

1. Лукашѐв К. И., Лукашѐв В. К. Геохимия зоны гипергенеза. Минск: Наука и техника. 1975. 424 с.
2. Жовинский Э. Я. Геохимия фтора в осадочных формациях юго-запада Восточно-Европейской платформы. Киев: Наукова думка, 1979. 200 с.
3. Жовинский Э. Я., Крюченко Н. О. Вторичные солевые ореолы и их значение при решении поисковых и экологических задач на территории Украины // Проблемы комплексного освоения георесурсов: Матер. Всероссийской науч. конф., 27–29 сент. 2011 г., Хабаровск. Хабаровск, 2011. Т. 2. С. 124–129.
4. Хализова В. А., Бебешко Г. И., Полупанова Л. И., Алексеева В. А. Изучение устойчивости фторидных комплексов некоторых металлов в условиях гидролиза с целью определения фтора в минеральном сырье сложного состава // Журн. аналит. химии. 1979. Т. 34, Вып. 3. С. 501–506.

УДК 550.4.07

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ВЫДЕЛЕНИЙ МЕТАНА ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЁР

С. И. Зуй¹, Б. П. Власов², В. Н. Кузьмин², А. М. Павлюченко¹

¹ Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, ул. Академическая 27, 220072 Минск, Республика Беларусь; zoology@biobel.by

² Белорусский государственный университет, географический факультет, пр. Независимости 4, 220030 Минск, Республика Беларусь; vlasov@bsu.by

Возрастание концентраций парниковых газов в атмосфере Земли принято считать основной причиной глобального изменения климата. Диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄) несут ответственность более чем за половину общего вклада в антропогенный парниковый эффект. В этом аспекте особую актуальность приобретает проблема выявления как самих источников С, так и изучения углеродного цикла в целом. Из анализа многочисленных данных об изменениях в составе атмосферы Земли и оценок влияния парниковых газов на радиационный баланс планеты установлено, что основной вклад в него вносит CO₂, а вторым по значимости является вклад CH₄. Отсутствие баланса при оценках наблюдаемого обменного метанового цикла атмосфера-гидросфера-литосфера заставляет искать новые природные источники и процессы образования CH₄ [1] на суше и в океане.

При изучении природного углеродного цикла значительное внимание уделялось и уделяется источникам и стокам в Мировой океан, занимающий 70 % поверхности Земли [2]. Не меньшее внимание было уделено исследованиям на суше в её твёрдой части. Работ, посвящённых озёрным экосистемам, занимающим около 2 % площадей, имеется незначительное количество. При этом существуют регионы, где озёра могут составлять 10–20 % от общей площади, а озёрный газообмен становится важнейшим фактором углеродного цикла. В качестве примера можно привести западную часть Белорусского Поозерья, где водные ресурсы занимают значительные по охвату территории и являются структурообразующими элементами экосистемы региона в целом.

Цель настоящего исследования – предложить подходящий метод для поиска источников, измерения концентраций и мониторинга потоков метана с водной поверхности озёр и создать для этого необходимую конфигурацию оборудования.

Поиск подводных структур выделения метана и других углеводородов достаточно хорошо отработан геологами, занимающимися поисками месторождений нефти и газа. Месторождениям, скрытым в структурных ловушках, часто сопутствуют выделения газа через разрывные неоднородности горной среды. На поверхности выхода образуется конусообразная воронка с характерной для рыхлых отложений с окантовкой в виде бортика в верхней части структуры [3]. Эти воронки получили специальное название *пок маркеры* или *покмарки* (ПМ). ПМ могут иметь размеры от десятков сантиметров до сотен метров в диаметре и до десятков метров глубиной [4]. Покмарки выявлены в различных частях Мирового океана (в Северном, Норвежском, Баренцевом, Каспийском, Средиземном, Чёрном, Охотском морях, Мексиканском, Гвинейском заливах и т. д.) на глубинах от 5 м до 3 000 м и более. Они повсеместно обнаружены на дне Финского залива и тщательно изучались экспедициями ВСЕ-ГЕИ [5]. Покмарки открыты также и в арктических морях вдоль всего побережья Евразии [6, 7].

Как было выяснено, ПМ могут быть локализованы и в местах значительных по мощности донных отложений, богатых биологическими компонентами, и на обнажениях, приуроченных к разломам на морском дне. Только биогенными источниками обильное газовыделение многочисленными по-

кмарками объяснить невозможно. Для разумного объяснения к рассмотрению привлекают предположение о существовании потоков газов эндогенной природы, истекающих из геологических структур, включая и источники, возникающие при распаде по тем или иным причинам газовых гидратов [8].

Покмарки небольших размеров обнаружены на дне озёр Карелии, а также термокарстовых озёр Западной Сибири. Внешними признаками наличия ПМ может служить образования в виде газовых пузырей на поверхности озера. Пузыри особенно заметны в зимний период, когда накопление газа происходит в ледяных ловушках или в подлёдном пространстве. Освобождение из ловушки газа может сопровождаться факелом, что говорит об его углеводородной природе. Некоторые бесснежные канадские озера, когда они покрыты льдом, являются хорошим индикатором проявления газовой выделения. Явления газирования на водной поверхности, включая зимнее, наблюдались на некоторых северных озёрах Беларуси.

Внешние признаки газовой выделения в озёрах могут служить основанием для поисков покмарков. Для этого могут быть использованы сонары бокового обзора. В экспедициях ВСЕГЕИ использовался сонар CM2 (C-MAX Ltd.). Его характеристики позволяют сканировать дно на глубинах до 2.5 км и изменять зону охвата от 12.5 до 500 м. Конечный результат, создаваемый звуковыми волнами, отражёнными от поверхности дна, предстает в виде растрового изображения. На изображениях ПМ довольно легко выделяются, поскольку они похожи на свои изображения в оптическом диапазоне спектра. Сканирование дна сопровождается глубинным профилированием с помощью обычного эхолота и фиксацией места проведения съёмки GPS-приборами.

Структуру подземного строения ПМ озёрного происхождения и его связь с глубинными эманациями можно выявить с помощью непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) высокого разрешения [5]. Например, как в [5], на основе сейсмического комплекса приборов MD DSS sonar system (Meridata Finland Ltd) и GEONT-HRP (ООО «Спектр-Геофизика») или известного SEAMAP 3D (MITCHAM INDUSTRIES, INC.). Основные частотные характеристики излучателей этих комплексов находятся в диапазоне свыше 1 КГц, что обеспечивает вертикальное пространственное разрешение 20 см и меньше.

Знание точного пространственного положения ПМ позволяет перейти к выявлению его активности и мониторингу динамики объёмов газовой выделения. При значительных объёмах выделения измерения производятся непрерывным образом. Поток газа из ограничивающих пространственный забор камер поступает непосредственно в газоанализатор и проводится измерение концентраций компонент. При малых объёмах перед измерениями производится накопление газа в накопителе или в закрытой камере. Через заданный промежуток времени производится пробоотбор, а измерение концентраций газовых компонент в пробе проводится отдельным процессом. В последнем случае значительный временной промежуток накопления позволяет разделить процессы пробоотбора и измерения. Подобные технологии успешно применяются при оценках выделения парниковых газов из болотных экосистем [9].

Измерительный комплекс на основе метода закрытых эмиссионных камер состоит из собственно камеры, которая служит накопителем выделяемых газов, и отдельного контрольно-измерительного блока. В рабочем состоянии камера и блок связаны друг с другом питающим электрокабелем и шлангами для откачки и возвращения газовых проб. В режиме накопления разъёмы камеры герметично перекрыты.

Камера-модуль представляет собой изготовленный из ПВХ герметичный параллелепипед, одно из оснований которого отсутствует, т. е. открыто для газообмена. В нашем случае отсутствующим (открытым) основанием камера устанавливается на плавающую по водной поверхности герметизирующую рамку, образуя замкнутую среду и отделяя определённый объём воздуха от атмосферы. Поступающий из воды газ накапливается в камере и по скорости изменения его концентрации оценивается поток с изучаемого участка. Камеры имеют форму в виде параллелепипеда ($70 \times 70 \times 51$ см), в основании которого лежит квадрат. Объём V камеры составляет $0,269 \text{ м}^3$, а площадь S покрываемого открытым основанием участка $0,49 \text{ м}^2$. Высота камеры может наращиваться посредством соединения стандартных модулей.

Подключением электрокабеля обеспечивается работа двух вентиляторов со скоростью перемешивания 1 л/мин и температурных датчиков, закреплённых внутри и снаружи камеры. Рост концентрации газа в камере означает, что идёт выделение газа с водной поверхности, а спад – о поглощении. Зная площадь контакта камеры с водной поверхностью S и её внутренний воздушный объём V ,

по скорости изменения концентрации газа $\Delta C/\Delta t$ в этом объёме, можно вычислить поток F , поступающий в камеру: $F = \Delta C/\Delta t \times V/S$.

Установившееся равновесное давление газа между водой и воздухом в закрытой камере останавливает процесс газообмена, искажая оценку потока. Для устранения этого недостатка в процесс измерения была введена процедура проветривания камеры, с периодичностью, зависящей от величины потока. Таким образом, время экспозиции одного измерения зависело от скорости потока (изменение концентрации в пределах 20 млн^{-1}) и температуры внутри камеры (изменение в пределах $30 \text{ }^\circ\text{C}$), но не превышало 1 часа.

Для измерений потока метана с водной поверхности используется портативный инфракрасный газоанализатор *Ultraportable Greenhouse Gas Analyzer* (Los Gatos Research, Inc.), расположенный в измерительном блоке. Данный газоанализатор предназначен для долговременного мониторинга уровня содержания метана и паров воды в атмосфере. Газоанализатор UGGA характеризуется следующими конструкционными особенностями: широким диапазоном измеряемых концентраций, широким диапазоном рабочих температур, компактностью, малым весом, низким энергопотреблением (менее 4 Вт), низким уровнем шума (менее 1 млн^{-1}), возможностью коррекции показаний в реальном времени (с помощью встроенного сенсора температуры и давления в ячейке); возможностью проведения сервисного обслуживания оптики непосредственно оператором, отсутствием необходимости перекалибровки на базе производителя.

Для подачи воздушного потока в рабочую зону газоанализатора, расположенного вне камеры, используется непрерывно работающий насос, соединенный с воздушными шлангами из камеры. Чтобы обеспечить защиту газоанализатора от водяных капель, предусмотрен специальный фильтр.

Концентрация метана в объёме камеры измеряется с интервалом в 5 сек. Полученная информация о концентрации поступает в контроллер измерительного блока и записывается в его внутреннюю память. Одновременно на контроллер поступают данные с датчиков температуры, которые расположены как внутри, так и снаружи камеры.

Для случая режима накопления предусмотрен отбор газа в стандартные вакуумируемые колбы, которые могут быть подключены посредством специального автосемплера к стандартному газовому хроматографу (ГФ). Преимуществом использования ГХ является возможность одновременно определять концентрации сразу нескольких газов (например, CH_4 , CO_2 , N_2O) в одном образце воздуха. В практическом случае образцы анализируются в лаборатории на газовом хроматографе (Хроматек Кристалл 5000), при этом используется электронный захватывающий детектор (ЭЗД) для анализа N_2O и CO_2 и пламенный ионизационный детектор (ПИД) для CH_4 .

В результате выполненных работ был предложен измерительный комплекс для определения потоков CH_4 и CO_2 из донных отложений озёр. Этот комплекс является последним звеном в системе мониторинга эндогенных и биогенных источников метана (покмарков) и оксида углерода. В ходе его апробации на оз. Нарочь определена оптимальная конфигурация технических и программных средств для эффективного сбора всей необходимой информации. В ходе тестирования комплекс показал надёжную работу без значительных в ходе исследований трудностей и неполадок. Данный измерительный комплекс можно рекомендовать для локального мониторинга потоков CH_4 и CO_2 с водной поверхности с целью изучения углеродного баланса озёр и водохранилищ.

1. *Lowe D. C.* A green source of surprise // *Nature*. 2006. Vol. 439. P. 148–149.

2. *Parparov A., Hambright K. D., Hakanson L., Ostapenia A.* Water quality quantification: basics and implementation // *Hydrobiologia*. 2006. Vol. 560. P. 227–237.

3. *King L.H., McLean B.* Pockmarks on the Scotian Shelf // *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 1970. Vol. 81. P. 3141–3148.

4. *Hovland M.* Seabed Pockmarks and Seepages: Geological Ecological and Environmental Implication. Springer Netherlands, 1988. 336 p.

5. *Жамойда В. А., Рябчук Д. В., Спиридонов М. А.* и др. Геолого-геоморфологические условия формирования покмарков в восточной части Финского залива // *Региональная геология и металлогения*. 2013. № 54. P. 25–37.

6. *Малаховский Д. Б., Амантов А. В.* Геолого-геоморфологические аномалии на севере Европы // *Геоморфология*. 1991. № 1. С. 85–95.

7. *Юсупов В. А., Салюк А. Н., Карнаух В. Н.* и др. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // *Докл. РАН*. 2010. Т. 430, № 1 С. 5–10.

8. *Геодекян А. А., Троцюк В. Я., Авилон В. Я.* и др. Угледородные газы в водах Балтийского моря // *Океанология*. 1979. Т. 19, № 4. С. 638–643

9. *Livingston G. P., Hutchinson G. L.* Enclosure-based measurement of trace gas exchange: Applications and sources of error // *Biogenic trace gases: Measuring emissions from soil and water*. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1995. P. 14–51.