

На правах рукописи



МАКАРОВ Михаил Михайлович

**ПУЗЫРЬКОВЫЕ ВЫХОДЫ МЕТАНА
ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ**
25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Иркутск – 2016

Работа выполнена в лаборатории гидрологии и гидрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН)

Научный руководитель: **Гранин Николай Григорьевич**, кандидат географических наук, заведующий лабораторией гидрологии и гидрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Лимнологический институт СО РАН

Официальные оппоненты: **Шакиров Ренат Белалович**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, с.н.с. лаборатории газогеохимии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

Жарков Рафаэль Владимирович, кандидат географических наук, в.н.с., лаборатории вулканологии и вулканопасности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН

Защита состоится «16» декабря 2016 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 005.017.02 при ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН. по адресу: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института им. В.И. Ильичева ДВО РАН и на официальном сайте: <http://www.poi.dvo.ru>

Отзывы просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43. Тел. / факс: 8(423) 2311400; e-mail: fedi@poi.dvo.ru.

Автореферат разослан «26» октября 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 005.017.02, к.г.н.



Ф.Ф. Храпченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Проблема изменения глобального климата в настоящее время является одной из самых острых, стоящих перед мировым научным сообществом. Метан (CH_4) является одним из наиболее важных парниковых газов, и его распространение требует детальной количественной оценки. Байкал — самое крупное пресноводное озеро в мире, вносит свой вклад в эмиссию метана. В 1992 г. на основе данных российско-американской глубинной сейсмической экспедиции впервые предположили наличие газовых гидратов (ГГ) в осадках озера. Сейсмический сигнал - BSR (Bottom Simulating Reflector), был зафиксирован в сейсмических профилях осадочных пород и позволил предположить наличие слоя ГГ. В 1998 г. они были обнаружены на глубине 120 м в районе Южной котловины [<http://www-sbras.nsc.ru/HBC/2000/n15/f8.html>]. В 2004-2009 гг. на дне Байкала описаны районы приповерхностного залегания ГГ [Клеркс, 2004; Егоров, 2009].

ГГ образуются при определенных РТ-условиях (низких температурах и большом давлении) и наличии достаточного количества растворенного в воде газа. Температура придонного слоя воды Байкала, глубже 300 м изменяется незначительно и в среднем составляет (3,2-3,5°C) [Shimaraev, 1994]. Согласно фазовой диаграмме, определяющей условия стабильности гидратов метана в воде (рис. 1), их образование при этой температуре возможно при давлении 3,5 МПа, которое обеспечивается слоем воды толщиной более 380 м. Термобарические условия стабильности ГГ существуют в донных отложениях всей глубоководной части (более 400 м) озера [Дучков, 2003].

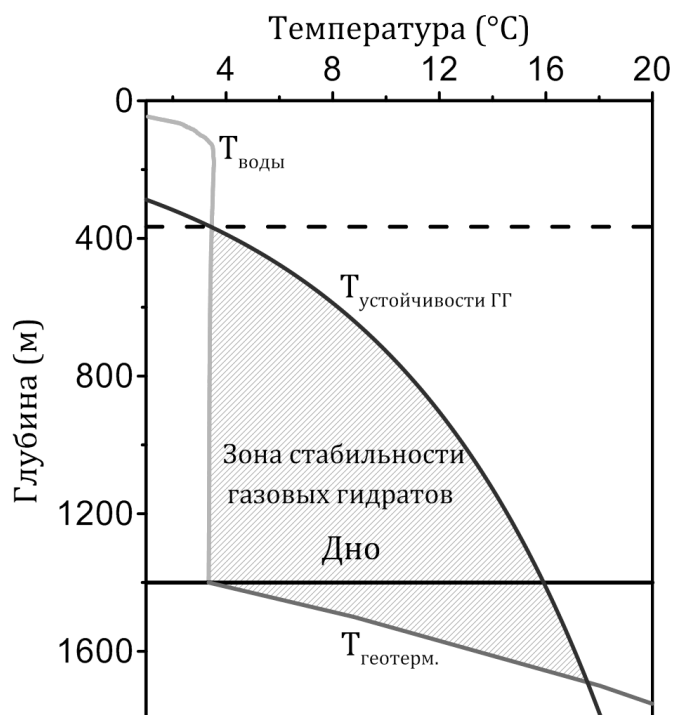


Рис. 1. Фазовая диаграмма устойчивости газовых гидратов

За счет осадконакопления, нижняя граница стабильности ГГ постоянно смещается в верх, приводя к их дестабилизации и высвобождению метана, который накапливается и по действующим разломам поднимается вверх.

Достигая границы дно-вода, газ в виде пузырьков устремляется к поверхности, образуя газовый факел (Seep), который отчетливо виден на эхограммах, получаемых гидроакустическими станциями. Нарушение параметров стабильности ГГ ведет к высвобождению большего объема свободного метана и в перспективе может стать причиной экологической катастрофы. Повышенные суммарные концентрации растворенного метана в воде могут привести к массовым заморам гидробионтов [Гранин, Гранина, 2002]. Применяя уравнения регрессии по [Bastviken et al., 2004], учитывая огромную площадь поверхности озера и концентрацию растворенного фосфора, получаем ежегодный бюджет CH_4 около 0,020 Мт/год. Реальные значения растворенного метана составляют 0,006 Мт/год [Schmid et al., 2007]. Исследования показали, что за последние 10 лет концентрация растворенного метана увеличилась в три раза [Гранин и др., 2014], при этом переходный процесс начался в 2003 г. и сопровождался линейным увеличением концентрации метана. Его содержание в глубинных водах Южного и Среднего Байкала к 2012 г. превышало зарегистрированные в 2002–2004 гг. фоновые значения в 10–30 раз [Гранин и др., 2013]. Данные события совпадают по времени с регистрацией первых случаев заболеваний байкальской губки *Lubomirskia baicalensis* (Pallas, 1771) [Бормотов и др., 2011]. Косвенным подтверждением воздействия повышенной концентрации метана на экосистему озера является бурное развитие зеленых нитчатых водорослей в прибрежной зоне [Kravtsova et al., 2014; Тимошкин и др., 2014], которое может быть обусловлено не только поступлением в область литорали повышенного количества биогенных элементов антропогенного происхождения, но и метанола, который является первым метаболитом при окислении метана. Известно, что метанол усваивается наземными и водными растениями для производства сахаров и аминокислот также быстро, как двуокись углерода [Nonomura, Venson, 1992]. В настоящее время во многих районах озера заболевания и гибель различных видов губок стремительно прогрессируют [Грачев и др., 2015; Тимошкин и др., 2015; Деникина и др., 2016]. Для количественной оценки метана необходимы данные о расположении осадков, содержащих газогидратные слои и места пузырьковых выходов газа. Комплексный анализ данных сейсмоакустической разведки позволяет по данным о BSR установить распространенность газовых гидратов в донных отложениях озера [Hutchinson et al., 1991; Klerkx et al., 2003]. Спутниковый мониторинг с использованием данных системы MODIS [<https://lpdaac.usgs.gov>] установленные на спутники TERRA и AQUVA позволяет в период ледостава обнаруживать проталины во льду, связанные с пузырьковыми выходами. Гидроакустические исследования позволяют оценить пузырьковый поток метана [Granin et al., 2012]. Актуальным является объединение комплекса полученных данных, а также их картирование с применением геоинформационных технологий.

Цель исследования – исследовать пространственное распределение пузырьковых выходов газа озера Байкал, определить потоки из этих источников и установить связь характеристик акустических изображений пузырьковых струй (факелов) с величиной потока метана.

Задачи исследования:

- проанализировать данные акустических съемок за период с 2005 по 2016 гг. и составить карту пузырьковых выходов газа на озере Байкал;
- на основе результатов акустических съемок создать электронную базу данных пузырьковых выходов газа на озере Байкал;
- используя дистанционный акустический метод, основанный на принципе некогерентного сложения акустических откликов (эхосигналов) от ансамбля пузырьков газа, рассчитать пузырьковый поток метана в разноглубинных факелах;
- выполнить анализ и классификацию пузырьковых выходов газа по таким параметрам как: глубина, величина пузырькового потока газа, межгодовая активность, высота акустического образа (факела);
- установить зависимость высоты факела от величины пузырькового потока газа и определить возможность использования данной зависимости для экспрессной оценки потока пузырькового метана по измеренной высоте факела;
- создать программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить акустическое зондирование водной толщи озера Байкал с целью измерения пузырькового потока метана;

Научная новизна. Впервые для озера Байкал проведен анализ данных гидроакустических съемок, выполненных с 2005 по 2016 гг. и составлена карта пузырьковых выходов газа (ПВГ) [Макаров и др., 2014]. Представлена классификация пузырьковых выходов газа, они разделены на три группы: мелководные (от 0 до 380 м), промежуточные (от 380 до 1000 м) и глубоководные (от 380 до 1400 м) [Granin et al., 2010]. Впервые определена зависимость высоты факелов от пузырькового потока газа для каждой группы. Показано, что отношение высоты факела к пузырьковому потоку газа имеет полулогарифмическую зависимость, и позволяет проводить экспрессные оценки потоков пузырькового метана в газовых факелах озера Байкал. Анализ зависимости высоты факела от потока газа показал, что существуют выходы газа, которые характеризуются меньшей высотой факела при сравнимых потоках газа. Находятся они на глубинах от 380 до 1000 м и формируют группу промежуточных выходов газа.

Практическая значимость полученных результатов. На основе полученных уникальных данных о пузырьковых выходах газа на акватории озера Байкал построена карта их пространственного распределения. Комплексные характеристики ПВГ (координаты, высота факела, глубина выхода газа, величина пузырькового потока газа) могут быть востребованы при исследовании их влияния на биоту озера.

Данные по вкладу пузырьковых выходов газа в перемешивание водной толщи могут быть полезны при моделировании гидрологических процессов в глубоководной зоне озера Байкал, где устойчивая стратификация может быть нарушена восходящим потоком пузырьков. Созданный программно-аппаратный комплекс (ПАК) «Эхо-Байкал» на основе модернизированного эхолота Furuno FCV-1100 с авторским программным обеспечением, позволяет в автоматическом режиме проводить сбор, первичную обработку, накопление и визуализацию гидроакустической информации по четырем разночастотным каналам, что увеличивает область научных исследований, в которых он может быть задействован. Особенности комплекса, такие как возможность передачи данных зарегистрированного эхосигнала и географических координат научно-исследовательского судна (НИС) по локально вычислительной сети (ЛВС) НИС, позволяют визуально контролировать положение под водой любого оборудования, в том числе гидрологического и ихтиологического, в любой точке НИС (например, на траловой или гидрологической лебедке). Благодаря своей универсальности, комплекс активно используется для проведения гидроакустических съемок рыбных запасов озера Байкал.

Основные положения, выносимые на защиту:

На дне озера Байкал найдены и обследованы 120 мелководных ПВГ, приуроченных в основном к дельте р. Селенга, и 22 глубоководных ПВГ, расположенных во всех трех котловинах озера. Характеристики ПВГ занесены в разработанную автором пополняемую базу данных, к настоящему времени содержащую более 500 записей 40 областей газовой разгрузки.

С помощью гидроакустического метода выполнена оценка количества метана, поступающего в водную толщу за счет пузырьковых выходов газа. Показано, что пузырьковый поток метана, сопоставим с потоком метана, поступающим в водную толщу за счет осадконакопления и уплотнения донных осадков. Установлена зависимость высоты факела, фиксируемой на эхограмме, от величины пузырькового потока газа.

Зафиксированы три случая «извержения» (начало работы) двух глубоководных ПВГ. Показано, что объемный поток в первой порции газа больше, чем поток газа в стационарном режиме работы ПВГ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на международных и российских конференциях и симпозиумах: International Conference on Gas Hydrate Studies (Иркутск, 2007); 9-th International Conference on GAS in Marine Sediments (Bremen, Germany, 2008 г.); 10th International Conference on Gas in Marine Sediments (п. Листвянка, 2010 г.); XVIII международная школа морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 2009 г.); VIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиосвязи» (Иркутск, 2009 г.); Российская конференция «Газовые гидраты в экосистеме Земли» (Новосибирск, 2014 г.); Российская конференция «Метан в Морских Экосистемах» (Севастополь,

2014 г.); XVIII научная конференция по радиофизике (Нижний Новгород, 2014 г.), Шестая Международная Верещагинская Байкальская Конференция (Иркутск, 2015).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 15 работ, из них 4 статьи в журналах из списка ВАК и 11 тезисов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 116 страницах, содержит 3 таблицы и 42 рисунка. Список литературы включает 141 источник, из которых российских – 72 и зарубежных – 69.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю зав. лаб. гидрологии и гидрофизики ФГБУН ЛИН СО РАН, к.г.н. Гранину Н.Г. за помощь в организации и проведении исследований. Отдельно благодарность выражается доц. каф. радиотехники ННГУ им. Н.И. Лобачевского, к.ф.-м.н. Муякшину С.И. за помощь в расчетах и обсуждение полученных результатов. За оказанную помощь при выполнении работ и обсуждении результатов автор благодарит сотрудников лаборатории гидрологии и гидрофизики ФГБУН ЛИН СО РАН. Отдельную благодарность автор выражает командам НИС «Г. Титов» и «Г.Ю. Верещагин» за оказанную помощь в работе. Особую благодарность автор выражает своим родным за моральную и финансовую поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы даны определения пузырьковых выходов газа и клатратных структур газовых гидратов. Показана хронология изучения ГГ и как визуального проявления пузырьковых выходов газа в океанах, морях и озерах. Приведены данные о распределении ГГ на суше и в донных осадках водных объектов. Выполнен обзор основных направлений современных исследований ГГ и ПВГ. Проанализированы основные методы оценки потока пузырькового газа, а также их преимущества и ограничения.

Глава 2. ИНСТРУМЕНТЫ, МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ

Глава посвящена описанию аппаратуры и разработанных программных средств акустического зондирования водной толщи. Приведены характеристики программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Эхо-Байкал», модернизированного рыбопоискового эхолота Furuno FCV-1100 и профилографа STD SBE-25, использованного для проведения гидрологической разведки районов пузырьковой разгрузки метана. Описаны параметры настройки оборудования, методика и условия проведения его калибровки и особенности выполнения акустических съемок. Выполнена модернизация эхолота, ключевыми параметрами которого являются: произвольный синтез несущей частоты зондирующего импульса от 15 до 200 кГц, мощность излучений до 3 кВт, изменяемая длительность зондирующего импульса от 0,1 до 5 мс. Поскольку у эхолота отсутствует возможность выдачи на ПК цифровых данных акустического зондирования, для решения

этой проблемы был разработан и изготовлен адаптер. Адаптер подключается к цифровой шине передачи данных, между аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и цифровым сигнальным процессором (ЦСП, англ. DSP – digital signal processor). Данные передаваемые по цифровой последовательной шине, являются оцифрованной амплитудой огибающей эхо-сигнала. «Перехваченные» адаптером цифровые данные, дополняются данными о географической позиции НИС, и передаются на ПК, через ЛВС. Географические координаты адаптер получает от интегрированного навигационного приемника ML8088, выполненного в виде компактной интегральной схемы, производства ООО «НАВИА» (Россия), использующей для решения навигационной задачи радиосигналы спутниковой группировки ГЛОНАС. Обработка акустического сигнала эхолотом осуществляется по следующей схеме: сигнал с приемопередающей антенны (трансдюсера) поступает на схемы предварительной фильтрации, передается на смеситель частоты, где из несущего высокочастотного сигнала преобразуется в промежуточную частоту, которая фильтруется в узкой полосе частот, зависящей от длительности излучаемого импульса (0,1–5 мс), и подается на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) со встроенным 24 битным АЦП. Разрядность АЦП обеспечивает динамический диапазон 144 дБ. Частота оцифровки огибающей амплитуды эхо-сигнала 44,1 кГц. В ПЛИС происходит оцифровка эхо-сигнала и вычисления логарифма от амплитуды эхо-сигнала, дальнейшая его обработка выполняется в цифровом виде внутри ЦСП.

Для оценки точности вычисления логарифма и показателя его степени, выполнена сквозная лабораторная калибровка эхолота. На входные клеммы эхолота, подавался сигнал с генератора сигналов специальной формы – ГСС-10, амплитуда и форма сигнала контролировалась при помощи цифрового осциллографа Tektronix DSP1200. Выходные значения ПЛИС записывались в таблицу, в результате была получена зависимость выходного кода АЦП от входного напряжения на клеммах антенны эхолота Furuno FCV-1100.

Для расчета калибровочных коэффициентов использовалось стандартное уравнение гидроакустики, которое применяется для восстановления силы цели подводных звукорассеивающих объектов по напряжению на клеммах эхолота:

$$TS = A * \text{Log}(U_{\text{вх}}) + B + 40 * \text{Log}(R) + 2 * \alpha * R \quad [1],$$

где: TS – сила цели подводного объекта (дБ), $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение на клеммах антенны (в), R – дистанция до объекта (м), α – коэффициент затухания звука в воде (дБ/м), A и B масштабный и линейный коэффициент калибровки эхолота, соответственно. В случае использования эхолота Furuno FCV-1100: $\text{Log}(U_{\text{вх}})$ – код АЦП получаемый от установленного адаптера. Формула преобразуется следующим образом:

$$TS = A * \text{АЦП}_{\text{код}} + B + 40 * \text{Log}(R) + 2 * \alpha * R \quad [2],$$

Калибровка эхолота выполняется при помощи стандартных калибровочных сфер, диаметр которых выбирается в соответствии с рабочей

частотой эхолота [http://www.simrad.net/ek60_ref_english/default.htm]. Работа по масштабной калибровке эхолота была выполнена со льда озера Байкал в 2010 г. Калибровочная сфера погружалась при помощи гидрофизической лебедки на специальном нагруженном подвесе, на заданную глубину, таким образом, чтобы оставаться на акустической оси приемоизлучающей антенны. Этому способствовало отсутствие значимых скоростей подводных течений (для подледного периода на озере Байкал они составляют 1-2 см/с [Wuest, 2000]). В результате обработки массива данных рассчитаны калибровочные коэффициенты эхолота. Величина масштабного коэффициента определяется исключительно математическими преобразованиями, выполняемыми в связке АЦП-ПЛИС и не изменяется во времени. При этом, линейный коэффициент B может изменять свои значения (деградация приемоизлучающей антенны, аналоговых трактов и т.д.).

Для регистрации, накопления и отображения акустических данных эхолота создана авторская программа «Эхо-клиент» под управлением операционной системы семейства Microsoft Windows с необходимым объемом оперативной памяти не менее 1 ГБ и не менее 4 ГБ на диске для хранения акустических данных, полученных в течение суток, а также процессор с тактовой частотой не менее 1,2 ГГц. Для минимизации нагрузки на ЛВС данные по ней передаются в режиме широкого вещания. Каждый ПК подключенный к корабельной ЛВС может на равных правах получать данные одновременно с нескольких эхолотов. ПО позволяет отображать и сохранять данные с четырех источников одновременно и проводить акустическую съемку синхронно двумя эхолотами с различными зондирующими частотами (28, 50, 120 и 200 кГц). Для каждого источника данных, ПО использует собственные калибровочные коэффициенты, кроме этого предусмотрена возможность настройки шкалы глубин (верхний и нижний пределы), значений порога отображения эхограммы, выбор диапазона ее цветовой палитры. Каждый пакет данных, принимаемый «Эхо-клиентом», содержит информацию о географических координатах НИС, которые преобразуются в стандартные сообщения протокола NMEA (\$GPRMC и \$GPGGA) [<http://www.tronico.fi/ОН6NT/docs/NMEA0183.pdf> 2015.02.11] и передаются в доступный коммуникационный порт ПК, что позволяет отслеживать географическую позицию НИС и фиксировать пройденный маршрут, используя стандартные навигационные программы (OpenCPN, Fugawi и т.д.). Дополнительные опции программы реализуются за счет встроенных алгоритмов, например, автоматическое детектирование глубины дна и сохранение данных в батиметрический файл с совмещением их с географическими координатами НИС. Доступны инструменты, позволяющие оперативно вычислить скорость погружения или всплытия звукорассеивающих объектов (пузырьки газа, гидрофизические приборы и т.д.). В процессе работы, ПО «Эхо-клиент» сохраняются графические образы эхограмм в формате *.bmp и файлы описания в формате *.csv.

На основе модернизированного эхолота Furuno FCV-1100 с авторским ПО «Эхо-клиент» создан ПАК «Эхо-Байкал», который позволяет в автоматическом режиме проводить сбор, первичную обработку, накопление и визуализацию гидроакустической информации по исследованию районов пузырьковой разгрузки метана на озере Байкал, построения батиметрических карт локальных участков дна, исследования фронтальных зон весеннего термобара, сопровождения работ с использованием различного гидрофизического и гидробиологического оборудования, проведения мониторинга численности и биомассы рыб.

За весь период наблюдений за ПВГ был собран массив акустических и географических данных, который было необходимо систематизировать. Значительные объемы данных требуют создания надежного и удобного инструмента для их хранения и обработки. Поэтому следующим этапом работ стало создание базы данных (БД), включающей параметры ПВГ, эхограммы и данные акустических съемок ПВГ на озере Байкал. В БД содержатся результаты дистанционного акустического зондирования, выполненные на НИС ЛИН СО РАН с использованием ПАК «Эхо-Байкал». БД позволяет оперативно получать данные об их пространственном распределении и изучать временную изменчивость активности отдельных факелов. БД включает в себя: имя ПВГ, дату и время регистрации, координаты, глубину дна, высоту ПВГ, поток метана, курс и скорость судна, эхограммы ПВГ на разных частотах и акустические данные в бинарном формате. Структура БД состоит из таблиц: 1) имена факелов или районов; 2) информация о факелах; 3) пользователи и разрешения и 4) информация о БД. Размещение бинарных данных в ZIP архиве позволяет избавиться от чрезмерного увеличения объема файлов БД и выполнить их архивацию.

Опытные исследования РПР ПВГ «Ступа» (м. Кадильный, южная котловина озера) и мелководного выхода газа в дельте р. Селенга выполнены с использованием визуального метода. В работе использовали данные полученные при помощи: 1) внешних видеокамер глубоководного обитаемого аппарата «МИР1» в рамках экспедиции «Миры» на Байкале в 2010 г. и 2) с камер GoPro при водолазных погружениях 2013 и 2014 гг. В 2013-2014 гг. проведены акустическая съемка и запись шумов, генерируемых пузырьками газа. Запись акустических шумов выполнялась для оценки технической возможности восстановления РПР по пассивным акустическим данным.

Расчет величины потока метана переносимого пузырьками газа проводили с использованием дистанционного акустического метода, основанного на принципе некогерентного сложения акустических откликов от ансамбля пузырьков газа, подробно рассмотренного в работе [Muyakshin et al., 2008]. При акустической съемке 2010 г. была достигнута очень хорошая точность «попадания» в центр факела ПВГ «Санкт-Петербург», но горизонтальные профили интенсивности рассеяния сильно изменялись во времени, то есть от пересечения к пересечению, что не позволило провести

усреднение по всем пересечениям. В связи с этим, методика [Muyakshin et al., 2008] была скорректирована и, в последующем, полный поток массы J определяли для каждого пересечения факела по отдельности, путем интегрирования горизонтального профиля рассеяния вдоль траектории судна и умножения его на ширину озвученной области дна $d=2h \cdot \text{tg}(\beta)$ и коэффициенты в соответствии с формулой (3):

$$J = K \cdot \rho_g \cdot 2h \cdot \text{tg}(\beta) \cdot \int_{L_1}^{L_2} \sigma_v(l) dl \quad [3],$$

где: h – глубина, на которой регистрировалась интенсивность эхосигнала, β – полуширина диаграммы направленности эхолота, l – координата вдоль траектории движения судна. Результаты для каждого обследованного факела усредняли. Плотность метана вычисляли с учетом роста его сжимаемости при высоких давлениях по уравнению состояния Ван-дер-Ваальса.

Проведено географическое районирование зарегистрированных ПВГ на озере Байкал. В период с 2002 по 2015 гг. обнаружено 22 глубоководных и 120 мелководных ПВГ. Выходы газа обнаружены во всех трех котловинах озера. Котловины обособлены друг от друга подводными перемычками - дельта р. Селенга и Академический хребет. Каждая котловина совпадает с областью наиболее интенсивного осадконакопления. Мощность осадков для Южной, Центральной и Северной котловин составляет 7, 7.5 и 4.4 км соответственно [Логачев, 2003]. К настоящему времени при помощи гидроакустического метода исследовано 28% всей площади дна глубже 400 метровой изобаты, южная, центральная и северная котловины озера Байкал изучены неравномерно (42, 28 и 19% соответственно).

Глава 3. ПУЗЫРЬКОВЫЕ ВЫХОДЫ ГАЗА ОЗЕРА БАЙКАЛ

В главе приведено подробное описание ПВГ, их классификация и даны оценки потоков метана. При исследовании пространственного распределения ПВГ особое внимание уделено их положению относительно минимальной глубины устойчивости ГГ, где профиль температуры стабильности ГГ пересекает профиль температуры водной толщи озера, т.е. верхней границы устойчивости газовых гидратов. По этому принципу все обнаруженные в Байкале выходы газа разделены на две основные группы: «мелководные» - глубина менее 380 м и «глубоководные» - глубина более 380 м.

К настоящему времени зарегистрировано 22 глубоководных ПВГ.

Глубоководный факел «Академический» (англ. «Academic ridge») впервые зарегистрирован 04.06.2013 г., в районе Академического хребта (табл. 1). Газ высачивается из дна на глубине 656 м и регистрируется на эхограммах вплоть до глубины 284 м. Пузырьки газа поднимаются со средней скоростью 19,1 см/с, что эквивалентно диаметру пузырька 3,6 мм [McGinnis, 2006] ПВГ регистрировали в 2013 и 2015 гг. при каждом посещении. Высота факела варьирует от 665 до 705 м. Оценки потока метана дают значения на уровне 50-150 т/г. (табл. 1).

Таблица 1

Акустические съемки ПВГ для которых выполнен расчет потока метана

Название ПВГ	Координаты Lat/Lon	Кол-во съемок	Глубина, м	Высота, м	Поток, т/г.
Академический	53,4903 / 108,0766	3	665-705	380-430	52,0-156,0
Горевой утес	53,3045 / 108,3912	3	870-895	260-460	5,3-7,0
Хобой	53,4034 / 107,8833	6	510-550	145-245	0,3-55,4
Кедровый-Листвянка	51,5908 / 105,0211	3	323-608	775-897	26.9-30.8
Красный Яр	52,3584 / 105,9694	4	725-735	295-410	5,9-29,9
Маленький	51,9200 / 105,6400	3	1305-1345	535-875	15,0-29,0
Крестовский-Селенга	52,5430 / 106,6400	1	726	476	69,6
Посольская Банка	52,0346 / 105,8182	9	205-760	205-495	0,2-61,6
Санкт-Петербург	52,8952 / 107,1898	4	1370-1425	505-815	74,2-92,1
Ступа	51,9758 / 105,3497	8	390-520	245-445	7,6-80,4
Ухан-Тонкий	52,8265 / 107,5950	2	1055-1060	495-645	14,2-115,3
Ворота	52,9336 / 106,8700	3	1280-1285	860-870	146,1-438,5

Глубоководный факел «Горевой утес» («Gorevoy Utes») впервые зарегистрирован 20.09.2005 г., расположен на северо-западе от мыса Горевой-Утес (табл. 1). В результате ежегодных наблюдений установлено, что одновременно с газом происходит просачивание нефти. Пузырьки газа поднимаются с глубины 830-850 м со скоростью от 10 до 12 см/с, что ниже характерных скоростей для глубоководных выходов газа (18-24 см/с) и, достигая глубин 120-80 м, полностью растворяются. Вероятно, такие низкие скорости подъема пузырьков обусловлены большей массой пузырька, вследствие обволакивания пленкой из нефти. Иногда на эхограммах регистрируется факел, который достигает поверхности, на которой в свою очередь образуются нефтяные разводы. Выход газа посещается и регистрируется на эхограммах регулярно с 2005-2015 гг. Оценка потока метана дает значение в диапазоне от 7 до 10 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Хобой» («Hoboi», H) зарегистрирован 17.07.2007 г. в районе мыса Хобой (табл. 1). При первой регистрации отмечено несколько выходов газа на площади 500х500 м, поэтому факел был

охарактеризован как глубоководный групповой факел. В дальнейшем район выхода газа деградировал: с 2011 г. на нем регистрируется один, но устойчивый выход газа. Пузырьки газа поднимаются с глубины 517 м и полностью растворяются на глубине 280 м. Начиная с 2007 г. ПВГ посещался 7 раз, и при каждом посещении проводилась акустическая съемка, при которой регистрировался выход газа. Оценка потока метана дает значение в диапазоне от 9 до 10 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Кедровая-Листвянка» («KedrListv», KL) впервые зарегистрирован 25.09.2008 г., расположен у восточного берега на разрезе Кедровая-Листвянка (табл. 1). Пузырьки газа высачиваются на глубине 589 м, и полностью растворяются на глубине 200 м, в редких случаях достигая поверхности. Серия наблюдений в период с 2008 по 2015 гг. показала, что факел регистрируется нерегулярно. По данным акустических съемок 2012 и 2013 гг. рассчитан поток метана, который составляет от 26 до 29 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Красный Яр» («KrasnyYar», KY) зарегистрирован 13.07.2007 г. (табл. 1). С 2007 г. выполнено 23 посещения, и в каждом ПВГ регистрировался на эхограммах. Пузырьки газа поднимаются с глубины 746 м и полностью растворяются, достигая 396 м. Максимальная высота факела - 416 м зарегистрирована 31.05.2008 г. Оценка потока метана для этого факела дает значение от 18-19 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Маленький» («Malenki», Mal) впервые зарегистрирован 19.06.2006 г. в районе одноименного ПГВ (табл. 1). В большинстве посещений отмечено, что пузырьки газа поднимаются с глубины 1296 м и, достигая глубин 629 м, полностью растворяются. ПВГ является на сегодняшний день самым высоким выходом газа на озере Байкал, максимальная высота - 1025 м зарегистрирована 23.06.2011 г. (рис. 2). Ежегодный мониторинг выявил непостоянство активности факела: при некоторых посещениях факел не регистрировался. При помощи гидроакустического комплекса с борта НИС «Г. Титов» зафиксировано два случая извержения данного факела: 18 июля и 6 сентября 2012 г. Скорость подъема пузырьков газа для данного факела составляет, в среднем, 17 см/с, что соответствует их диаметру от 2 до 6 мм. Оценка потока метана данного ПВГ дает значение от 15-16 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Санкт-Петербург» («Sankt-Petersburg», SPB) впервые зарегистрирован 20.09.2005 г., в районе геологической структуры ПГВ «Санкт-Петербург» (табл. 1). Пузырьки газа поднимаются со скоростью от 20 до 25 см/с, что соответствует их диаметру от 6 до 12 мм. Высота факела в различные годы составляла от 505 до 960 м. Ежегодный мониторинг 2005-2015 гг. выявил перемещение ПВГ вдоль разлома дна в северо-восточном направлении на расстояние до 1500 м и нерегулярную его активность. Поток метана оценен в диапазоне от 50 до 75 т/г. При помощи гидроакустического комплекса с борта НИС «Г. Титов» зафиксирован случай извержения данного пузырькового выхода газа 19.07.2012 г. (табл. 1).

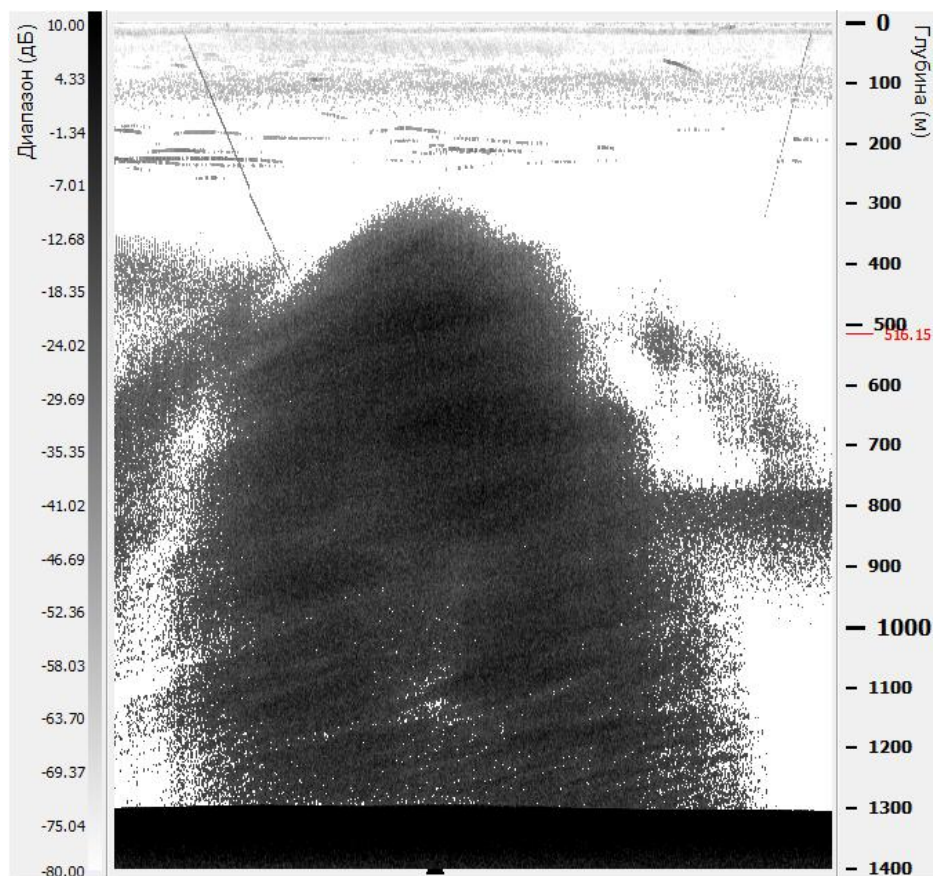


Рис. 2. Эхограмма ПВГ «Маленький», 23.07.2011 г.

Глубоководный факел «Ступа» («Stupa», St) зарегистрирован 20.08.2007 г., в районе пос. Голоустное (южный Байкал). Название ПВГ получил по специфической форме факела запечатленного на эхограмме при первой акустической регистрации. Подробная съемка показала, что в данном районе наблюдается несколько меняющих свою позицию ПВГ. Визуальные исследования при помощи ГОА МИР-1 и МИР-2 выявили на дне наличие каньона, не регистрирующегося при помощи эхолота, со стенок которого берут свое начало основные выходы газа.

Записи, полученные с камер ГОА, позволили выполнить оценку РПР. Характерные скорости всплытия пузырьков газа для данного выхода находятся в диапазоне от 17 до 26 см/с, что соответствует их диаметру от 5 до 15 мм. Акустическая запись, выполненная со льда в апреле 2013 г., показала, что на фоне медленно всплывающих пузырьков газа, регистрируются звукорассеивающие объекты (предположительно отдельные фрагменты газовых гидратов), всплывающие со скоростью от 38 до 42 см/с. В летней экспедиции, того же года, в этом районе на поверхности озера был обнаружен всплывший разрушающийся фрагмент газового гидрата метана. Оценка потока метана ПВГ дает значения в диапазоне от 7 до 14 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Ухан-Тонкий» («UhanTonkiy», UT) зарегистрирован 07.06.2010 г. в 13 км от мыса Тонкий (табл. 1). Пузырьки метана поднимаются с глубины 1023 м и, достигая глубины 506 м, полностью растворяются. С 2010 г. выполнено 6 гидроакустических съемок данного ПВГ, оценка потока метана составляет от 115 до 168 т/г. (табл. 1).

Глубоководный факел «Ворота» («Vorota», Vr) впервые зарегистрирован 30.06.2009 г., южнее пролива Ольхонские Ворота (табл. 1). Пузырьки газа поднимаются с глубины 1290 м, полностью растворяясь на глубине 250 м. Самый высокий факел - 800 м зафиксирован 13.06.2010 г. С 2009 г. ПВГ посещался 19 раз, и каждый раз на эхограммах регистрировалась звукорассеивающая область, образованная выходом газа. Оценка потока данного ПВГ дает значения в диапазоне от 146 до 164 т/г. (табл. 1).

На сегодняшний день зарегистрировано более 120 мелководных выхода газа, 90% которых приурочено к дельте р. Селенга. В юго-западной части это район Посольской Банки, а в северо-восточной - район Кукуйская грива. Расчет потока метана выполнен по методике [Muyakshin et al., 2010] для ПВГ района Посольской Банки и одиночного выхода газа «Селенга – Исток», на котором дополнительно проведены запись акустических шумов.

Район Посольская банка находится юго-западнее Селенгинского мелководья и является компенсационным поднятием, так же, как и Кукуйская грива, располагающаяся северо-восточнее. В данном районе отмечены многочисленные ПВГ, преимущественно групповые. Пузырьки газа достигают поверхности, формируя множество промоин в период ледостава. Потоки газа рассчитаны для ПВГ находящихся на глубинах от 217 до 314 м, т.е. до глубины верхней границы устойчивости газовых гидратов. Величины потоков метана составили от 0,2 до 2,4 т/г. (табл. 1). Это сравнительно малые величины, которые, возможно, компенсируются большим количеством мелководных выходов газа в данном районе (рис. 3).

Район Кукуйская грива находится северо-восточнее авандельты р. Селенга. В этом районе зарегистрировано множество мелководных выходов газа. Например, на участке 500х500 м было зарегистрировано более 10 выходов газа. Характерные глубины ПВГ находятся в диапазоне от 50 до 200 м, при этом большинство выходов берут свое начало до глубин 170 м. Отмечено, что ПВГ приурочены к геологическим структурам: разломы, оползни и т.д. Как правило, все выходы достигают поверхности, образуя в период ледостава промоины во льду.

Мелководный выход газа «Селенга – Исток». Гидроакустическая съемка выполнена в 2012 г. с борта НИС «Г. Титов», южнее Селенгинского мелководья. ПВГ располагается на глубине 40 м в центре воронкообразного кратера глубиной 10 м. Пузырьки газа вырываются из дна на площади чуть более 1 м², достигая поверхности, образуют на ней «кипящий» участок площадью в несколько квадратных метров. Интенсивное течение сносит всплывающие пузырьки газа, поэтому на эхограмме они регистрируются в виде наклонных факелов. В центре кратера, в месте выхода газа отмечено большое скопление фрагментов затопленной древесины. Данный мелководный ПВГ наблюдается в течение каждого посещения, его стабильная работа и доступное географическое положение позволяют проводить разнообразные исследования. В 2013-2014 гг. в ходе экспедиционных работ проведена акустическая съемка и запись акустических шумов, генерируемых пузырьками газа.

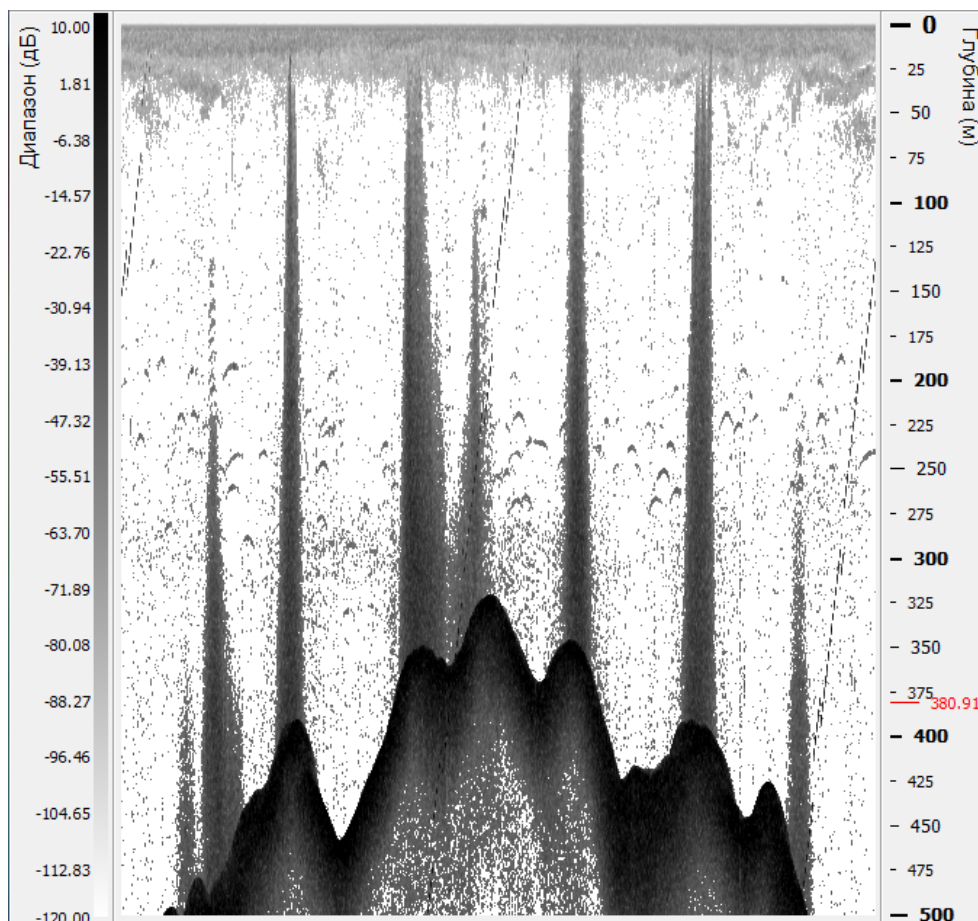


Рис. 3. Эхограмма мелководных ПВГ в районе Посольская Банка, 23.07.2012 г.

Запись акустических шумов генерируемых всплывающими пузырьками газа выполнялась для оценки технической возможности восстановления РПР по пассивным акустическим данным. Проведенный анализ позволил установить, что основной шум пузырьков находится в диапазоне частот от 3,6 до 4,5 кГц. Самая низкая частота зафиксирована в районе 2,5 кГц, самая высокая частота - 5,5 кГц. Учитывая скорость звука в метане под действием гидростатического давления эквивалентного глубине 40 м, мы получим размеры пузырьков от 2,1 до 0,95 см, что соответствует их реальным размерам. Возможно, данный подход позволит, имея только запись характерного звука истечения пузырьков газа вычислить размеры и количество пузырьков, а, следовательно, и поток газа.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ПОТОКОВ МЕТАНА И КАРТИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ ВЫХОДОВ ГАЗА

В главе приводятся полученные по данным измерений оценки потоков метана, скорости подъема пузырьков, дано описание динамики извержения газа, а также проанализированы зависимости высоты действующих ПВГ от величины потока метана, описаны зарегистрированные случаи начала извержения ПВГ и результаты картирования ПВГ. Всего в расчет пузырькового потока метана включена 51 акустическая запись разноглубинных выходов газа: 2 мелководных и 10 глубоководных (табл. 1).

Анализ зависимости высоты факела от потока метана выполнен индивидуально для каждого факела с учетом вариаций величин потока. Начальный этап работы заключался в расчете положения верхушки факела по глубине. Для точного определения глубины была введена пороговая величина объемного сечения рассеяния (-80 дБ от 1/м). На основе полученных данных построена зависимость высоты факела от пузырькового потока метана в полулогарифмическом масштабе.

Анализ данных показывает, что основная группа глубоководных ПВГ, подразделяется на две подгруппы - верхние (глубина от 380 до 1000 м) и нижние (глубина более 1000 м) факела. Ранее все они разбивались на две основные группы: мелководные (до 380 м) и глубоководные (более 380 м).

Для каждой группы факелов были рассчитаны связи между высотой факела и потоком газа, уравнение которых может быть представлено в виде:

$$H = H_0 + K * \log (Flux) \quad [4],$$

где, H_0 – некая нулевая глубина для определенной подгруппы факелов, K – коэффициент регрессии, $Flux$ – поток газа (т/год). Коэффициенты аппроксимации приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты логарифмической регрессии			
ПВГ	H_0	K	SD
Глубоководные (нижние)	380	202	113
Глубоководные (верхние)	110	158	62
Мелководные	198	60	41

Высота факелов изменяется от 100-300 м (при потоках 1-30 т/г.) до 500-900 м (при потоках 30-110 т/г.). Однако факела с глубин 900-1300 м даже при потоках 30-100 т/г., по нашим данным, не поднимаются выше глубины устойчивости ГГ (380 м). В тоже время, при сравнимых потоках, факела с глубин 400-600 м почти достигают поверхности. При уменьшении потока (< 30 т/г.) высота факелов, возникших на глубинах 400-600 м, быстро снижается с уменьшением потока.

Глубоководные факела в редких посещениях достигают поверхности, при этом имеют высоту 500-900 м. При сравнимых потоках газа, мелководные и глубоководные-верхние ПВГ могут не достигать поверхности, в следствие того, что пузырек газа поднимающийся с большей глубины, долгое время находится в зоне устойчивости ГГ, и растворению метана препятствует образованная на поверхности пузырька газогидратная корочка [McGinnis, 2006]. Пузырьки из мелководных или расположенных в непосредственной близости к верхней границе зоны стабильности ГГ ПВГ редко достигают поверхности. Вероятно, это связано с отсутствием на их поверхности газогидратной корочки, что способствует интенсивному поступлению метана в воду и полному его растворению. Проведен сравнительный анализ двух разноглубинных площадок, на которых

происходит разгрузка метана в виде пузырьков газа: ПВГ «Санкт-Петербург» и «Ступа». При сравнимых потоках (10-100 т/г.) факел «Санкт-Петербург» может достигать размеров 500-960 м, а факел «Ступа» не превышает 520 м и лишь изредка достигает поверхности.

Детальная оценка потоков метана выполнена для ПГВ «Маленький» и «Санкт-Петербург», благодаря регистрации начала их разгрузки «извержения». Впервые в 2012 г. зарегистрировано три случая «извержений», все они отмечены для ПВГ, которые в течение периода наблюдений характеризовались нерегулярной активностью. Два таких события наблюдалось в районе ПГВ «Маленький» 18 июля и 6 сентября 2012 г. На эхограмме первого извержения (рис. 4) можно видеть, что в 1:22 с глубины 1295 м начала подниматься первая порция пузырей газа (облако), средняя скорость его подъема составила 16 см/с. В течение часа оно достигло глубины 480 м, после чего рост факела прекратился, а его максимальная высота составила 815 м. Следом за первой порцией газа с интервалами от 2 до 7 мин извергались менее обильные порции газа. Объемный поток в первой порции газа составил $2,04 \cdot 10^{-4}$ м³/с, что в 40 раз больше, чем поток газа в квазистационарном «режиме работы» факела. Поток метана в момент первого пересечения факела при его высоте около 180 м составил около 670 т/г. Это максимальная оценка, т.к. не учитывается возможное уменьшение массы метана в пузырьках за счет его диффузии в воду. Определяя разность высот верхней и нижней границ пика рассеяния, например, по уровню -10 дБ относительно максимума рассеяния, можно оценить высоту Z выброса на глубине h , а по ней – рассчитать его объем по формуле:

$$V = \text{Volume flux}(h) * Z(h)/U \quad [5],$$

где U – средняя скорость подъема выброса, принятая равной 0,16 м/с. Оцененный таким способом объем выброса составил 0,03 м³, масса метана в нем – 3 кг.

Во время второго извержения, в отличие от предыдущего, до первого выброса газа на эхограмме регистрировалось слабое отражение от фоновой струи газа на глубине от 700 до 1000 м. Средняя скорость всплытия первой порции газа составила 17,5 см/с. Факел достиг глубины 450 м за 1 час 10 минут. Последующие порции газа, менее обильные, извергались с интервалами от 3 до 8 минут. Поток в первой порции газа оценен в $1,34 \cdot 10^{-1}$ м³/с, это значение меньше чем при первом извержении, но превышает поток газа в стационарном режиме. Массовый поток метана в момент первого пересечения выброса составил около 500 т/г. (1 моль/с). Объем выброса составил 0,013 м³, масса метана в нем – 1,4 кг.

В обоих «извержениях» было замечено, что вертикальный размер первого облака пузырьков по мере подъема увеличивается. Это может быть объяснено наличием в нем пузырьков разных размеров. Оценивая средние скорости подъема верхней и нижней границ облака (без учета вертикальных скоростей воды), для первого случая получили 16,4 и 14,3 см/с, для второго – 18 и 16,8 см/с, соответственно. Считая, что пузырьки покрыты корочкой ГГ,

т.е. являются «грязными», в силу чего обратная функция $r=r(U_{rise})$ однозначна [McGinnis, 2006], по скоростям всплытия пузырьков можно оценить их радиусы. Для первого случая получим 1,1 и 0,85 мм, для второго – 1,6 и 1,2 мм. Детальный анализ эхограмм показывает, что скорость подъема верхней границы выброса убывает при его всплытии.

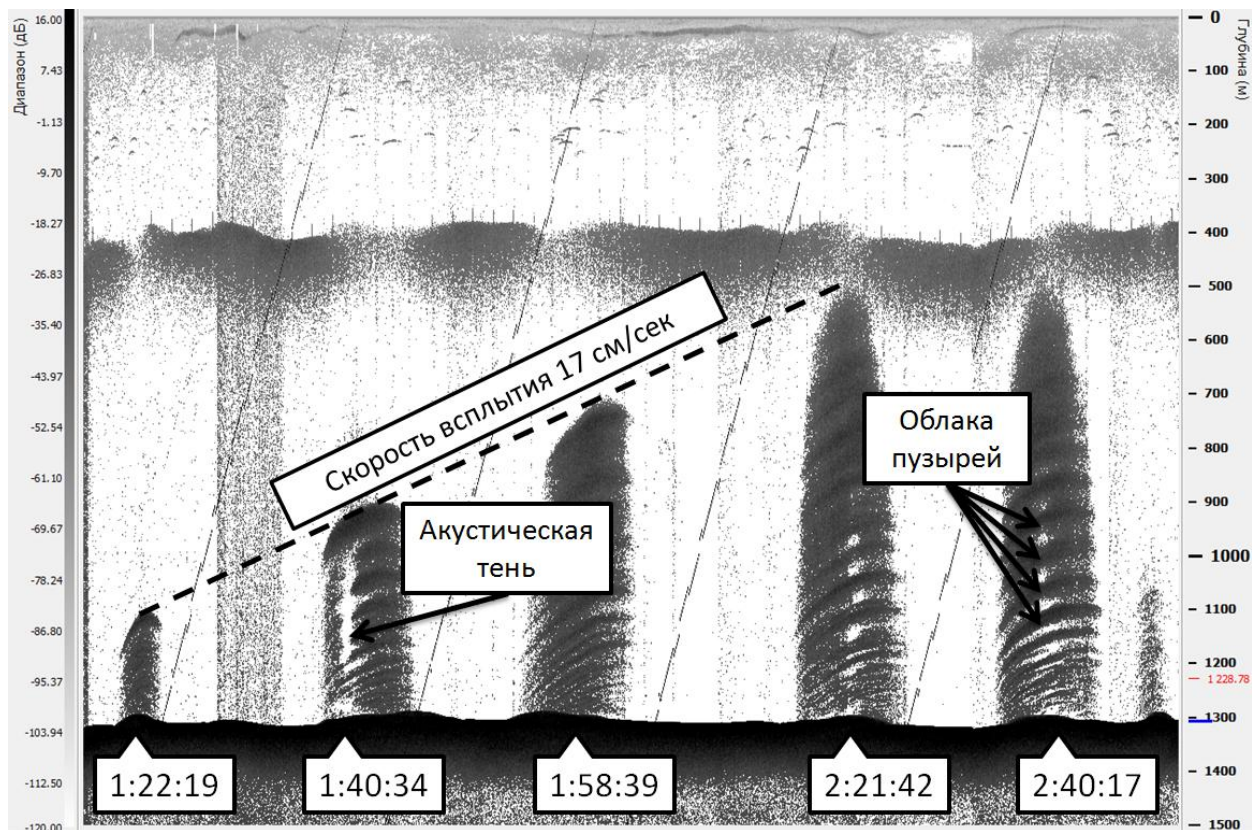


Рис. 4. Извержение ПГВ в районе грязевого вулкана «Маленький» 18.07.2012 г.

Максимальное значение скорости в начале подъема больше приведенной выше средней скорости и достигает 22 см/с, что соответствует радиусу пузырьков 5 мм. В конце подъема скорость снижается до 14 см/с (радиус пузырьков 0,8 мм). Из данных следует, что средний размер пузырьков при всплытии уменьшается за счет поступления метана из пузырька в воду, которая лишь частично компенсируется притоком азота и кислорода. Этот эффект предсказывают различные модификации моделей динамики одиночного пузырька [Goncharov, Klement'eva, 1995; McGinnis, 2006], а также экспериментальные данные [Greinert, 2004].

Третий случай извержения зарегистрирован 19.07.2012 г. в районе ПГВ «Санкт-Петербург». За 1 час 19 минут факел достиг высоты 905 м (рис. 5). Средняя скорость всплытия первой порции пузырьков составила 18,8 см/с. (минимальная и максимальная скорость 18,2 и 19 см/с, соответственно). За первой порцией газа начали извергаться следующие порции с интервалами от 7 до 11 мин. Поток в первой порции газа составляет $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, что почти на порядок больше, чем поток газа в стационарном режиме. Массовый поток

метана составил около 500 т/г. (1 моль/с), объем первого выброса 0,016 м³, масса метана в нем – 1,6 кг.

При подъеме, облако пузырьков «расплывается» по высоте. Как и для выброса в районе ПГВ «Маленький», это может быть объяснено различием скоростей всплытия пузырьков, которые первоначально образовали это облако, а значит и разницей в их размерах. Эхолот не в состоянии разрешить отдельные пузырьки, но позволяет оценить скорость подъема верхней и нижней границ облака, а также максимум (пик) рассеяния. Верхняя и нижняя граница определялись по уровню -10 дБ относительно пика рассеяния. В среднем, все скорости подъема верхней и нижней границы убывают с уменьшением глубины. Это означает, что средний размер пузырьков уменьшается.

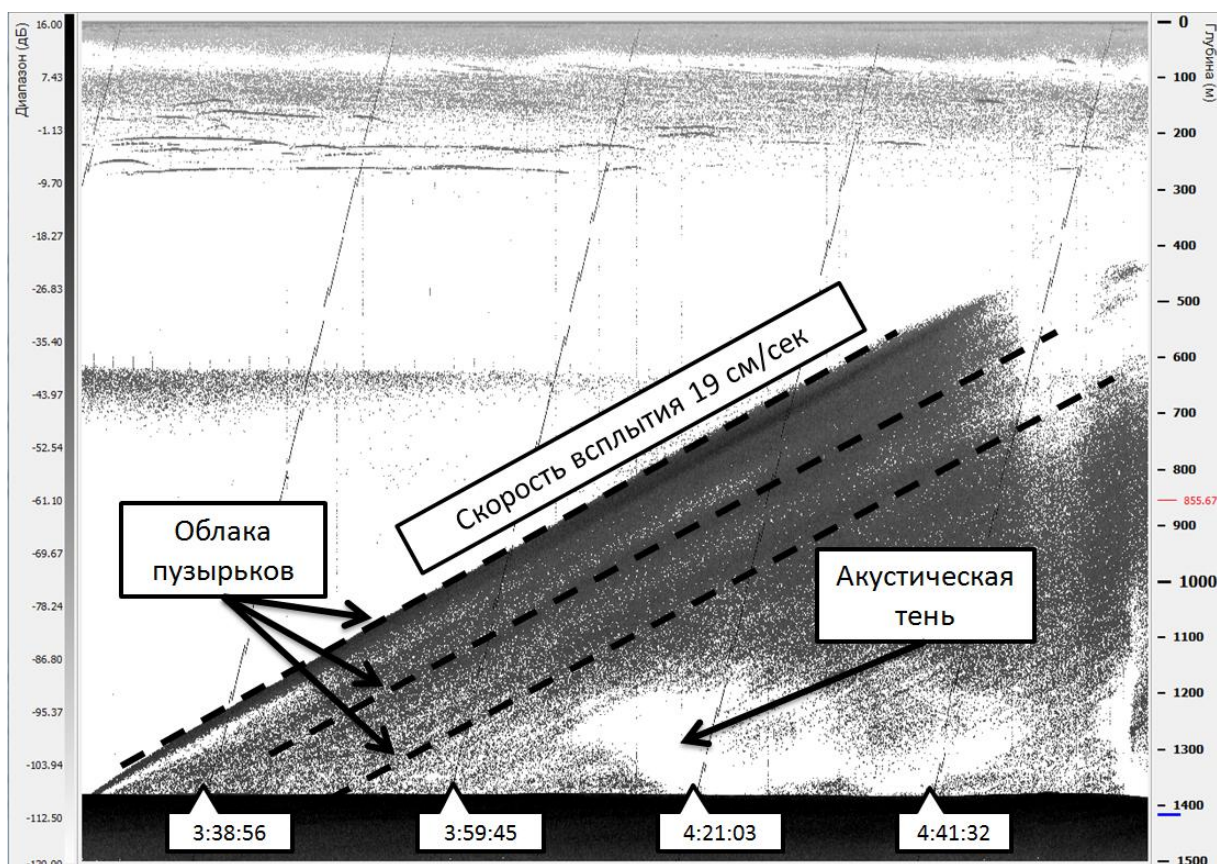


Рис. 5. Извержение ПГВ в районе грязевого вулкана «Санкт-Петербург» 19.07.2012 г.

Средняя скорость всплытия пика убывает от 0,22 м/с до 0,15 м/с, что соответствует уменьшению среднего радиуса пузырька от 5 мм до 1 мм. В этих же пределах лежат и экстремальные значения скоростей подъема верхней и нижней границ выброса, которые достигаются на начальном участке всплытия. Таким образом, изначально наблюдаемый акустически выброс образован пузырьками с радиусами от 1 до 5 мм.

Информация о географическом положении ПГВ с их привязкой к геологическим структурам на дне озера Байкал послужила основой для создания карты ПГВ озера Байкал (рис. 6).

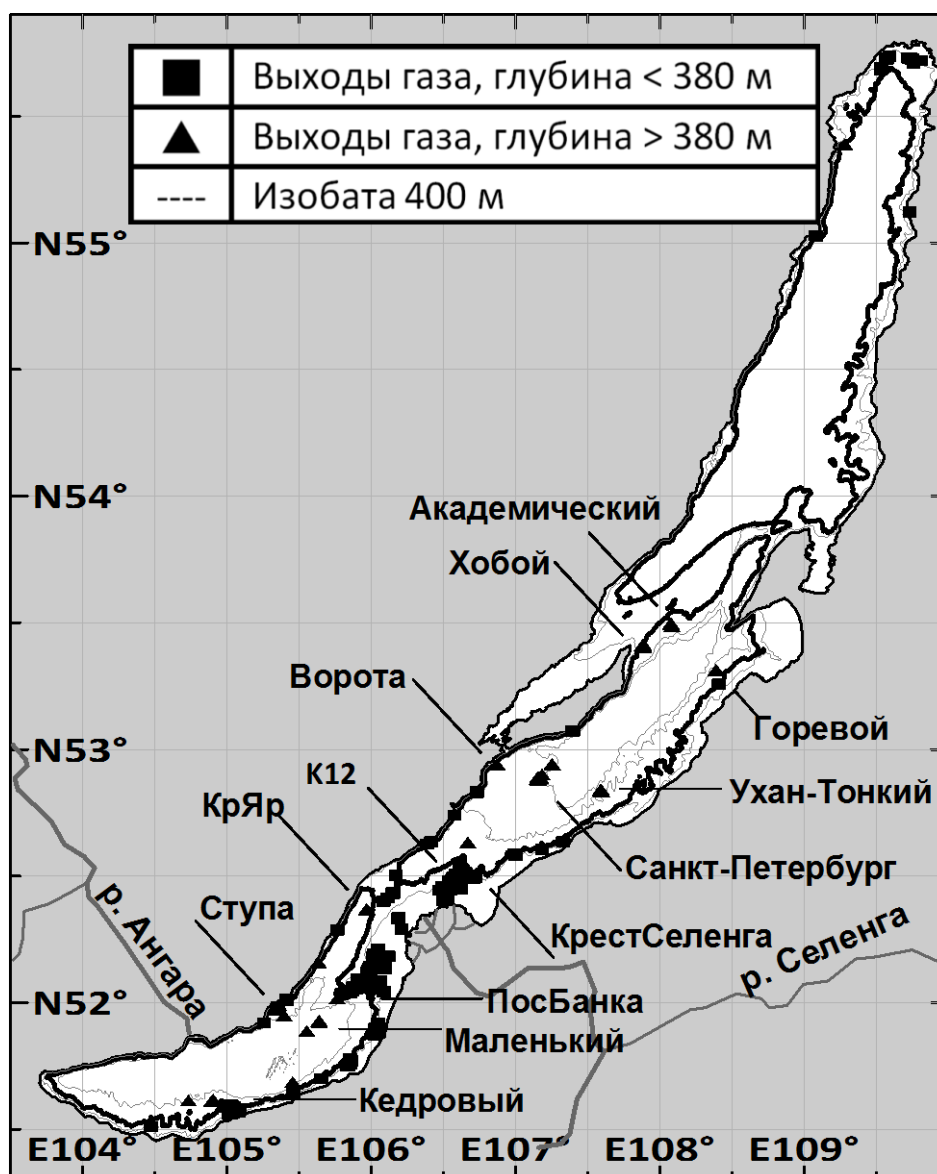


Рис. 6. Карта пузырьковых выходов газа озера Байкал

К настоящему времени котловины озера обследованы на наличие ПВГ неравномерно, 42, 28 и 19% для южной, центральной и северной котловин соответственно, что позволяет предположить существование новых ПВГ, в том числе и глубоководных. Выходы газа зарегистрированы во всех без исключения котловинах озера. Глубоководные ПВГ распределены по 10 в южной и центральной котловинах, и один в северной. К подводному грязевому вулкану приурочен глубоководный ПВГ «Маленький», к геологическим структурам - «Санкт-Петербург» и «Ворота». Большинство мелководных выходов газа (90%), расположено по границам авандельты р. Селенга. С юго-западной стороны это район Посольской Банки, а с северо-восточной - район Кукуйской гривы. Остальные мелководные выходы располагаются вдоль западного побережья, а также в северной оконечности озера Байкал. Все ПВГ равномерно распределены по глубинам озера. Самый глубокий выход газа «Санкт-Петербург» находится на глубине 1400 м, самый мелководный ПВГ располагается на глубине чуть более метра (пос. Большие Коты).

В заключении приводятся основные результаты и выводы исследования:

1. Впервые проанализированы многолетние данные (2005-2016 гг.) акустических съемок акватории оз. Байкал. Выявлено 22 глубоководных и 120 мелководных пузырьковых выходов газа. ПВГ обнаружены во всех котловинах озера Байкал. Установлено преобладание ПВГ в Южной и Центральной котловинах озера. Ежегодный мониторинг действующих и поиск новых ПВГ позволяет констатировать факт, что в настоящее время происходит активизация как глубоководных, так и мелководных выходов газа, что свидетельствует о повышении газовой активности озера. На основе обработанных данных построена географическая карта зарегистрированных ПВГ. Впервые для оз. Байкал все обнаруженные выходы газа, классифицированы: определены их глубины, высоты и режим работы. Для систематизации и хранения акустических и расчетных данных, была создана и зарегистрирована электронная БД «БайкалМетан».

2. Впервые для ПВГ озера Байкал был использован дистанционный акустический метод расчета пузырькового потока метана. Оценки выполнены для разноглубинных факелов Южной и Центральной котловин озера. Полученные результаты верифицированы, величина потока метана за счет ПВГ сравнена с величиной потока метана за счет уплотнения верхнего слоя осадков. Для мелководных ПВГ оценка пузырькового потока метана определена в диапазонах 0,2-60,1 т/г., для промежуточных - 5,1-156,5 т/г., и, для глубоководных - 15,0-438,5 т/г. Впервые установлена зависимость между величиной потока пузырькового метана и высотой регистрируемого факела при фиксированном значении дифференциального сечения рассеяния. Для каждой группы ПВГ (мелководные, глубоководные, промежуточные) рассчитаны коэффициенты полулогарифмической аппроксимации. Данная зависимость позволяет проводить экспрессную оценку пузырькового потока метана по данным о высоте факела.

3. Многолетний мониторинг ПВГ позволил зарегистрировать три уникальных случая «извержения» (начало работы) двух различных ПВГ, которые характеризуются нерегулярной активностью: ПВГ «Маленький» и «Санкт-Петербург». Скорость подъема первой порции облаков пузырей составила от 16 см/с до 19 см/с, временные интервалы их порционного извержения от 2 до 7 мин, массовый поток в первой порции газа составил 671 т/г., что в 40 раз больше, чем поток газа в стационарном «режиме работы».

4. Для уточнения гидроакустической методики, была выполнена оценка функции РПР для ПВГ «Ступа» и «Селенга - Исток» по видеоданным, полученным в ходе экспедиции МИРЫ на Байкале, и данным полученным в экспедициях в период с 2014 по 2015 гг. Анализ распределения пузырьков по размерам показал, что его форма подобна распределению на ПВГ Håkon Mosby. Отмечено характерное резкое нарастание численности пузырьков с ростом диаметра до некоторого граничного значения, и дальнейшее плавное убывание численности до нуля.

5. Создан программно-аппаратный гидроакустический комплекс «Эхо-Байкал» на базе судового эхолота Fuguro FCV-1100 (Япония) рыбопоискового класса. Создано и апробировано программное обеспечение, позволяющее получать акустические данные, визуализировать их в виде эхограмм и сохранять исходные бинарные данные акустической съемки на ПК для дальнейшей обработки. ПАК «Эхо-Байкал» позволяет проводить акустические съемки подводных выходов газа на озере Байкал включая максимальные глубины.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах:

1. Granin N.G., **Makarov M.M.**, Kucher K.M., Gnatovsky R. Yu. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing // *Geo-Marine Letters*, 2010. – V. 30(3-4). – P. 399-409.

2. Granin N.G., Muyakshin S.I., **Makarov M.M.**, Kucher K.M., Aslamov I.A., Granina L.Z., Mizandroutsev I.B. Estimation of Methane fluxes from bottom sediments of Lake Baikal // *Geo-Marine Letters*, 2012. – V. 32(5). – P. 427-436.

3 **Макаров М.М.**, Гранин Н.Г. Пузырьковые выходы газа из донных отложений // Экологический атлас бассейна оз. Байкал [Электронный ресурс]; 2014. - <http://bic.iwlearn.org/ru/atlas/atlas>. - карта 138.

4. Деникина Н.Н., Дзюба Е.В., Белькова Н.Л., Ханаев И.В., Феранчук С.И., **Макаров М.М.**, Гранин Н.Г., Беликов С.И. Первый случай заболевания губки *Lubomirskia baicalensis*: исследование микробиома // *Известия РАН. Серия биологическая*, 2016. – №3. – С. 315-322.

Материалы конференций:

1. Granin N.G., Gnatovsky R.Yu., **Makarov M.M.**, Yakup M.A. Gas seeps in Lake Baikal // *International Conference on Gas Hydrate Studies*. Irkutsk: Sochava Institute of Geography SB RAS, 2007. – P. 27.

2. Granin N.G., **Makarov M.M.**, Gnatovsky R., Yu. Kucher K.M. The deep water gas seeps in Lake Baikal // *9-th International Conference on GAS in Marine Sediments*. Bremen, 2008. – P. 76-77.

3. Granin N.G., Kucher K.M., **Makarov M.M.** Gas seepage and mud volcanoes in Lake Baikal, traces of eruptions // *10th International Conference on Gas in Marine Sediments*. Listvyanka, 2010. – P. 33.

4. Granin N.G., Kucher K.M., **Makarov M.M.**, Chernyaev E. Temporal variability of gas seeps from bottom sediments in Lake Baikal // *10th International Conference on Gas in Marine Sediments*. Listvyanka, 2010. – P. 107.

5. Гранин Н.Г., **Макаров М.М.**, Кучер К.М., Гнатовский Р.Ю. Выходы газов на Байкале // XVIII Международная школа морской геологии «Геология морей и океанов». М., 2009. – С. 37-42.

6. Асламов И.А., Краснояров А.Е., **Макаров М.М.**, Ченский А.Г. Автоматический информационно-измерительный комплекс для долговременного мониторинга экосистемы озера Байкал // VIII

Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиосвязи». Иркутск, 2009. – С. 148-152.

7. Гранин Н.Г., Верещагин О.Ф., Козлов В.В., Обжиров А.И., **Макаров М.М.**, Гнатовский Р.Ю., Иванов В.Г., Блинов В.В., Мизандронцев И.Б. Изменение концентрации метана в озере Байкал: возможная причина // Российская конференция «Газовые гидраты в экосистеме Земли». Новосибирск, 2014. – С. 25.

8. Муякшин С.И., **Макаров М.М.**, Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г., Кучер К.М. Оценка пузырькового потока метана на озере Байкал акустическим методом // Российская конференция «Газовые гидраты в экосистеме Земли». Новосибирск, 2014. – С. 41.

9. **Макаров М.М.**, Муякшин С.И., Кучер К.М., Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г. Извержения и нестационарность пузырьковых выходов газа на озере Байкал // Российская конференция «Газовые гидраты в экосистеме Земли». Новосибирск, 2014. – С. 38.

10. **Макаров М.М.**, Кучер К.М., Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г. Извержения и нестационарность пузырьковых выходов газа на озере Байкал // Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 25-летию обнаружения струйных метановых газовыделений в Черном море «Метан в морских экосистемах». Севастополь, 2014. – С. 81.

11. Муякшин С.И., **Макаров М.М.**, Гнатовский Р.Ю., Гранин Н.Г., Кучер К.М. Акустическая регистрация пузырьковых выходов метана на озере Байкал // XVIII научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2014. – С. 228.

Патент:

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2015621626/ Пузырьковые выходы газа озера Байкал (БД «Байкал-Метан») / Макаров М.М., Петров И.А./ Правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук/ поступление 16.07.2015, регистрация 03.11.2015 г.

МАКАРОВ Михаил Михайлович
ПУЗЫРЬКОВЫЕ ВЫХОДЫ МЕТАНА
ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата географических наук

Подписано к печати 29.09.2016 г.

Формат 60*84/16. Объем 1,4 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 741.
Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.