

## ДИОКСИД УГЛЕРОДА В ПОЧВЕННЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

© 2024 г. О. Ю. Гончарова<sup>a, \*</sup>, М. В. Тимофеева<sup>a, b</sup>, Г. В. Матышак<sup>a</sup>, А. В. Исаева<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия

<sup>c</sup>Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,  
ул. Глебовская, 20б, Москва, 107258 Россия

\*e-mail: goncholgaj@gmail.com

Поступила в редакцию 25.06.2023 г.

После доработки 05.07.2023 г.

Принята к публикации 20.09.2023 г.

Растворенный неорганический углерода является существенным компонентом углеродного цикла, особенно в северных регионах, в то же время его потери через водные объекты до сих пор редко включаются в региональные углеродные модели. В задачи работы входило подробное освещение методического подхода выравнивания концентраций к изучению содержания растворенного CO<sub>2</sub> в почвенных и поверхностных водах, а также оценка диапазона величин концентрации CO<sub>2</sub> в водах разного генезиса в ландшафтах севера Западной Сибири. В результате проделанной методической работы выработан и представлен протокол измерения концентрации CO<sub>2</sub> в водах методом выравнивания концентраций с подробными расчетами. Концентрация CO<sub>2</sub> в почвенных (надмерзлотных) и поверхностных водах (речных, болотных, озерных и др.) колебалась от 13 до 2983 мкмоль/л (274 до 57000 мкатм), абсолютное большинство объектов было пересыщено CO<sub>2</sub> по отношению к атмосфере. Максимальными величинами концентраций характеризуются надмерзлотные почвенные и болотные воды; минимальными – воды аквальных экосистем: термокарстовые и лесные озера. Высокая вариабельность содержания CO<sub>2</sub> в водах обуславливает необходимость большого числа измерений для получения адекватных оценок.

*Ключевые слова:* растворенный диоксид углерода, криолитозона, термокарстовые озера, бугристые торфяники, многолетняя мерзлота

DOI: 10.31857/S0032180X24020011, EDN: XYXVIQ

### ВВЕДЕНИЕ

В глобальном масштабе поверхностные воды, включая ручьи, реки, озера и другие водные объекты, покрывают лишь 3% земной поверхности, при этом количество углерода, которое они эмитируют в атмосферу, накапливают в донных отложениях и переносят в океан может существенно повлиять на величину и знак общего углеродного баланса суши [13, 15, 36]. Современные исследования показали, что тот углерод, который реки выносят в мировой океан, составляет около трети углерода, который поступает в пресные поверхностные воды из наземных экосистем [13]. Большая часть этого углерода возвращается в атмосферу в виде двуоксида углерода до того, как попадает в океаны, или отлагается в руслах рек и на дне озер

в виде осажденного органического материала [37]. Описывается несколько основных путей попадания соединений углерода в природные воды: почвенное дыхание, за счет которого увеличивается концентрация CO<sub>2</sub> в грунтовых водах; эрозия почв, сопровождающаяся переносом дисперсного органического вещества; а также попадание морт-массы в водотоки в лесных и водно-болотных угодьях [37]. Исследования показывают, что игнорирование экспорта углерода через поверхностные воды может значительно переоценить его накопление в наземных экосистемах [18, 21, 28, 39]. В то же время потеря углерода через водные объекты до сих пор редко включается в региональные углеродные модели, а если включается, то расчеты подвержены большим неопределенностям. По мнению

исследователей связано это с недостатком первичных данных [30].

Растворенный диоксид углерода, угольная кислота, бикарбонат и карбонат ионы представляют вместе растворенный неорганический углерод (РНУ). Эти химические вещества находятся в динамическом равновесии, их соотношение зависит от их относительных концентраций, pH, температуры, концентраций буферных систем и веществ, обладающих комплексообразующими свойствами [9, 11]. Доля угольной кислоты в растворах составляет около 0.3%, остальное количество РНУ приходится на гидрат двуокиси углерода, но для простоты расчетов карбонатного равновесия принимают за  $H_2CO_3$  весь растворенный  $CO_2$  [16]. Часто в литературе, помимо истинных величин (г/л) для характеристики концентрации  $CO_2$  в водах, используют величину  $pCO_2$  – объемное содержание диоксида углерода (ppm) как характеристику его концентрации в растворе в условиях равновесия. Данные величины связаны, согласно закону Генри, следующим образом:

$$C_w = K_H P_g = K_H X P_a, \quad (1)$$

где  $C_w$  – концентрация растворенного  $CO_2$ , моль/л;  $K_H$  – константа Генри, моль/(л атм);  $P_g$  – парциальное давление  $CO_2$ , атм, которое согласно закону Дальтона, равно  $X P_a$ , где  $X$  – измеряемое объемное содержание  $CO_2$  в газовой пробе, ppm, а  $P_a$  – атмосферное давление, атм.

В природе ситуация, когда концентрация  $CO_2$  в водных объектах близка к гипотетически равновесной с атмосферой (когда объемное содержание в равновесии с раствором ~400 ppm), встречается крайне редко. Большинство водных резервуаров, как естественных, так и искусственных характеризуется величинами содержания  $CO_2$  большими, а иногда и существенно большими, чем вышеупомянутое значение. Такие воды предложено называть пересыщенными (supersaturated)  $CO_2$  по отношению к атмосфере. Если в водах содержится меньше  $CO_2$ , чем при равновесии с атмосферой, они называются ненасыщенными (undersaturated) [16]. Как следствие, пересыщенные воды могут быть источником  $CO_2$  в атмосферу, а ненасыщенные – поглотителем.

Для оценки содержания  $CO_2$  в природных водах применяют ряд методов: титриметрический – через измерение общей кислотности [1, 2]; расчетный – с использованием величин общей щелочности или общего содержания РНУ, температуры раствора и pH [11, 16 26]; а также группу методов, общим принципом которых является уравнивание пробы воды с газовой пробой с известной (возможно нулевой) концентрацией  $CO_2$  с последующим инструментальным (газоанализаторы)

измерением равновесной концентрации диоксида углерода [3, 40].

Несомненный интерес с точки зрения изучения углеродного баланса и роли в нем водных экосистем представляет Западная Сибирь, частично находящаяся в криолитозоне. Связано это как с высокой, до 70%, обводненностью территории, так и с неоднозначными последствиями меняющегося климата с возможной деградацией многолетнемерзлых пород. При этом роль поверхностных вод, особенно небольших водоемов, малых водотоков, водно-болотных угодий в углеродном обмене территории оценена явно недостаточно [34].

Задачами настоящей работы явилось: 1) подробное освещение методического подхода выравнивание концентраций к изучению содержания растворенного  $CO_2$  в почвенных и поверхностных водах; 2) оценка диапазона величин концентрации  $CO_2$  в водах разного генезиса в ландшафтах севера Западной Сибири.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследований расположен на северной границе северной тайги Западной Сибири в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в пределах третьей озерно-аллювиальной равнины (а.о. 25–35 м) в междуречье рек Лев, Хетта и Хейгияха (Надымский район, Тюменская области, Ямало-Ненецкий автономный округ).

Для района характерны продолжительный зимний период (7–8 мес.), низкая среднегодовая температура воздуха ( $-5^\circ C$ ), количество осадков варьирует от 450 до 650 мм/год [5]. Распространены два основных типа местности: озерно-болотный и приречный, незначительные площади заняты фрагментами местностей хасырейного типа (спущенные термокарстовые озера). Местности озерно-болотного типа занимают большую часть равнины (60%), с преобладанием в их составе торфяников и болот, лесные урочища занимают менее 6% площадей. Второй тип местности представлен приречными ландшафтами с преобладанием лесных экосистем (80%) [5]. Зональным типом растительности в автоморфных условиях являются березово-лиственничные и березово-сосновые кустарничково-лишайниково-зеленомошные редколесья, развитые на приречных частях равнины. На плоской заболоченной центральной поверхности равнины доминируют багульниково-сфагновые бугристые торфяники и кустарничково-моховые болота. Многолетнемерзлые породы (ММП) отсутствуют с поверхности под островами лесных урочищ и болотами и приурочены к массивам торфяников, где вскрываются на глубинах 0.5–1 м. Почвообразующие породы в основном песчаные с линзами легкого и среднего суглинка. Повсеместно с поверхности

распространены торфяные отложения переменной мощности 0.5–1.5 м [5].

На торфяниках и окружающих их болотных участках формируются почвы с органогенным профилем разной мощности: торфяная олиготрофная, торфяная олиготрофная мерзлотная, торфяно-криозем, торфяно-подзол [6]. В автоморфных лесных экосистемах основу составляют альфегумусовые почвы: комбинации подбуров, подзолов и торфяно-подзолов, а также торфяно-глееземы, развивающиеся на породах тяжелого гранулометрического состава.

Важная особенность территории – интенсивная заболоченность и заозеренность, осложненная активно идущими криогенными рельефообразующими процессами [5]. В результате действия разномасштабных криогенных явлений, заболоченные территории претерпевают значительные изменения, связанные с расчленением общей территории болотных экосистем на участки, резко отличающиеся по степени гидроморфизма. Наиболее распространенными являются бугристые торфяники – участки болотных экосистем, приподнятые над общим уровнем под влиянием процессов пучения. В их пределах широко распространены термокарстовые озера разного возраста, формы и размера. Незначительные площади занимают грядово-мочажинные болота, приуроченные к крупным ареалам стока поверхностных вод.

Среди аквальных ландшафтов распространены как объекты естественного происхождения: реки и ручьи, различные типы озер (термокарстовые, старичные, болотные (дистрофные [10])), так и объекты антропогенного генезиса – обводненные карьеры и водоемы, образовавшиеся в результате нарушения режима поверхностных водотоков при строительстве линейных сооружений (рис. 1).

Таким образом, объектами исследования послужили пробы воды основных типов природных аквальных и территориальных комплексов района исследований, отобранные с одинаковой глубины (5 см). Данная глубина характеризовала концентрацию  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое максимально интенсивного газообмена с атмосферой. Более глубокие слои и, соответственно, профильные градиенты концентраций  $\text{CO}_2$  в данной работе не рассматриваются. Были исследованы следующие типы вод:

1. Собственно речные экосистемы: основное русло р. Лонг-Юган. Воды анализировали на участке реки, протяженностью около 200 м ( $65^\circ 19' 46.4'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 49' 39.2'' \text{ E}$ ).

2. В автоморфных лесных экосистемах:

а) Воды малых водотоков. Сеть ручьев и малых рек разной степени зарастания, широко представленных в лесах в системе остаточного полигонального рельефа (бугристо-западинного). Анализировали воды из одного ручья ( $65^\circ 19' 22.8'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 55' 53.3'' \text{ E}$ ) в трех точках на протяжении 1 км.

б) Воды озер. Для лесных экосистем территории характерно распространение небольших озер округлой формы, вероятно, реликтового происхождения (морской или термокарстовый генезис [5]). Отличительная их особенность – большая глубина (до 9 м) и низкая минерализация [7]. Анализировали воды из одного озера ( $65^\circ 19' 16.6'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 58' 16.2'' \text{ E}$ ), в 4 точках, на противоположных участках берега.

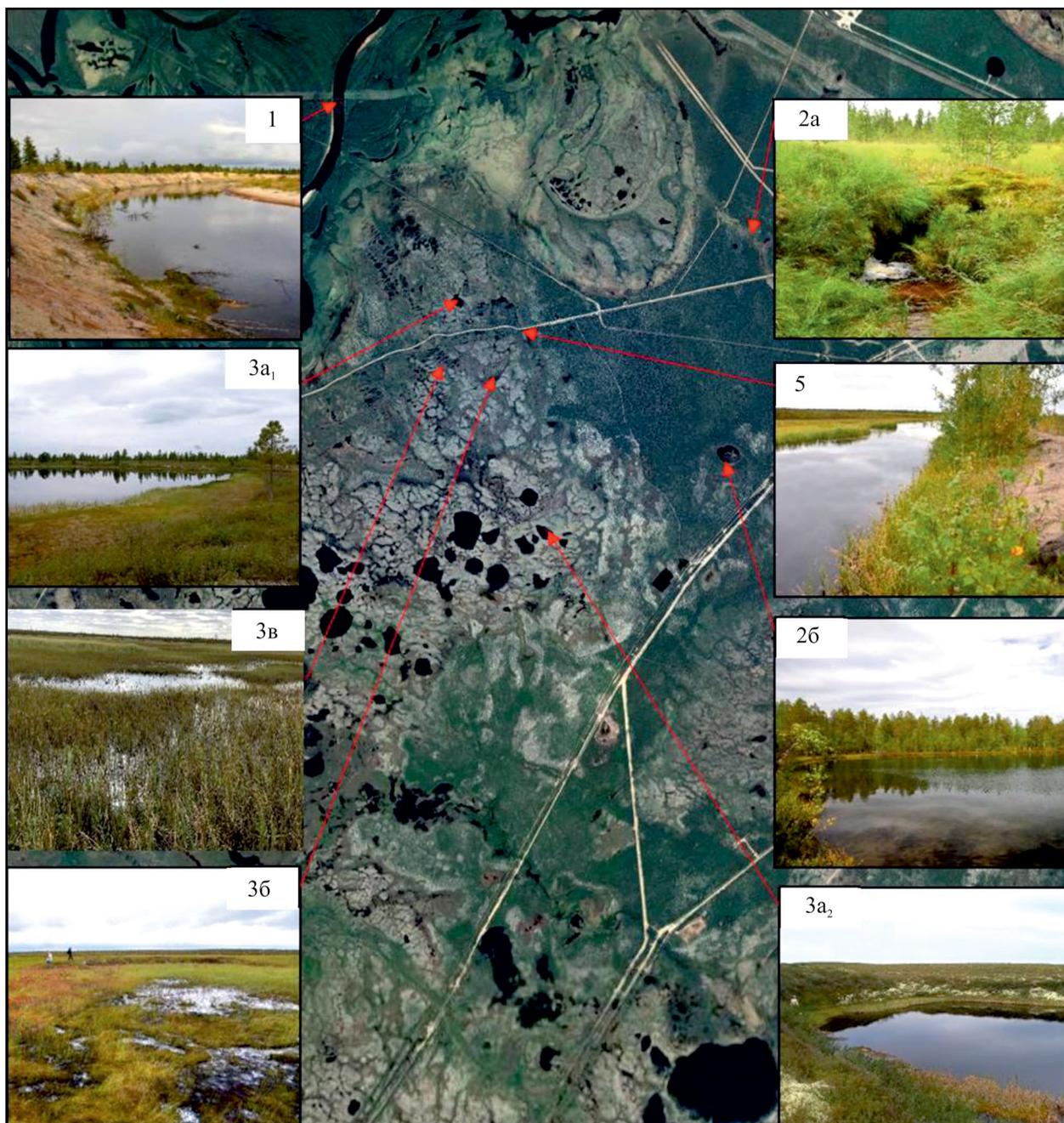
3. В пределах озерно-болотного типа местности воды отобраны из разных типов озер:

а) Термокарстовые озера. Широко распространенный объект, характеризующий криогенные условия развития экосистем территории. Для них характерна округлая форма, иногда более сложная, вытянутая (за счет смыкания нескольких близлежащих озер), небольшая глубина (до 3 м), крутые берега, часто с признаками термоэрозии. В зависимости от возраста и места формирования озера могут быть как замкнутыми, гидрологически изолированными от других аквальных экосистем (болот, крупных озер, ручьев), так и связанными в единую гидрологическую сеть с общим стоком в речную сеть. В данной работе воды отобраны в термокарстовых озерах 2 групп, сформированных на разных геоморфологических уровнях. Первая группа ( $a_1$ ) развита на стыке 2 и 3 террасы (а.о. 25–26 м), на границе с пойменными территориями и, вероятно, имеет гидрологическую связь с речной экосистемой (р. Лонг-Юган). Вторая группа озер ( $a_2$ ) расположена в наиболее высокой части (а.о. 28–30 м) озерно-болотного комплекса, на границе с автоморфной лесной экосистемой. Анализировали воды из трех озер первой группы ( $65^\circ 17' 49.4'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 52' 53.5'' \text{ E}$ ) и пяти озер второй ( $65^\circ 19' 08.3'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 51' 41.9'' \text{ E}$ ).

б) Торфянико-болотные озера (дистрофные озера) ( $65^\circ 18' 52.0'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 52' 24.0'' \text{ E}$ ). Замкнутые, мелководные небольшие озера, сформированные в пределах верхних болот (в ложбинах между бугристыми торфяниками) озерно-болотного комплекса за счет неравномерного нарастания торфяной залежи [10]. Растительность представлена сфагновыми мхами и олиго- и мезотрофными гидрофитами. Питание преимущественно атмосферное, возможно, присутствует нерегулярный сток с окружающих бугристых торфяников. Анализировали воды из пяти озерков.

в) Озера грядово-мочажинного комплекса. Комплекс разлит на небольшой площади исследованной территории, характеризующейся выраженным стоком поверхностных вод в речную экосистему (р. Лонг-Юган) ( $65^\circ 18' 50.3'' \text{ N}$ ,  $72^\circ 51' 30.4'' \text{ E}$ ). Озера незамкнутые, мелкие, вытянутые против направления стока вод. Анализировали воды из трех озер.

4. Надмерзлотные воды. Отобраны воды, скапливающиеся в понижениях кровли многолетней



**Рис. 1.** Объекты исследования: 1 — река Лонг-Юган; 2а — лесной ручей; 2б — лесное озеро; 3а<sub>1</sub>, 3а<sub>2</sub> — термокарстовые озера; 3б — торфянико-болотные озера (дистрофные озерки); 3в — озера грядово-мочажинного комплекса; 5 — “подпертые воды”. Развернутое описание объектов представлено в тексте.

мерзлоты в пределах нижней части профиля торфяных почв бугристых торфяников (65°18'48.6" N, 72°52'29.5" E).

5. Объект “подпертые воды”. Относится к типу антропогенно-нарушенных объектов. В 1977 г. на изучаемой территории был проложен магистральный газопровод (Надым-Пунга). Строительство газопровода привело к существенному изменению

гидрологии окружающих ландшафтов. На ряде участков произошло значительное обводнение экосистем за счет активного таяния ММП и перегораживания естественных водотоков. В результате, в непосредственной близости от газопроводов сформировались вытянутые озерки небольшой глубины и площади (65°18'56.6" N, 72°52'14.4" E). Анализировали воды трех озерков.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка концентрации  $\text{CO}_2$  в водах методом выравнивая (уравновешивания) концентраций “equilibration technique” обычно состоит из нескольких этапов: уравнивание  $\text{CO}_2$  между пробой жидкости и воздуха фиксированного объема; измерение концентрации газа в пробе воздуха из “свободного пространства” либо с помощью газовой хроматографии (в лабораторных условиях), либо с помощью инфракрасной спектроскопии (может применяться в полевых условиях); и дополнительные расчеты для преобразования концентраций газа в  $p\text{CO}_2$  или весовые концентрации с поправкой на температуру и давление [40]. Существует много вариантов данной методики с применением различных устройств, но наиболее распространенным и доступным в настоящее время для исследования поверхностных вод является так называемый ручной метод с использованием шприца или небольших емкостей [3]. Метод удобен, особенно в полевых условиях, так как не зависит от сложного оборудования и дает надежные результаты [25]. Метод заключается в отборе пробы воды в сосуд или шприц и замещении части пространства над водой газом с известной концентрацией  $\text{CO}_2$ . Затем шприц энергично встряхивается, дается время для уравнивания, отбирается проба газа [21]. Модификаций данного метода очень много, связаны они с варьированием объемов газовой и жидкой фаз, временем встряхивания и уравнивания, замещающим газом, добавлением консервантов. Существенным недостатком является отсутствие единой методики.

В англоязычной литературе были опубликованы документы и протоколы расчетов, в которых этот метод применяется для анализа концентрации растворенного  $\text{CO}_2$  в пресных водах [19, 20, 27], но без учета того, что растворенный  $\text{CO}_2$  находится в динамическом химическом равновесии с карбонатами и гидрокарбонатами. Действительно, согласно известным положениям [11], данными взаимодействиями можно пренебречь для растворов с величиной pH меньше 5.5–6.0 ед. Некоторые источники даже указывают на возможность использования данного метода без корректировки на щелочность для большинства бореальных вод (ошибка <5%), где pH меньше 7.5 или  $p\text{CO}_2$  больше 1000 мкатм [25]. В процессе работы мы разработали собственный протокол исследования, основываясь на вышеперечисленных работах, но с адаптацией для полевых условий и имеющейся приборной базы.

**Протокол исследования.** В шприцы объемом 50 мл (удобно использовать шприцы с системой Луер Лок с завинчивающейся заглушкой) отбирается проба воды объемом 25 мл и внешнего

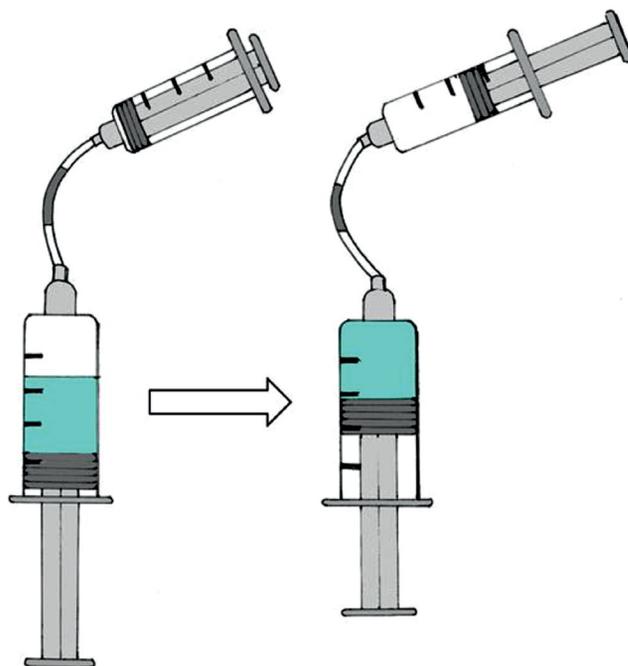
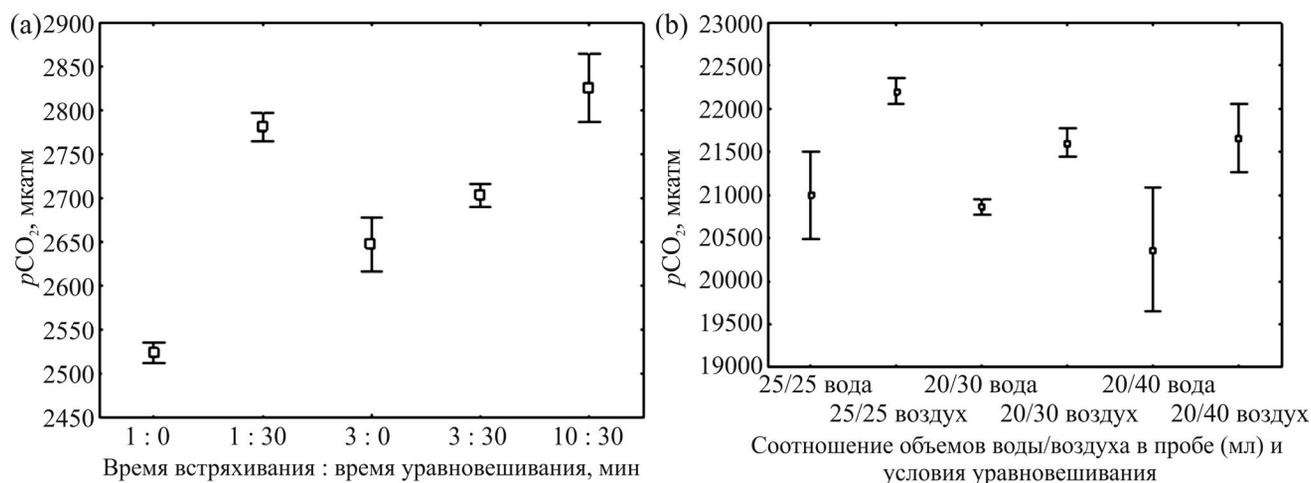


Рис. 2. Схема перекачки пробы воздуха после уравнивания свободного пространства из большого шприца в малый (рисунок М.А. Чепурновой).

окружающего воздуха объемом 25 мл (соотношение объема воды и воздуха 1 : 1). Шприцы закрываются герметичными пробками и встряхиваются вручную в течение 1 мин, после отстаиваются в течение 30 мин в температурных условиях близких к температуре анализируемых вод. Возможно поместить шприцы непосредственно в водоем, из которого отбиралась проба. Далее уравнишенный объем газовой фазы из шприца 50 мл через короткую трубку, заполненную силикагелем (или просто влагопоглощающим инертным материалом), перегоняется в шприц объемом 20 мл. Сначала небольшая порция газа (не больше 1 мл) перегоняется в трубку, затем присоединяется пустой шприц и под давлением заполняется. Процедура осуществляется аккуратно, быстро, большой шприц держится вертикально, чтобы не допустить попадание влаги в маленький шприц (рис. 2). Одновременно с отбором проб вод берется фоновая проба окружающего воздуха в отдельный шприц. Концентрация газа в полученных пробах определяется непосредственно в поле с помощью портативного газоанализатора с инфракрасным датчиком, в нашем случае LiCOR LI-830 (точность 0.001%). Дополнительно обязательно проводится измерение температуры воды в месте отбора пробы и берется проба для определения pH (или измеряется на месте с помощью портативных приборов). Если точно известно, что воды кислые (pH меньше 5),



**Рис. 3.** Результаты методической работы по определению парциального давления CO<sub>2</sub> для вод методом уравнивания свободного пространства (представлены среднее и стандартная ошибка среднего). а — эксперимент с различным временем встряхивания шприцов и временем уравнивания, б — эксперимент с различным соотношением водной и воздушных фаз и условий уравнивания (температура), в воде или на воздухе.

то измерение кислотности можно не проводить. Если измерение концентрации CO<sub>2</sub> проводится не в поле, а пробы перевозятся в лабораторию, и их количество ограничено, возможно использование для фоновых значений концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе средних величин для региона. Например, для северных районов такая величина составляет около 350 ppm [24].

Для подтверждения обоснованности выбранной процедуры исследования была проведена серия методических экспериментов, в которую включалась оценка оптимального времени встряхивания/уравнивания; соотношения водной и воздушной фаз в пробе; влияние температуры, при которой проводится эксперимент. Методические работы проводили по одной схеме: пробы (повторности) брали из предварительно отобранного большого объема воды (7–10 л) в течение 30–60 с. Данная манипуляция необходима, так как концентрация газа в поверхностных водах крайне вариабельный и изменчивый параметр. В первом эксперименте проводили манипуляции со временем встряхивания/уравнивания. Полученные данные свидетельствовали, что ряд манипуляций достоверно различается (рис. 3а). А именно: минимальные значения получили для незамедлительного измерения после 1-минутного встряхивания (данная манипуляция часто встречается в литературе), а максимальные — при двух манипуляциях: 1:30 и 10:30 (время встряхивания: уравнивания, мин). По результатам эксперимента для исследования был выбран вариант 1 мин встряхивания, 30 мин уравнивания. Больше время встряхивания сильно затрудняет и замедляет исследование.

В ходе второго эксперимента изменяемыми параметрами были соотношение объемов газовой и жидкой фаз, а также температура раствора. Точнее — условия, в которых происходит уравнивание раствора и газовой фазы в шприце. Часто, особенно при работе в северных регионах, наблюдается большая разница температур исследуемых вод и температуры воздуха. Причем разница может быть и в ту, и в другую сторону. А поскольку на растворимость газа в воде сильное влияние оказывает температура раствора, некоторые исследователи рекомендуют все манипуляции со шприцами до отбора проб проводить под водой в объекте, на котором проходит эксперимент. Температура воды на момент эксперимента составляла +15.5°C, воздуха +22.0°C. Результаты эксперимента (рис. 3б) подтвердили необходимость поддержания исходной температуры раствора во время этапа уравнивания — наблюдалась достоверная разница в полученных результатах для разных условий (при расчете без учета разницы температур). Также подтвердилась возможность использования соотношения водной и воздушных фаз 1:1 — для трех экспериментальных соотношений достоверной разности не выявлено. Необходимость использования большого количества газовой фазы обусловлено тем, что измерение концентрации CO<sub>2</sub> проводится в полевых условиях на газоанализаторе LiCOR LI-830, минимальный необходимый объем газовой пробы составляет 20–25 мл, а рекомендованное в опубликованных протоколах соотношение воды и воздуха 1:2 [27], т.е. объем газовой фазы составляет меньше 20 мл при использовании шприца объемом 50 мл.

Далее, на основе полученных данных, а именно:  $X_1$  и  $X_2$  – измеряемое в ходе эксперимента объемное содержание  $\text{CO}_2$  в газовой фазе пробы до и после уравнивания, ppm;  $T_w$  (температура воды, K),  $V_g/V_w$  – соотношение объемов воздуха и воды в пробе (в настоящем исследовании оно равно 1), рассчитывается концентрация  $\text{CO}_2$  в пробе воды, мкмоль/л [11, 20, 27].

$$C_w = P_a \left\{ X_1 K_H + \frac{\left( \frac{V_g}{V_w} \right) (X_2 - X_1)}{RT_w} \right\}, \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 0.082 л атм/(K моль),  $T_w$  – температура воды, K. Константа Генри  $K_H$  для  $\text{CO}_2$  рассчитывается по эмпирической формуле (3), предложенной в работе [38].

$$\ln K_H = -58.0931 + 90.5069 \left( \frac{100}{T_w} \right) + 22.294 \ln \left( \frac{T_w}{100} \right). \quad (3)$$

Для упрощения расчетов рассчитали константу для нескольких значений температур, построили график и аппроксимировали его полиномом 2 степени (формулу (4) нужно использовать без округления коэффициентов):

$$K_H = 0.0000348571 T_w^2 - 0.0215801714 T_w + 3.3696. \quad (4)$$

Для оценки искомого парциального давления ( $P_g^0$ ) или объемного содержания  $\text{CO}_2$  ( $X^0$ ) в равновесной газовой фазе, характеризующей уровень растворенного диоксида углерода в исходной пробе воды согласно закона Генри (формула (1)) получаем формулы (5) и (6):

$$P_g^0 = \frac{C_w}{K_H}, \quad (5)$$

$$X^0 = \frac{P_g^0}{P_a}. \quad (6)$$

Первая величина (5) выражается в атмосферах (или мкатм), вторая (6) – в ppm. Если атмосферное давление принять за 1 атм, то величины будут равны численно. Важное примечание: если уравнивание происходит при температуре, отличной от изначальной температуры пробы воды, то в формуле (2) необходимо использовать  $K_H$ , рассчитанную для температуры уравнивания, а в формуле (5) – для начальной температуры пробы воды.

В расчетах для оценки растворимости не учитывается карбонатно-кальциевое равновесие

в растворах. Если pH воды не превышает 5, то абсолютно доминирует растворенный  $\text{CO}_2$  ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), и другими формами можно пренебречь [11, 25]. В водах с более высокими величинами pH растворимость  $\text{CO}_2$  будет повышаться и это необходимо учитывать при расчетах.

Следовательно, представление искомой величины в единицах парциального давления или в ppm является хоть и не очень корректным, но более наглядным, поскольку отражает пересыщенность или недонасыщенность вод по данному компоненту относительно атмосферы. Чтобы провести такую оценку по величинам, выраженным в мольных концентрациях, необходима информация о температуре воды, ее pH и солености. Приведенный пример в табл. 1 можно использовать для пошаговой проверки расчета. Давление принимается за 1 атм.

Концентрацию  $\text{CO}_2$  в почвенных надмерзлотных водах оценивали с использованием данных по объемной концентрации  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе (метод пробоотборников заместительного типа [11]), находящемся в равновесии с надмерзлотными водами согласно формуле (1). Для этого помещали полую трубку диаметром 1 см с открытым нижним концом в почву с таким расчетом, чтобы нижний конец находился приблизительно на 10 см выше уровня мерзлоты. Сверху трубку закрывали герметичной пробкой. Пробу воздуха отбирали шприцом с иглой через несколько дней, после наступления равновесия. Для расчета  $K_H$  в данном случае полагали, что температура почвенных надмерзлотных вод близка к 0°C. Если надмерзлотные воды были неглубоко от поверхности, то делали небольшую прикопку длинноштыковой лопатой до воды, быстро отбирали пробу [31] и анализировали методом выравнивания концентраций.

Во время исследований осуществляли контроль температуры воздуха с помощью электронных термометров TP3001 (точность  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Кислотность, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность и температуру вод определяли полевыми измерителями серии Hanna Instruments (точность  $\pm 0.05$  pH;  $\pm 2$  мВ;  $\pm 2\%$  шкалы проводимости;  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  соответственно).

В общей сложности в августе 2022 г. проанализировали около 180 проб воды приблизительно из 30 индивидуальных объектов, объединенных в вышеперечисленные группы с повторностью от 3 до 50. Обработку данных проводили в программном пакете Statistica 8.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Все исследованные воды кислые или слабокислые (табл. 2). Наиболее низкими и близкими по значению величинами кислотности характеризуются почвенные надмерзлотные воды и болотные

**Таблица 1.** Пример расчета концентрации CO<sub>2</sub> из исходных данных

№ образца	Измеренные параметры			Рассчитанные параметры	
	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	$X_1, \text{ppm}$	$X_2, \text{ppm}$	$X^0 (p\text{CO}_2), \text{мкатм}$	$C_w, \text{мкмоль/л}$
1	0.0	400	400	400	31
2	15.0	400	1500	2535	114
3	25.0	400	20500	44676	1519

воды, что является закономерным, учитывая их гидрографическую сопряженность и схожую характеристику органогенного профиля, состоящего из олиготрофного сфагнового торфа. Чуть менее кислыми являются воды лесных переувлажненных ложбин, а также воды грядово-мочажинного комплекса и одной из групп термокарстовых озер. Слабокислой реакцией среды характеризуются озерные, речные и подпертые воды. Важное значение для процессов газообмена на разделе вода–атмосфера имеет температура. Наиболее низкими температурами характеризуются надмерзлотные воды. Непосредственное измерение их температуры не проводили, но очевидно, что она лишь немного выше 0°C и является таковой в течение всего периода, когда почва находится в оттаявшем состоянии. На период исследования – август 2022 г. – наиболее прогретыми были верхние слои р. Лонг-Юган и лесных озер (до 16°C). Температур вод остальных объектов была в диапазоне от 11.5 до 14.0°C. Все

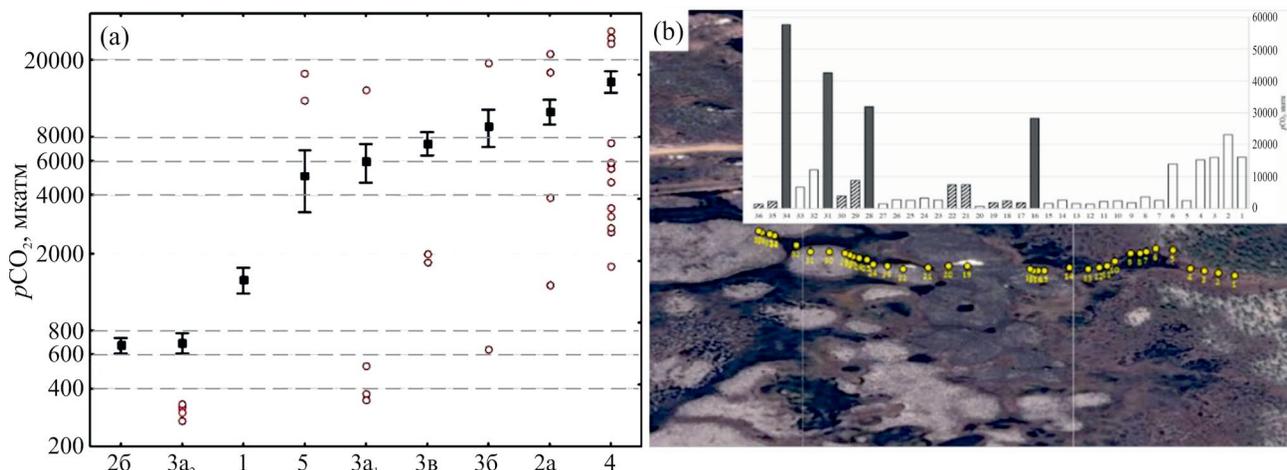
воды характеризовались низкой минерализацией, их электропроводность не превышала 80 мкСм/см. Интересно отметить тот факт, что минерализация лесного озера находилась ниже чувствительности прибора, которая составляет 1 мкСм/см. Воды существенно различались по величине окислительно-восстановительного потенциала, который варьировал от 120 до 370 мВ. Минимальные значения наблюдались в водах лесных озер и в русле реки, максимальные – в термокарстовых озерах второй группы и лесных ложбинах.

С использованием описанных выше методик получили данные по содержанию растворенного CO<sub>2</sub> во всех описанных объектах, средние величины которых представлены в табл. 2. Диапазон величин концентрации CO<sub>2</sub> в единицах равновесного парциального давления в исследованных объектах от 274 до 57678 мкатм (ppm), в мольных долях – от 13 до 2983 мкмоль/л, в пересчете на массовую долю диоксида углерода – 0.57–131.28 мг CO<sub>2</sub>/л. В водах

**Таблица 2.** Свойства основных водных объектов (средние и стандартные отклонения)

Объект	$n$	pH	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	ЕС, мкСм/см	Eh, мВ	УБВ, см	$p\text{CO}_2, \text{мкатм}$
Озера лесные	6	5.76 ± 0.47	15.8 ± 0.3	0*	206 ± 11	—	668 ± 154
Озера термокарстовые (За <sub>2</sub> )	15	4.55 ± 0.23	13.9 ± 0.93	11 ± 5	356 ± 8	—	688 ± 319
Река (Лонг-Юган)	4	Не опр.	16.1 ± 0.5	58	210	—	1463 ± 318
Подпертые воды	11	5.10 ± 0.27	13.9 ± 0.7	8 ± 5	297 ± 20	—	4543 ± 5552
Озера термокарстовые (За <sub>1</sub> )	20	5.15 ± 0.54	12.1 ± 12	9 ± 6	263 ± 27	—	5997 ± 6073
Грядово-мочажинный комплекс	16	4.51 ± 0.14	14.2 ± 1.3	15 ± 13	302 ± 36	9 ± 4	7427 ± 4091
Торфянико-болотные озера	39	4.17 ± 0.31	12.5 ± 1.3	42 ± 20	280 ± 75	14 ± 6	9074 ± 12454
Лесной ручей	17	4.38 ± 0.36	11.7 ± 0.8	19 ± 9	325 ± 46	9 ± 2	10860 ± 6532
Надмерзлотные воды	40	4.00 ± 0.12	Не опр.	—	—	—	15495 ± 12590

\* Ниже чувствительности прибора.



**Рис. 4.** Парциальное давление CO<sub>2</sub> в надмерзлотных и поверхностных водах севера Западной Сибири (а): 1 — река Лонг-Юган; 2а — лесной ручей; 2б — лесное озеро; 3а<sub>1</sub>, 3а<sub>2</sub> — термокарстовые озера; 3б — торфянико-болотные озера (дистрофные озера); 3в — озера грядово-мочажинного комплекса; 4 — надмерзлотные воды; 5 — “подпертые воды” (развернутое описание объектов представлено в тексте, представлены средние значения, ошибка среднего и выбросы, шкала логарифмическая). б — результаты исследования содержания CO<sub>2</sub> в водах разного происхождения по трансекте, пересекающей основные элементы торфяно-болотного комплекса и прилегающих лесных экосистем (без штриховки — воды заросшего лесного ручья и торфянико-болотных озерков, штриховка — надмерзлотные воды торфяников, сплошная заливка — краевые точки озерков в непосредственной близости от торфяников).

лесных озер и термокарстовых озер второй группы концентрация CO<sub>2</sub> близка к равновесной с атмосферной (около 350 мкатм), а в отдельных случаях ниже ее (отдельные повторности как на лесных, так и на термокарстовых озерах) (рис. 4а). Низкие, но большие чем в озерах, значения наблюдались в русле реки. Далее объекты выстраиваются в ряд с постепенным увеличением концентрации CO<sub>2</sub>, которая достигала максимума в надмерзлотных водах. Максимальные средние величины (надмерзлотные воды) превышали минимальные (лесные озера) в 25 раз.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить, что, исходя из общих статистических параметров, распределение полученных величин концентрации CO<sub>2</sub> (все данные) существенно отличается от нормального с коэффициентом вариации более 100%, что свидетельствует о неоднородности группы. Медиана существенно смещена в сторону низких значений, и около 70% значений лежит в интервале от 0 до 10000 мкатм. Существенной неоднородностью отличаются и выделенные группы объектов (рис. 4а), о чем свидетельствует большое количество выбросов. В работе намеренно не исключали эти величины из общей совокупности данных, так как основной задачей данного исследования является отработка методики выравнивания концентраций. С нашей точки зрения методика характеризуется хорошей воспроизводимостью и чувствительностью. Об этом можно

судить по данным методической работы (рис. 3б) — даже небольшое изменение условий эксперимента (температура уравнивания) дает статистически значимое изменение результата при стандартизации условий отбора проб. В связи с этим, наличие выбросов свидетельствует не о недостатках методики, а о высокой вариабельности и изменчивости самого исследуемого параметра. Даже при отборе проб практически в одной точке результаты могут сильно различаться. Связано это, в том числе, со стратификацией концентрации CO<sub>2</sub> по глубинам и возможным подмешивании вод из более глубоких слоев при повторном пробоотборе.

Поскольку каждая из выделенных групп включала несколько территориально разнесенных объектов (например, группа термокарстовые озера 1 включала 5 озер), и место отбора каждой индивидуальной пробы фиксировалось, можно эти выбросы проанализировать. Максимальное их количество наблюдалось в четырех группах: термокарстовые озера 1, подпертые воды, болота и надмерзлотные воды, эти же группы характеризовались максимальными коэффициентами вариабельности исследуемого параметра. Для термокарстовых озер первой группы разброс значений наблюдался не между озерами, а для разных участков отдельных озер. Связываем это с их бóльшим возрастом и заметным зарастанием, которое происходит неравномерно, и озера имеют выраженную асимметрию с различной глубиной, характером прибрежной растительности и т.д. На объекте “подпертые

воды” в качестве выбросов выделяются точки отбора, расположенные в отдалении от остальных и имеющие другой источник питания. Наиболее очевидные выбросы были отмечены для болотных экосистем. На рис. 4б представлены результаты исследования концентрации  $\text{CO}_2$  по трансекте, пересекающей несколько объектов практически по прямой линии. Значимо более высокие значения концентраций  $\text{CO}_2$  в болотной воде наблюдались в непосредственной близости от торфяников (точки 16, 28, 31, 34). Данный факт неоднократно отмечался [12], и связан интенсивным поступлением растворенного  $\text{CO}_2$  с надмерзлотными водами с торфяников в окружающие болота.

Наиболее неоднородной группой по величинам концентрации  $\text{CO}_2$  являются надмерзлотные воды. Одной из причин может быть методическая. В данном случае это лишь оценочная величина, которую получили, исходя из предположения, что методом пробоотборников заместительного типа анализируется почвенный воздух, находящийся в равновесии с почвенными водами. Поэтому название надмерзлотные достаточно условное. Старались поместить трубки непосредственно над мерзлотой, но не всегда это удавалось, так как мерзлота могла быть на глубине 1 м и более. Вторая причина – различная глубина залегания мерзлоты и, соответственно, надмерзлотных вод. Данное обстоятельство несомненно будет существенно отражаться на величинах концентрации  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе и водах, исходя из известных закономерностей распределения газа по почвенному профилю [11]. Даже несмотря на существенный разброс величин в данной группе вод, она значимо выделяется среди всех других (дисперсионный анализ) более высокими значениями.

Таким образом, каждая конкретная цифра вполне адекватно отражает реально существующую в данный момент времени концентрацию  $\text{CO}_2$  в водах. При этом, в силу очевидной варибельности и изменчивости показателя, близкие к истине оценки можно получить только при большой повторности измерений. Предложенный и описанный метод как нельзя лучше подходит для этих целей, при условии наличия газоанализатора с возможностью измерения непосредственно в поле.

Обратимся к абсолютным показателям концентраций  $\text{CO}_2$ , полученным в ходе исследования. Близкими к равновесным с атмосферным воздухом, а иногда и меньшими таковых, значениями концентраций  $\text{CO}_2$  характеризовались лесные озера и группа молодых термокарстовых озер ( $\text{Za}_2$ ). Они расположены на высоких гипсометрических отметках и, вероятно, имеют в основном атмосферное питание. Другая группа термокарстовых озер находилась ниже по геоморфологическому уровню (стоку) в непосредственной близости к обширной пойменной территории.

Предположительно, данные озера имеют больший возраст, о чем свидетельствует их интенсивное зарастание. Возможно, данные озера характеризуются большей трофностью, имеют помимо атмосферного в том числе грунтовое питание. Очевидно, что в них активно поступают надмерзлотные почвенные воды из окружающих торфяников, богатые как неорганическими, так и органическими растворенными соединениями углерода. В отличие от первой группы, величины концентрации растворенного  $\text{CO}_2$  в них в 10–15 раз превышают равновесную с атмосферой. Если сравнивать величины концентраций с имеющейся литературной базой по термокарстовым озерам мира [3], то первая группа соответствует представленному там диапазону для Западной и Восточной Сибири [17, 32], Швеции [29], Канады [33] и США [23]. При этом группа более старых озер ( $\text{Za}_1$ ) превосходит по средним значениям литературные данные в несколько раз, что дает основание задуматься над их происхождением, возможно генезис их не столь однозначен. Концентрация  $\text{CO}_2$  в основном русле р. Лонг-Юган соответствует таковой в крупных северных реках – Обь, Индигирка, Юкон [8, 17, 35]. Наименьшее количество данных в литературе представлено для болотных и надмерзлотных вод. Удалось найти большой объем данных только для бореальных болот Канады, а также болот Западной Сибири. Настоящие данные находятся на верхней границе, представленного для них диапазона содержания  $\text{CO}_2$  [4, 14]. Для надмерзлотных вод есть данные, представленные в работах по Западной Сибири [31]. Средние величины, полученные в настоящем исследовании (около 600 мкмоль/л), укладываются в широтный диапазон данных, полученных одной из модификаций метода *headspace equilibration* для надмерзлотных вод. Таким образом, подавляющее большинство изученных нами объектов характеризуется пересыщенностью вод диоксидом углерода по сравнению с атмосферой, иногда на несколько порядков и, безусловно, активно эмитирует данный газ в атмосферу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модификация метода выравнивания концентраций позволяет проводить массовые измерения концентрации диоксида углерода в поверхностных и близкозалегающих грунтовых/надмерзлотных водах. Необходимым условием получения достоверных результатов является тщательная фиксация параметров вод (рН и температуры). Величина пересыщения вод  $\text{CO}_2$  по сравнению с атмосферным парциальным давлением этого газа дает представление о потенциальном его потоке с поверхности водного объекта или о количестве газа, которое текущие воды могут переносить.

Полученные в ходе исследования данные по содержанию  $\text{CO}_2$  в поверхностных водах и водах гидроморфных экосистем свидетельствуют об их существенном пересыщении этим газом. Максимальными величинами концентраций характеризуются воды гидроморфных ландшафтов: надмерзлотные и болотные; минимальным – воды аквальных экосистем: термокарстовые и лесные озера. Показатель концентрации  $\text{CO}_2$  в водах характеризуется высокой вариабельностью, даже в пределах одного объекта, что обуславливает необходимость большого числа измерений для получения адекватных оценок.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-24-00408 “Соединения углерода в системе почва–вода–атмосфера сопряженных ландшафтов криолитозоны Западной Сибири”.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
2. *Верещагин Г.Ю.* Методы полевого гидрохимического анализа в их применении к гидрологической практике. Л.: ГГИ, 1930. 135 с.
3. *Гончарова О.Ю., Тимофеева М.В., Матышак Г.В.* Диоксид углерода в природных почвенных, грунтовых и поверхностных водах арктических и бореальных регионов: роль, источники, методы определения (обзор) // Почвоведение. 2023. № 3. С. 321–338. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601025>
4. *Инишева Л.Н.* Закономерности функционирования болотных экосистем в условиях воздействия природных и антропогенных факторов: монография. Томск: Изд-во ТГПУ, 2020. 482 с.
5. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. 165 с.
6. *Матышак Г.В., Богатырев Л.Г., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А.* Особенности развития почв гидроморфных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях криогенеза // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1155–1164. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17100069>
7. *Орехов П.Т.* Аквальные природные комплексы северной тайги Западной Сибири // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 2. С. 23–28.
8. *Пипко И.И., Пугач С.П., Савичев О.Г., Репина И.А., Шахова Н.Е., Моисеева Ю.А., Барсков К.В., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.* Динамика растворенного неорганического углерода и потоков  $\text{CO}_2$  между водой и атмосферой в главном русле реки Обь // Доклады АН. 2019. Т. 484. № 6. С. 691–697.
9. *Понизовский А.А., Пинский Д.Л., Воробьева Л.А.* Химические процессы и равновесия в почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 102 с.
10. Природные условия и естественные ресурсы СССР: Западная Сибирь. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1963. 490 с.
11. *Смагин А.В.* Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
12. *Тимофеева М.В., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Чуванов С.В.* Потоки углерода в экосистеме торфяно-болотного комплекса криолитозоны Западной Сибири // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 109–125.
13. *Aufdenkampe A.K., Mayorga E., Raymond P.A., Melack J.M., Doney S.C., Alin S.R., Aalto R.E., Yoo K.* Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere // *Frontiers Ecology Environ.* 2011. V. 9. № 1. P. 53–60. <https://doi.org/10.1890/100014>
14. *Billett M.F., Moore T.R.* Supersaturation and evasion of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  in surface waters at Mer Bleue peatland, Canada // *Hydrol. Process.* 2008. V. 22. № 12. P. 2044–2054. <https://doi.org/10.1002/hyp.6805>
15. *Cole J.J., Prairie Y.T.* Dissolved  $\text{CO}_2$  // *Encyclopedia of Inland Waters.* Elsevier, 2009. P. 30–34. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00091-0>
16. *Cole J.J., Prairie Y.T., Caraco N.F., McDowell W.H., Tranvik L.J., Striegl R.G., Duarte C.M., Kortelainen P., Downing J.A., Middelburg J.J., Melack J.* Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget // *Ecosystems.* 2007. V. 10. № 1. P. 172–185. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>
17. *Dean J.F., Meisel O.H., Martyn Rosco M., Marchesini L.B., Garnett M.H., Lenderink H., Logtestijn R. van, Borges A.V., Bouillon S., Lambert T., Röckmann T., Maximov T., Petrov R., Karsanaev S., Aerts R., Huissteden J. van, Vonk J.E., Dolman A.J.* East Siberian Arctic inland waters emit mostly contemporary carbon // *Nat Commun.* 2020. V. 11. № 1. P. 1627. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15511-6>
18. *Grace J., Malhi Y.* Carbon dioxide goes with the flow // *Nature.* 2002. V. 416. № 6881. P. 594–594. <https://doi.org/10.1038/416594b>
19. Greenhouse gas emissions – fluxes and processes: hydroelectric reservoirs and natural environments. Berlin: Springer, 2005. 732 p.
20. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs: derived from: The UNESCO/IHA Greenhouse

- Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project / Ed. Goldenfum J.A. London: Intern. Hydro-power Association (IHA), 2010. 138 p.
21. *Hope D., Billett M.F., Cresser M.S.* A review of the export of carbon in river water: Fluxes and processes // *Environ. Poll.* 1994. V. 84. № 3. P. 301–324. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90142-2](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90142-2)
  22. *Hope D., Palmer S.M., Billett M.F., Dawson J.J.C.* Carbon dioxide and methane evasion from a temperate peatland stream // *Limnol. Oceanogr.* 2001. V. 46. № 4. P. 847–857. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.4.0847>
  23. *Hope D., Palmer S.M., Billett M.F., Dawson J.J.C.* Variations in dissolved CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in a first-order stream and catchment: an investigation of soil-stream linkages // *Hydrological Processes.* 2004. V. 18. № 17. P. 3255–3275. <https://doi.org/10.1002/hyp.5657>
  24. *Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.C.* The flux of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from lakes and rivers in arctic Alaska // *Hydrobiologia.* 1992. V. 240. № 1–3. P. 23–36. <https://doi.org/10.1007/BF00013449>
  25. *Koschorreck M., Prairie Y.T., Kim J., Marcé R.* Technical note: CO<sub>2</sub> is not like CH<sub>4</sub> – limits of and corrections to the headspace method to analyse pCO<sub>2</sub> in fresh water // *Biogeochemistry. Greenhouse Gases.* 2020. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-307>
  26. *Neal C., House W., Down K.* An assessment of excess carbon dioxide partial pressures in natural waters based on pH and alkalinity measurements // *Sci. Total Environ.* 1998. V. 210–211. P. 173–185. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00011-4)
  27. *Oil L., Halbedel (née Angelstein) S.* Advances in the headspace equilibration technique for CO<sub>2</sub> sampling // *Protocol Exchange.* 2015. P. 1–18. <https://doi.org/10.1038/protex.2015.085>
  28. *Öquist M.G., Wallin M., Seibert J., Bishop K., Laudon H.* Dissolved inorganic carbon export across the soil/stream interface and its fate in a boreal headwater stream // *Environ. Sci. Technol.* 2009. V. 43. № 19. P. 7364–7369. <https://doi.org/10.1021/es900416h>
  29. *Prairie Y.T., Bird D.F., Cole J.J.* The summer metabolic balance in the epilimnion of southeastern Quebec lakes // *Limnol. Oceanogr.* 2002. V. 47. № 1. P. 316–321. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.1.0316>
  30. *Rantakari M., Kortelainen P., Vuorenmaa J., Mannio J., Forsius M.* Finnish Lake Survey: the role of catchment attributes in determining nitrogen, phosphorus, and organic carbon concentrations // *Water, Air, Soil Poll. Focus.* 2004. V. 4. № 2/3. P. 683–699. <https://doi.org/10.1023/B:WAFO.0000028387.61261.96>
  31. *Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S.* Permafrost thaw and climate warming may decrease the CO<sub>2</sub>, carbon, and metal concentration in peat soil waters of the Western Siberia Lowland // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 634. P. 1004–1023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.059>
  32. *Repo M.E., Huttunen J.T., Naumov A.V., Chichulin A.V., Lapshina E.D., Bleuten W., Martikainen P.J.* Release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from small wetland lakes in western Siberia // *Tellus B.: Chem. Phys. Meteorol.* 2007. V. 59. № 5. P. 788. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00301.x>
  33. *Roehm C.L., Prairie Y.T., Giorgio P.A. del.* The pCO<sub>2</sub> dynamics in lakes in the boreal region of northern Québec, Canada: LAKE pCO<sub>2</sub> dynamics in Boreal Lakes // *Global Biogeochem. Cycles.* 2009. V. 23. № 3. <https://doi.org/10.1029/2008GB003297>
  34. *Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Desmukh C., Pokrovsky B.G., Audry S., Viers J.* Biogeochemistry of organic carbon, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and trace elements in thermokarst water bodies in discontinuous permafrost zones of Western Siberia // *Biogeochemistry.* 2013. V. 113. № 1–3. P. 573–593. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9790-4>
  35. *Striegl R.G., Dornblaser M.M., McDonald C.P., Rover J.A., Stets E.G.* Carbon dioxide and methane emissions from the Yukon River system // *Global Biogeochem. Cycles.* 2012. V. 26. № 4. P. 2012GB004306. <https://doi.org/10.1029/2012GB004306>
  36. *Vachon D., Sponseller R.A., Karlsson J.* Integrating carbon emission, accumulation and transport in inland waters to understand their role in the global carbon cycle // *Global Change Biology.* 2021. V. 27. № 4. P. 719–727. <https://doi.org/10.1111/gcb.15448>
  37. *Wehrli B.* Conduits of the carbon cycle // *Nature.* 2013. V. 503. № 7476. P. 346–347. <https://doi.org/10.1038/503346a>
  38. *Weiss R.F.* Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas // *Marine Chem.* 1974. V. 2. № 3. P. 203–215. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(74\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0304-4203(74)90015-2)
  39. *Worrall F., Burt T., Adamson J.* Fluxes of dissolved carbon dioxide and inorganic carbon from an upland peat catchment: implications for soil respiration // *Biogeochemistry.* 2005. V. 73. № 3. P. 515–539. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-1717-2>
  40. *Yoon T.K., Jin H., Oh N.-H., Park J.-H.* Technical note: Applying equilibration systems to continuous measurements of CO<sub>2</sub> in inland waters // *Biogeosciences.* 2016. V. 13. P. 3915–3930. <https://doi.org/10.5194/bg-2016-54>

## Carbon Dioxide in Soil and Surface Waters in the North of Western Siberia: Methodological Approach and Quantitative

O. Yu. Goncharova<sup>1, \*</sup>, M. V. Timofeeva<sup>1, 2</sup>, G. V. Matyshak<sup>1</sup>, and A. V. Isaeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119'991 Russia*

<sup>2</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

<sup>3</sup>*Israel Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, 107258 Russia*

*\*e-mail: goncholgaj@gmail.com*

Dissolved inorganic carbon is an essential component of the carbon cycle, especially in the northern regions, while its loss through water bodies is still rarely included in regional carbon models. The tasks of the work included a detailed coverage of the methodological approach “headspace equilibration” to the study of the concentration of dissolved CO<sub>2</sub> in soil and surface waters, as well as the assessment of the range of CO<sub>2</sub> concentrations in waters of different genesis in the landscapes of the north of Western Siberia. As a result of the methodological work done, a protocol was developed and presented for measuring the concentration of CO<sub>2</sub> in waters by the “headspace equilibration” method with detailed calculations. The concentration of CO<sub>2</sub> in soil (supra-permafrost) and surface waters (river, bog, lake, etc.) ranged from 13 to 2983 μmol/l (274 to 57000 μatm), the vast majority of objects were supersaturated with CO<sub>2</sub> relative to the atmosphere. The maximum values of concentrations are characterized by supra-permafrost soil and bog waters; the minimum is the waters of aquatic ecosystems: thermokarst and forest lakes. The high variability of CO<sub>2</sub> concentration in waters necessitates a large number of measurements to obtain adequate estimates.

*Keywords:* dissolved carbon dioxide, permafrost, thermokarst lakes, peatlands