составе поверхностной воды пелагиали озера в целом, в каждом весеннем цикле были рассчитаны статистические характеристики концентраций кислорода и биогенных элементов по массиву данных измерений на 20 центральных станциях в весенних кругобайкальских экспедициях с 2010 по 2022 г. (рис. 2.)

С 2010 по 2022 г. особых межгодовых изменений концентрации кислорода не наблюдается (рис. 2, а). С 2013 г. прослеживается достоверная тенденция снижения концентраций биогенных элементов PO_4^{3-} и Si в поверхностной воде пелагиали (рис. 2, б, в). Детальное изучение совокупности гидрохимических и биологических процессов в этот период представляет собой многоплановую мультидисциплинарную задачу, решение которой требует значительных усилий многих специалистов. Но уже первые публикации [29] показывают, что при сильных вариациях уровня озера наблюдаются изменения содержания биогенных элементов, которые, по мнению авторов, связаны с потеплением климата в регионе оз. Байкал. Применительно к целям настоящей работы можно полагать, что и анализируемые данные в той или иной мере были подвержены влиянию этих процессов, в том числе межгодовых ритмов изменения выноса рек, обусловленных чередованиями маловодных и многоводных периодов.

На рис. 3 (цв. вкладка) представлены результаты регистрации концентрации метана по трассе прохода судна в весенних экспедициях разных лет по акватории Байкала.

Очевидно, что пространственное распределение CH_4 в поверхностной воде во многом определяется региональными и локальными процессами, в первую очередь началом и длительностью постепенного освобождения озера от ледового покрова с юга на север и соответственно динамикой прогрева воды, а на разных участках трассы — ветровым режимом, волновым перемешиванием и т.д. Опуская детальный анализ пространственного распределения

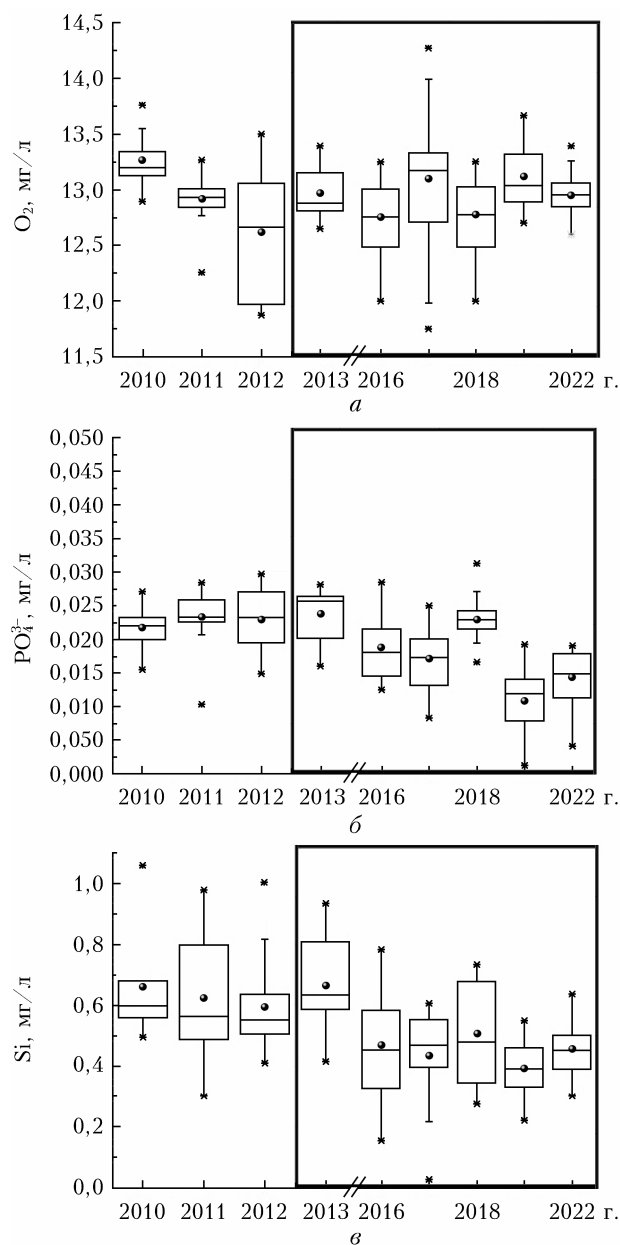


Рис. 2. Статистические характеристики концентраций O_2 (а), PO_4^{3-} (б) и Si (в) в поверхностной воде пелагиали оз. Байкал в весенние сезоны разных лет (осреднение по 20 центральных станциям): точки — средние значения, прямоугольники — 25-й и 75-й процентиля; центральная линия — медиана, крестики — 1 и 99% значений рассматриваемой характеристики

содержанием метана в каждой экспедиции, поскольку это требует отдельного рассмотрения и не входит в задачу настоящей работы, отметим только следующее: несмотря на серьезные межгодовые вариации уровня воды, концентраций некоторых биогенных элементов и погодных условий в шести экспедициях, основные черты пространственной картины распределения содержания метана в разные годы на больших участках акватории озера в целом во многом подобны. Как ранее было

показано в [16, 25], наиболее высокие концентрации CH_4 регистрировались в зонах влияния речных выносов (рис. 3). По мере удаления от побережья содержание метана в поверхностной воде, как правило, существенно снижалось и в области больших глубин в основном варьировало в диапазоне от 70 до 300 нг/л.

На рис. 4 приведены статистические характеристики концентрации CH_4 в поверхностной воде оз. Байкал на 20 центральных станциях, рассчитанные

Пространственное распределение концентрации метана в поверхностной воде Байкала

Основная цель данной работы — выявить наиболее характерные, устойчивые особенности пространственного распределения концентраций метана в поверхностной воде оз. Байкал в весенний период. Но очевидно, что статистическая обеспеченность

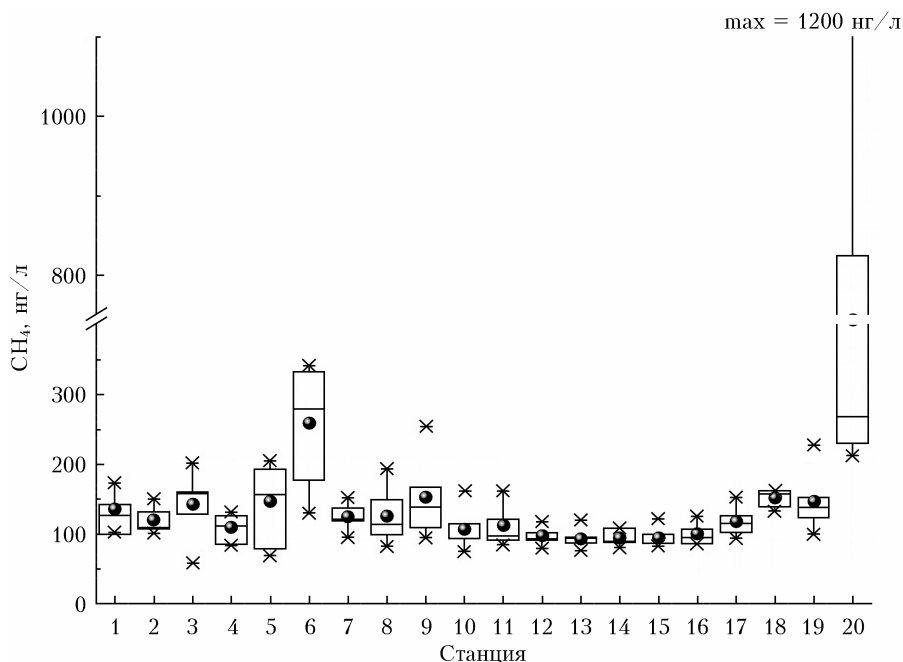


Рис. 4. Статистические характеристики концентрации CH_4 в поверхностной воде оз. Байкал на центральных станциях. Обозначения те же, что и на рис. 2

по массиву данных за шесть рейсов. Как видим, от южной оконечности Байкала (станция № 1 расположена в 15 км от побережья вблизи пос. Култук) до станции № 19 (центр поперечного разреза р. Тья — мыс. Немнянко) содержание метана в поверхностной воде изменяется в достаточно узком диапазоне значений.

Исключение составляют лишь результаты, полученные на станции № 6 (центр поперечного разреза Красный Яр — Харауз), где глубина озера составляет около 260 м, а на состав воды, как правило, сильно влияют выносы р. Селенги, что ведет не только к увеличению содержания CH_4 , но и его большим вариациям. Во время стоянки судна на этой станции в течение 1–1,5 ч иногда наблюдались резкий рост концентрации метана и увеличение температуры поверхностной воды от 2–3 до 10 °С, что является явным признаком поступления речного выноса. Станция № 20, где регистрировались максимальные концентрации CH_4 , зачастую намного превышающие 1000 нг/л, расположена в 7 км от г. Нижнеангарска, и здесь вдоль северного побережья состав воды формируется при постоянном сильном воздействии р. Кичеры и Верхней Ангары.

массива данных на различных участках озера в каждой комплексной экспедиции зависела от трассы прохода судна, которая определялась научной программой, и погодных условий (в целом за шесть рейсов в базе данных 196500 записей). Следовательно, количество зарегистрированных значений CH_4 в конкретной географической точке существенно различалось.

Для того чтобы снизить вклад вариаций концентраций CH_4 , измеренных в конкретном рейсе, которые в значительной степени определялись спецификой погодных процессов на разных участках трассы, и искусственно выровнять статистический вес результатов, полученных при непрерывных круглосуточных измерениях во всех рейсах, нами осуществлена следующая процедура. Акватория Байкала в системе географических координат была разбита на сегменты (ячейки) с шагом 0,005° по широте и 0,01° по долготы. Их размер в южной части озера составил 556 × 7006 м (0,389 км²), а в северной — 5566 × 6216 м (0,345 км²). Далее для каждого рейса измеренные концентрации CH_4 распределялись по ячейкам в соответствии с их координатами,

и в каждой ячейке вычислялась средняя концентрация метана. После этого в каждом сегменте была рассчитана средняя концентрация за шесть рейсов. Таким образом сформированный результирующий массив содержит средние значения растворенного в воде CH_4 в 12100 сегментах, общая площадь которых составляет 4466,7 км², или 14% от всей водной поверхности Байкала.

Такой метод выравнивания статистического веса результатов для каждого сегмента акватории Байкала предполагает, что в конкретной ячейке находится только одно значение концентрации CH_4 . Напомним, что на центральных станциях (см. рис. 4) регистрация сигнала проводится в течение 1–1,5 ч, а в объединенный массив заносится только одно среднее значение. В сегментах, в которых в разных экспедициях измерения концентрации метана проводились неоднократно, также присутствует только средняя величина содержания CH_4 .

Полагаем, что применение такого искусственного, «жесткого» способа выравнивая статистических весов для каждого сегмента в объединенном массиве позволяет выявить именно наиболее устойчивые особенности пространственной картины распределения концентрации метана в поверхностной воде по акватории Байкала в весенний период (рис. 5, цв. вкладка).

Как видим из рис. 5, на значительной части акватории озера большинство значений CH_4 находится в интервале от 80–100 до 200–250 нг/л и наблюдаются внутри изобаты 400 м, в прибрежной зоне концентрации более высокие – 300–500 нг/л. Концентрации порядка 1000–11000 нг/л регулярно регистрировались вблизи выхода крупных рек: Селенга, Кичера, Верхняя Ангара, Баргузин, Турка, Анга, Сухая [23–25].

На фоне этой достаточно типичной картины, которая в общих чертах наблюдалась в каждой из экспедиций, в некоторых рейсах регистрировались аномально высокие концентрации CH_4 (рис. 5, а, б). Впервые сильный выход метана, до 970 нг/л, был обнаружен нами в 2013 г. в 9 км от побережья о-ва Ольхон, где глубина более 1 км (рис. 5, а) [25]. В экспедициях 2016–2018 гг. в этом районе концентрации метана варьировались в диапазоне 120–220 нг/л, но в 2021 и 2022 гг. опять проявились аномально высокие концентрации до 1120 и 1490 нг/л (рис. 5, а). Нам до сих пор не удалось предложить какую-либо правдоподобную гипотезу о возможном источнике метана в этом районе, но надеемся, что наши данные будут полезны для выяснения этого вопроса и постановки специальных экспериментов.

На рис. 5, б приведен фрагмент распределения концентрации метана вблизи вулкана Маленький (51,9200° с.ш. 105,6400° в.д., глубина 1305–1345 м) [30]. Здесь в 2016 г. непосредственно около источника зарегистрировано повышение содержания CH_4 до 1285 нг/л, а в 2021 и 2022 гг. на удалении от него на 5–12 км – от 495 до 1830 нг/л. Очевидно,

что подобные концентрации метана на поверхности были обусловлены не поступлением в виде пузырьков газа (в этой зоне глубины больше 1 км), а быстрым подъемом большой массы воды, обогащенной метаном из-за «извержения» вулкана, спорадические выбросы которого отмечены в работе [30].

Для более подробного анализа были сформированы четыре массива данных, полученных на площади между изобатами: 0 и 100 м (1-й массив), 100 и 200 м (2-й массив), 200 и 400 м (3-й массив) и свыше 400 м (4-й массив). Такое разбиение основано на публикациях других исследователей [21, 22, 30]. От береговой линии до изобаты 100 м концентрация метана в поверхностной воде в основном определяется его поступлением из донных отложений и выносами речной воды на отдельных участках озера [22]. В области глубин 100–200 м снижается влияние малых рек, но продолжается поступление метана из придонной области, в том числе пузырьковыми выходами газа [30]. Между 200- и 400-метровыми изобатами определенный вклад в содержание метана еще вносят выходы CH_4 со дна озера, а максимальные его концентрации на отдельных участках по трассе прохода судна в южной котловине обусловлены выносом р. Селенги, в северной – р. Верхней Ангара и Кичеры [21]. Как показано в [30], на акватории Байкала до глубин менее 380 м зарегистрировано более 120 мелководных придонных источников газа, 90% которых находятся в дельте р. Селенги. При приближении к 400-метровой изобате их влияние заканчивается, поскольку пузырьки практически полностью растворяются на глубине 250–280 м [30]. Область озера внутри изобаты 400 м (74% от всей площади Байкала) условно можно рассматривать как фоновую.

На рис. 6 приведены статистические характеристики концентрации метана, рассчитанные по данным измерений в этих четырех массивах. Видно, что по мере перехода от прибрежной линии в область больших глубин снижаются максимальные,

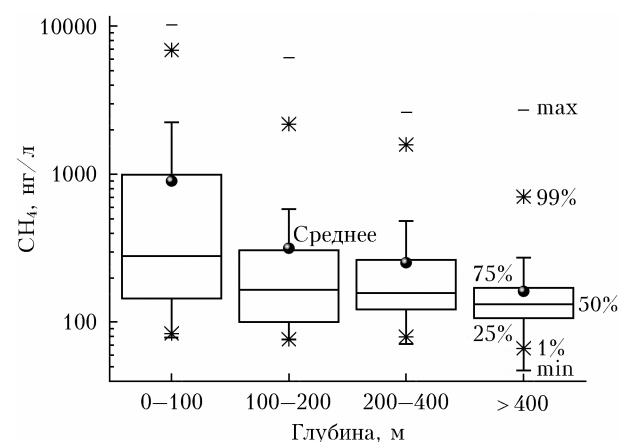


Рис. 6. Статистические характеристики концентрации метана в поверхностной воде Байкала между соответствующими изобатами. Обозначения те же, что и на рис. 2

Средние значения концентрации метана и доверительный интервал на уровне достоверности 99%

Массив данных	Средняя концентрация, нг/л	Доверительный интервал на уровне достоверности 99%, нг/л	Доля массива от всей площади озера, %	Количество ячеек в массиве (их площадь, км ² ; доля от площади в соответствующем массиве, %)
0–100 м* (75% данных от общего массива)	215*	200–230*	9	560 (207; 9)
100–200 м	200	182–219	5	527 (194; 12)
200–400 м	190	181–198	9	1337 (491; 16)
> 400 м	141	140–143	74	9490 (3505; 15)

* Расчет проведен без учета концентраций больше 1000 нг/л.

средние и медианные значения концентрации метана. Нарушает эту тенденцию только 1% максимальных концентраций в 4-м массиве, которые обусловлены отдельными аномальными выходами метана (рис. 5, а, б). Отметим, что минимальные концентрации в первых трех массивах практически одинаковы, но в 4-м массиве достоверно меньше. Этот факт объясняется тем, что именно в области больших глубин во всех рейсах на отдельных участках маршрута наблюдались низкие концентрации CH₄ в диапазоне 50–70 нг/л. И, как было показано в [31], это определялось поступлением в поверхностный слой обедненных метаном вод в процессе вертикального обмена при слабом ветре и развитии весенней температурной конвекции (гомтермии) [31, 32]. В каждом массиве на рис. 6 средние и медианные значения заметно отличаются, следовательно, дальнейший анализ статистических характеристик в предположении нормального распределения нецелесообразен.

На следующем этапе обработки данных был осуществлен расчет статистических характеристик для логарифмов значений концентраций CH₄. Распределение набора данных в 1-м массиве ожидаемо не удалось описать какой-либо функцией. На участках вблизи рек содержание метана в поверхностной воде зависит не только от среднего объема речного выноса, но и от многих локальных процессов вблизи побережья, в том числе от направления и скорости ветра. В 1-м массиве 25% данных было получено при проходе судна в зоне влияния рек, где наблюдались экстремальные концентрации, которые варьировались от 1000 до 10160 нг/л (коэффициент вариации в полном массиве около 65%). Во 2, 3 и 4-м массивах распределение результатов расчетов вполне соответствовало логарифмически нормальному. В таблице приведены результаты оценки средних значений концентрации метана и доверительного интервала на уровне достоверности 99%.

Как видим, по данным наших измерений в области глубин более 100 м на акватории Байкала (около 90% от общей площади озера) средняя концентрация метана в поверхностной воде варьируется в достаточно узком диапазоне от 140 до 220 нг/л. Это вполне согласуется с результатами других исследователей (например, [15–17, 20–22, 30]).

Заключение

В настоящей работе проведен анализ пространственного распределения концентрации метана по всей акватории Байкала в весенний период на основе многолетних непрерывных измерений в шести экспедициях 2013, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022 гг. Определение статистических характеристик осуществлено на основе объединенного массива данных по 12100 сегментам (шаг 0,005° по широте и 0,01° долготы), суммарная площадь которых составила 4466,7 км², или 14% от зеркала оз. Байкала. Благодаря искусственному способу выравнивания статистических весов для каждого сегмента в объединенном массиве, в конкретной ячейке находится только одно значение концентрации CH₄. Этот подход, на наш взгляд, позволяет более наглядно выявить наиболее устойчивые особенности пространственного распределения концентрации метана. Для более подробного описания распределения концентрации метана в поверхностной воде по всей акватории были рассчитаны статистические средние значения и доверительный интервал на уровне достоверности 99% в четырех зонах: между изобатами 0 и 100 м; 100 и 200 м; 200 и 400 м и свыше 400 м. Хорошее согласие значений концентраций метана в анализируемом массиве с данными других исследователей (например, [15–17, 20–22, 30]), полученными в разные годы на близких участках акватории, позволяет заключить, что представленные в работе результаты адекватно отражают наиболее устойчивые особенности пространственного распределения метана в поверхностной воде оз. Байкал в весенние сезоны.

Благодарности. Авторы выражают признательность В.П. Шмаргунову за помощь в создании аппаратуры и благодарность капитанам и экипажам экспедиционного научно-исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» (ЛИН СО РАН) и всем участникам экспедиций — коллегам из ЛИН СО РАН.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий ИОА СО РАН (№ 121031500342-0) и ЛИН СО РАН (№ 121032300199-9).

Список литературы

1. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2010. Т. 93. С. 1–56.

2. Елисеев А.В. Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 52–70. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70.
3. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.F., Langenfelds R.L., Le Quéré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., Van Der Werf G.R., Voulgarakis A., Van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks // Nature Geosci. 2013. V. 6, N 10. P. 813–823.
4. Кароль И.Л., Киселев А.А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. 2004. № 7. С. 1–10.
5. Etmann M., Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43, N 24. P. 12614–12623.
6. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // Метеорол. и гидрол. 2015. № 11. С. 30–41.
7. Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е. Роль метана в современном изменении климата. М.: Изд-во Ин-та глобального климата и экологии им. акад. Ю.А. Израэля, 2018. 106 с.
8. Joint 1st and 2nd IPCC expert meeting on short-lived climate forcer's report of IPCC Expert Meeting 11–22 October 2021. Virtual Meeting. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp> (last access: 24.09.2023).
9. Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahni R., Stocker B.D., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagolev M.V., Maksyutov S., Brovkin V., Chen G., Denisov S.N., Eliseev A.V., Gallego-Sala A., McDonald K.C., Rawlins M.A., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., Zhuang Q., Kaplan J.O. WETCHIMP-WSL: Intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia // Biogeosci. 2015. V. 12, N 11. P. 3321–3349.
10. Атлас. Байкальский регион: общество и природа. М.: Паулсен, 2021. 320 с.
11. Намсараев Б.Б., Дулов Л.Е., Соколова Е.Н., Земская Т.И. Бактериальное образование метана в донных осадках озера Байкал // Микробиология. 1995. Т. 64, № 3. С. 411–417.
12. Федоров Ю.А., Никаноров А.М., Тамбиева Н.С. Первые данные о распределении содержания биогенного метана в воде и донных отложениях озера Байкал // Докл. АН. 1997. Т. 353, № 3. С. 394–397.
13. Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Гелетий В.Ф., Гнилуши В.А., Горегляд А.В., Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Каваи Л., Иошида Н., Лучков А.Д., Пономарчук В.А., Конторович А.Э., Бажин Н.М., Махов Г.А., Дядин Ю.А., Кузнецов Ф.А., Ларионов Э.Г., Мананков А.Ю., Смоляков Б.С., Мандельбаум М.М., Железняков Н.К. Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал // Докл. АН. 1998. Т. 362, № 4. С. 541–543.
14. Гранин Н.Г., Гранина Л.З. Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 7. С. 629–637.
15. Kapitanov V.A., Tyryshkin I.S., Krivolutskii N.P., Ponomarev Yu.N., De Batist M., Gnatovsky R.Yu. Spatial distribution of methane over Lake Baikal surface // Spectrochim. Acta Part A. 2007. N 66. P. 788–795.
16. Schmid M., De Batist M., Granin N.G., Kapitanov V.A., McGinnis D.F., Mizandrontsev I.B., Obzhirav A.I., Wüest A. Sources and sinks of methane in Lake Baikal: A synthesis of measurements and modeling // Limnol. Oceanogr. 2007. V. 52, N 5. P. 1824–1837.
17. Granin N.G., Muyakshin, Makarov M.M., Kucher K.M., Aslamov I.A., Granina L.Z., Mizandrontsev I.B. Estimation of methane fluxes from bottom sediments of lake Baikal // Geo-Marine Letters. 2012. V. 32, N 5. P. 427–436. DOI: 10.1007/s00367-012-0299-6.
18. Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Иванов В.Г., Кучер К.М., Корнева Е.С. Окисление метана в водной толще озера Байкал // Докл. РАН. 2013. Т. 451, № 3. С. 332–335.
19. Павлова О.Н., Букин С.В., Ломакина А.В., Калмычков Г.В., Иванов В.Г., Морозов И.В., Погодаева Т.В., Пименов Н.В., Земская Т.И. Образование углеводородных газов микробным сообществом донных осадков оз. Байкал // Микробиология. 2014. Т. 83, № 6. С. 694–702.
20. Zakharenko A.S., Pimenov N.V., Ivanov V.G., Zemskaya T.I. Detection of methane in the water column at gas and oil seep sites in central and southern Lake Baikal // Mikrobiologiya. 2015. V. 84, N 1. P. 98–106.
21. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Михайленко О.А. Метан в воде и донных отложениях озера Байкал // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 5. С. 511–522.
22. Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Иванов В.Г., Кучер К.М., Корнева Е.С., Гранин Н.Г. Вертикальное распределение метана в водной толще Байкала // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 1. С. 78–85. DOI: 10.31857/S0321059620010101.
23. Пестунов Д.А., Домышева В.М., Иванов В.Г., Шамрин А.М., Панченко М.В. Пространственное распределение направления потоков CO₂ и CH₄ по акватории озера Байкал (кругобайкальская экспедиция, июнь 2013 г.) // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 792–799. DOI: 10.15372/AOO20150904.
24. Сакирко М.В., Домышева В.М., Бельх О.И., Помазкина Г.В., Шимараев М.Н., Панченко М.В. К оценке пространственной изменчивости направления потоков углекислого газа в разные гидрологические сезоны на оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 596–600; Sakirko M.V., Domysheva V.M., Belykh O.I., Pomazkina G.V., Shimaraev M.N., Panchenko M.V. Estimation of the spacial variability of carbonic acid stream direction in different hydrological seasons at Lake Baikal // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 478–482.
25. 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 атмосфер. 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.
26. Поповская Г.И., Усольцева М.В., Фирсова А.Д., Лихошвай Е.В. Оценка состояния весеннего фитопланктона в озере Байкал // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 83–88.
27. Obolkin V.A., Khodzher T.V., Netsvetaeva O.G. Atmospheric precipitation as a source of biogenic elements

- entering the ecosystem of Lake Baikal // *Limnol. Freshwater Biology*. 2020. N 4. P. 868–869. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-868.
28. Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З. Уровенный режим оз. Байкал: состояние и перспективы в новых условиях регламентации // *Вестн. Бурятского гос. ун-та. Биология, география*. 2019. № 1. С. 37–44
 29. Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Sinyukovich V.N., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. Low water level in the Selenga River and reduction of silica input to Lake Baikal // *Inland waters*. 2019. V. 9, N 4. P. 464–470. DOI: 10.1080/20442041.2019.158007.
 30. Макаров М.М., Муякин С.И., Кучер К.И., Асламов И.А., Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г. Пузырьковые выходы газа на дне озера Байкал: эхолокационное наблюдение и оценка потока метана, связь этого потока с высотой газовых факелов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 3. С. 32–41.
 31. Shamrin A.M., Pestunov D.A., Domysheva V.M., Ivanov V.G., Sakirko M.V., Panchenko M.V. Greenhouse gases, nutrients and fluorescent characteristics in Lake Baikal in the zones of spring homothermia formation // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11208. CID: 11208 4E. DOI: 10.1117/12.2540716. 9 p.
 32. Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // *Докл. АН СССР*. 1991. Т. 321, № 2. С. 381–385.

D.A. Pestunov, A.M. Shamrin, V.M. Domysheva, M.V. Sakirko, M.V. Panchenko. Spatial distribution of methane concentration in Baikal surface water in spring period.

The results of describing the spatial distribution of methane concentration in the surface water of Lake Baikal in the spring are presented. The basis was the measurements of CH₄ content which were first carried out in the round-the-clock continuous mode along the entire route of the passage of research vessel in the complex expeditions of LIN SB RAS in the spring seasons of 2013, 2016, 2017, 2018, 2021, and 2022. Based on the results of six expeditions, a data array was compiled; it included 12100 segments (with a step of 0.005° in latitude and 0.01° in longitude) which covered the total area 4466.7 km², or 14% of the Baikal mirror. For a more detailed description of the spatial distribution of methane concentrations in surface water throughout the Baikal water area, the statistical characteristics were calculated in four zones: between 0 and 100 m, 100 and 200 m, 200 and 400 m, and over 400 m isobaths. The comparison of the methane concentrations in the analyzed array with the data of other researchers obtained in different years in close regions of the water area made it possible to conclude that the results presented in the work adequately reflect the most stable features of the spatial distribution of methane concentration in surface water in spring seasons.

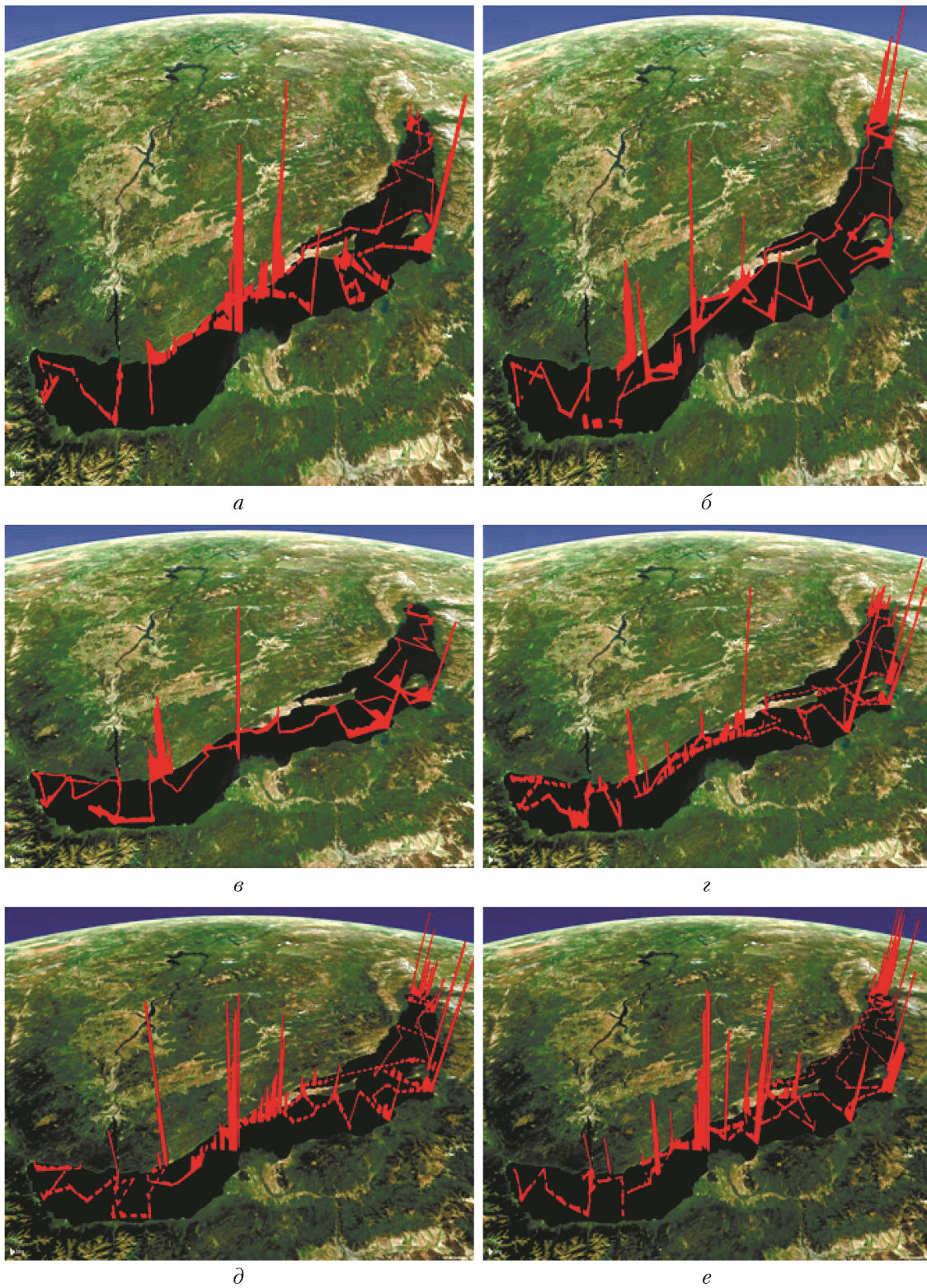


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации метана (нг/л) в поверхностной воде оз. Байкал в весенних рейсах:
a – 2013 г.; *б* – 2016 г.; *в* – 2017 г.; *г* – 2018 г.; *д* – 2021 г.; *е* – 2022 г.

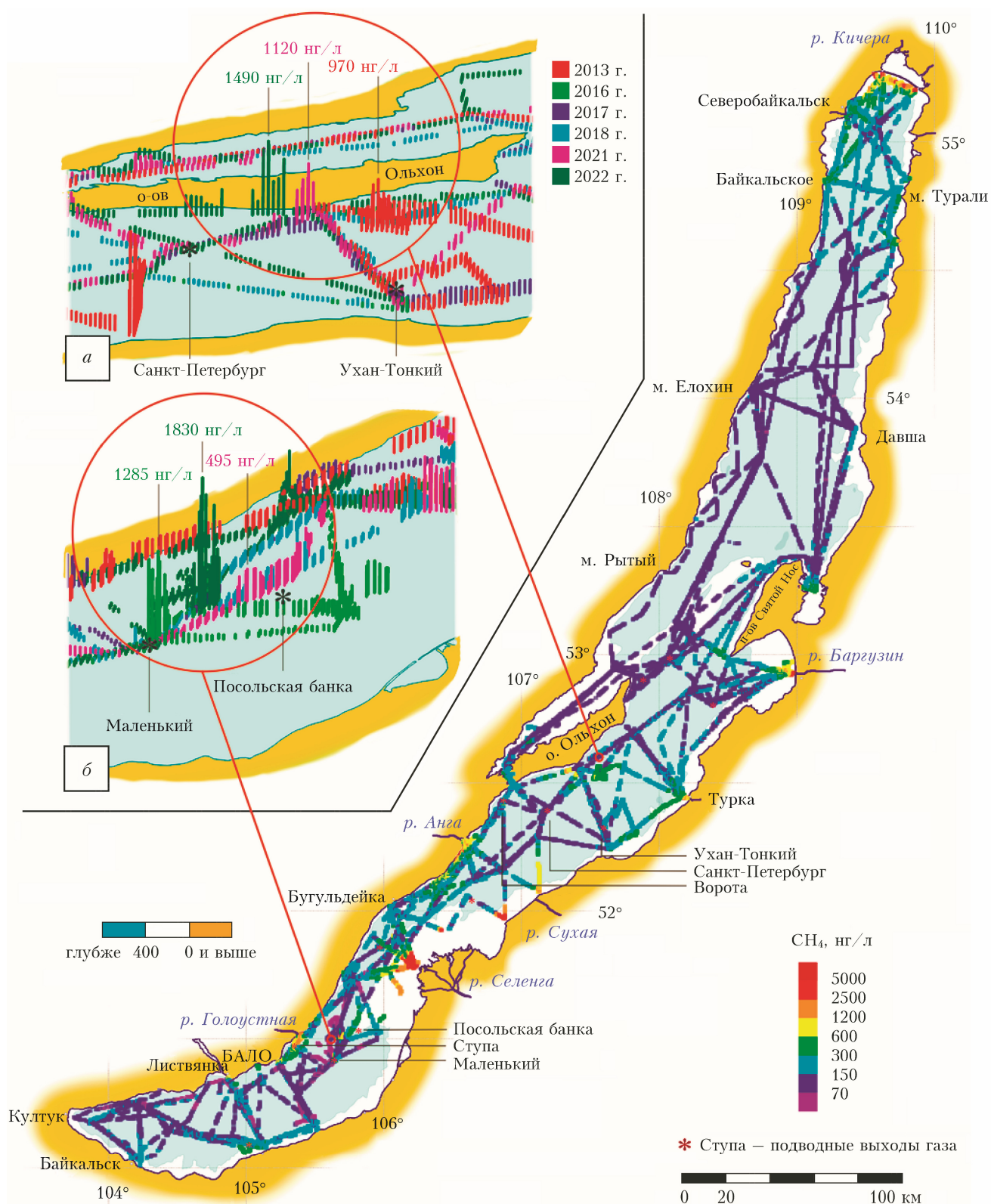


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации метана в поверхностной воде Байкала в результирующем массиве данных экспедиций 2013, 2016, 2017, 2018, 2021 и 2022 гг. (голубым фоном на карте обозначена область глубиной озера свыше 400 м); а и б — фрагменты, где в области больших глубин в трех из шести рейсов в разные годы наблюдались anomalно высокие концентрации CH₄