ЗОНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ РАЗГРУЗКИ МЕТАНА В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Саломатин А.С.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН E-mail: salomatin@poi.dvo.ru

Аннотация

На основе данных гидроакустических исследований шести морских экспедиций построены карты-схемы положения зон пузырьковой разгрузки метана в Татарском проливе Японского моря у о. Сахалин. Выявлены характерные особенности распределения зон пузырьковой разгрузки метана по глубине, их связи с особенностями морского дна. Оценены размеры этих зон на морском дне.

Ключевые слова: пузырьки, газовые «факелы», метан, Японское море, Татарский пролив.

THE BUBBLE SEEPAGE AREAS IN THE TATAR STRAIT OF THE JAPAN SEA

Salomatin A.S.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences E-mail: salomatin@poi.dvo.ru

Abstract

The maps of bubble seepage areas in the Tatar Strait of the Japan Sea based on the data of hydroacoustic studies six marine expeditions were constructed. Characteristic features of distribution of bubble seepage areas on depth and their connection with features of the seabed were revealed. The sizes of these seepage areas on the seabed were estimated.

Keywords: bubble, gas flare, gas plume, methane, Japan Sea, Tatar Strait.

Введение

В настоящее время на морском дне повсеместно зарегистрированы зоны разгрузки метана в виде всплывающих пузырьков, образующих в водной толще устойчивые области их повышенной концентрации – газовые «факелы» (ГФ). Всплывающие пузырьки являются эффективным механизмом переноса метана из литосферы в водную толщу и атмосферу. ГФ являются легко регистрируемым поисковым признаком зон пузырьковой разгрузки метана (ЗПРМ). Для обнаружения ГФ и, следовательно, ЗПРМ чрезвычайно эффективными являются дистанционные акустические методы, основанные на обратном рассеянии звука. На эхолотных записях ГФ наблюдаются в виде гидроакустических аномалий различных размеров и конфигураций. С каждым годом во время морских экспедиций с помощью судовых эхолотов обнаруживаются все новые ЗПРМ. Их поиск и исследование является важной научной задачей.

Основные результаты

В основу работы легли данные, полученные в шести морских экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Татарском проливе Японского моря. Гидроакустические наблюдения проводились с помощью комплекса, состоящего из модернизированных судовых эхолотов «Сарган-ЭМ», ELAC LAZ-72, двух гидролокаторов «Сарган-ГМ» и многоканальной системы цифровой регистрации гидролокационных сигналов. Гидроакустический комплекс обеспечивал одновременную регистрацию эхосигналов по четырем независимым каналам на частотах 12, 20 и 135 кГц. Одновременно с акустическими данными записывались координаты судна, полученные с помощью системы глобального позиционирования (GPS). Комплекс позволяет проводить поиск ЗПРМ, исследование их акустических проявлений в водной толще и на морском дне, а также поиск особенностей рельефа дна и рассеяния в верхней осадочной толще (10-50 м). В вышеупомянутых экспедициях в Татарском проливе было выполнено 342 регистрации ГФ в интервале глубин от 65 до 755 м. Несколько десятков ГФ регистрировались по несколько раз, в том числе в разные годы. Повторными регистрациями ГФ на глубинах менее 500 м считались регистрации ГФ, координаты которых отличались более чем на $\Delta = 30$ м. Для больших глубин этот параметр ∆ увеличивался пропорционально глубине. Координаты повторных регистраций ГФ усреднялись. Таким образом, было найдено положение 257 ЗПРМ с существенно различающимися координатами. На рис. 1 представлена полученная карта-схема ЗПРМ.

Все обнаруженные ГФ расположены у о. Сахалин. Со стороны Приморского и Хабаровского краев ни одного ГФ обнаружено не было. Большинство ГФ (253 ед.) обнаружены в узком, менее одного градуса интервале широт 48°20' – 47°25' с.ш., напротив залива Делангля. Остальные ГФ (4 ед.) расположены у южной оконечности о. Сахалин. Подавляющее большинство ГФ, а именно 80%, обнаружены в узкой простирающейся с севера на юг области, шириной около 3 км и длиной 90 км. Глубины ГФ в этой области лежат в интервале 150–337 м.

С целью выявления закономерностей пространственного распределения ГФ был построен график зависимости числа обнаруженных



Рис. 1. Карта-схема положения ЗПРМ в Татарском проливе Японского моря. Кружками отмечено положение ГФ, оранжевыми – на глубинах более 600 м, зелеными – на глубинах менее 100 м, голубыми – в диапазоне глубин 100– 150 м, синими – в диапазоне глубин 150–300 м, красными – в диапазоне глубин 300–337 м и оранжевыми – на глубинах более 600 м

ГФ от глубины (рис. 2). На полученном графике выделяются три локальных максимума. Первый находится на глубине 125 м (интервал глубин 100–150 м). Этот интервал глубин соответствует бровке шельфа и шельфу, прилегающему к ней. Второй локальный максимум находится на глубине 325 м (интервал глубин 300–350 м). Этот интервал глубин соответствует глубине, при которой нижняя граница зоны стабильности газогидрата метана в осадках выходит к поверхности дна. В этом интервале глубин на девяти станциях (на глубинах 322–330 м) удалось отобрать образцы газогидрата метана. Третий локальный максимум находится на глубине 675 м (интервал глубин 600–750 м). На двух станциях в области 600-метрового ГФ также удалось отобрать образцы газогидрата метана.

Из 89 ГФ обнаруженных в интервале глубин 300–337 м 85 ГФ расположены в трех областях, обозначенных на рис. 1 цифрами 1, 2 и 3. В первой области найдено 64 ГФ, причем 20 из них являлись областями с несколькими близко расположенными ГФ. Во второй области найдено 15 ГФ и в третьей – 6 ГФ. На рис. За приведена подробная карта-схема ГФ первой области, совмещенная с батиметрической картой, построенной по данным эхолотного промера в морских



Рис. 2. График зависимости от глубины количества ГФ, обнаруженных в 50-метровых интервалах глубин

158



Рис. 3. Карта-схема ГФ в первой области (а) и хема движения судна во время подробной съемки первой области (б). Кружками отмечено положение ГФ, желтыми треугольниками отмечены станции, на которых были отобраны образцы газогидрата метана, тонкая черная линия – путь движения судна, толстая красная линия – движение судна в ГФ

экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Из рис. За следует, что большинство ГФ с глубинами 300 и более метров сосредоточены в небольшой, вытянутой вдоль линий изобат области длиной около трех километров и шириной около одного километра. В южной половине этой области ГФ образуют кольцевую структуру, в центре которой отсутствуют ГФ. На северной и южной границах этой структуры были отобраны образцы газогидрата метана. Еще четыре ГФ расположены на восточном склоне протянувшейся с севера на юг ложбины.

Как уже упоминалось ранее, в первой области было зарегистрировано большое количество протяженных областей ГФ. С целью уточнения размеров этих областей ГФ была выполнена специальная гидроакустическая съемка, результаты которой представлены на рис. Зб. Из рисунка следует, что если исключить галсы, лежащие вне первой области, то длина пути, пройденного судном во время подробной съемки в первой области, равна 15,6 км, а длина пути, пройденного судном над ГФ, равна 5,5 км. Это позволяет предположить, что около 35% площади первой области занято ГФ. Причем, как видно из рис. Зб, многие из них сливаются в протяженный ГФ, занимающий большую площадь. Возможные границы двух самых больших протяженных ГФ в первой области обозначены на рис. Зб красными пунктирными линиями. Размеры первого протяженного ГФ, образованного ГФ 17 и 19, 550 м с севера на юг и 650 м с востока на запад, а площадь ~ 0,35 км². Размеры второго протяженного ГФ, образованного ГФ 1, 2, 3, 4 и 7, 570 м с севера на юг и 740 м с востока на запад, а площадь ~ 0Ю4 км².

На рис. 4а приведена карта-схема ГФ второй области, совмещенная с батиметрической картой, построенной по данным эхолотного промера на НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

На этой карте видно, что все ГФ с глубинами 300–337 м во второй области расположены на узком участке дна, длиной около двух километров и шириной менее пятисот метров. Причем этот участок



Рис. 4. Карта-схема ГФ второй области (а), и пример эхограммы ГФ во второй области (б). Красными кружками отмечено положение ГФ с глубинами 300–337 м, синими – положение ГФ с глубинами 210–300 м, желтыми треугольниками отмечены станции, на которых были отобраны образцы газогидрата метана

полностью лежит в хорошо видной на рис. 4а ложбине. На рис. 4б представлена эхограмма, полученная во время съемки второй области, при движении судна перпендикулярно к оси ложбины. На эхограмме хорошо видны протяженная область ГФ F43 шириной около ста метров на левом склоне ложбины и слабый одиночный ГФ на правом склоне ложбины. Глубина ложбины около 12 м, а ширина около 350 м. На двух станциях в различные годы в области ГФ F43 были отобраны образцы газогидрата метана.

На рис. 5 приведена подробная карта-схема ГФ в третьей области, совмещенная с батиметрической картой, построенной по данным эхолотного промера в морских экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». На карте-схеме видно, что в третьей области все ГФ с глубинами более 300 м расположены на склонах каньона, причем на северном склоне обнаружен один ГФ, а остальные пять ГФ на узком участке вдоль южного склона длиной около одного километра.

Из шести ГФ, обнаруженных в интервале глубин 600–750 м, два ГФ выходят из двух покмарков (от англ. pockmark), представляющих



Рис. 5. Карта-схема ГФ в третьей области. Красными кружками отмечено положение ГФ с глубинами более 300 м, синими кружками отмечено положение ГФ с глубинами менее 300 м

собой конусовидные депрессии на поверхности морского дна, первый на глубине 620 м и второй на глубине 750 м (см. рис. 6).

Три других слабых ГФ находятся на расстоянии около одного километра от второго покмарка. Шестой, самый северный, ГФ был зарегистрирован только один раз, причем при его регистрации судно прошло в стороне от него, поэтому нельзя определить, выходит этот ГФ из покмарка или нет. Из рис. 6 следует, что первый покмарк имеет поперечные размеры около 500 м и глубину около 30 м, а второй покмарк имеет поперечные размеры около 550 м и глубину около 15 м. Из рис. 6 также видно, что в случае первого покмарка ГФ расположен на возвышенности на краю покмарка, а в случае второго покмарка, на его склоне. ГФ у первого покмарка регистрировался 20 раз в трех экспедициях в 2014, 2015 и 2019 годах. В этот период его интенсивность сильно изменялась вплоть до полного исчезновения. На двух станциях в области 620-метрового ГФ удалось отобрать образцы газогидрата метана. На рис. 7 представлен пример эхограммы ГФ на станции в области первого покмарка. На этой станции судно удерживалось над точкой выхода ГФ из дна. За отрезок времени с 23:25 до 23:42 судно сместилось всего на 35 м, что много меньше разрешения



Рис. 6. Эхограмма глубоководных ГФ, выходящих из покмарков – а, картасхема ГФ в области первого покмарка – б. Красными кружками отмечено положение ГФ при различных его регистрациях, желтыми треугольниками отмечены станции, на которых были отобраны образцы газогидрата метана



Рис. 7. Пример эхограммы ГФ на станции в области первого покмарка

эхолота по горизонтали, равного на этой глубине 130 м. На эхограмме хорошо виден процесс исчезновения ГФ. Сначала ГФ принимает ярко выраженный пульсирующий характер. На эхограмме хорошо видны две наклонные области, образованные всплывающими пузырьками, выходящими из дна в пятиминутные интервалы времени, первый интервал с 23:25:08 до 23:30:21 и второй с 23:36:49 до 23:41:21. Угол наклона этих областей определяется скоростью всплытия пузырьков, которая в данном случае равна 18 см/с. Далее следует серия коротких все более слабеющих выбросов пузырьков.

В интервале глубин 150–300 м было обнаружено 107 ГФ. Все ГФ в этом интервале глубин обнаружены в узкой простирающейся с севера на юг, вытянутой вдоль линий изобат полосе, шириной около 3 км и длиной 90 км (рис. 1, синие кружки). Более половины из них расположены на склонах многочисленных протянувшихся с севера на юг ложбин. Эти ложбины хорошо видны на подробных батиметрических картах, например, на рис. 3а и 4а. Средняя глубина ложбин примерно равна 15 м, а ширина – 300 ÷ 400 м. Типичная эхограмма

ГФ, полученная при пересечении нескольких ложбин, представлена на рис. 8.

Во всем исследуемом районе $\Gamma \Phi$, расположенные на западном склоне ложбин, сильнее и встречаются чаще, чем на восточном склоне (см. рис. 8.). Большое количество $\Gamma \Phi$ на глубинах около 150 м сосредоточено по обеим сторонам каньона (см. рисунки 5 и 9). Здесь было обнаружено десять протяженных областей $\Gamma \Phi$ с поперечными размерами в несколько сотен метров. Например, $\Gamma \Phi$ SF44 на рис. 9 имеет поперечный размер около 300 м.

Диапазон глубин менее 150 м в упомянутых выше экспедициях изучен существенно меньше, особенно мало изучен шельф с глубинами менее ста метров. Всего на глубинах менее 150 м было обнаружено 55 ГФ, причем половина из них представляет собой протяженные области ГФ. Большинство ГФ (45 ед.) было обнаружено в интервале глубин 100–150 м в узкой полосе вдоль бровки шельфа (рис. 1, голубые кружки), и только 14 ГФ было обнаружено на шельфе в интервале



Рис. 8. Эхограмма ГФ, полученная при пересечении нескольких ложбин

Скорость судна - 6.5 узл, курс - 140°



Рис. 9. Эхограмма ГФ, полученная при пересечении каньона



Рис. 10. Эхограммы двух протяженных областей мелководных ГФ

глубин 65–100 м (рис. 1, зеленые кружки). Примеры регистраций на шельфе двух мелководных протяженных ЗПРМ на ходу судна показаны на рис. 10. Как видно из рис. 10, пузырьки, выходящие из морского дна, достигают поверхности моря и, следовательно, переносят метан, выходящий из морского дна в виде пузырьков, непосредственно в атмосферу.

Такие области могут являться значимым источником поступления метана в атмосферу. Расчет с помощью программы SiBu-GUI [1] показывает, что на этих глубинах всплывающие пузырьки переносят непосредственно в атмосферу до 10% выходящего из морского дна в виде пузырьков метана. Сравнение результатов расчета с помощью программы SiBu-GUI с данными, полученными на стенде для исследования газообмена между всплывающими пузырьками метана и водной средой [2], показало их хорошее соответствие для малых глубин.

Заключение

На основе 342 регистраций газовых «факелов», полученных в 6-ти морских экспедициях в Татарском проливе, найдено положение 257 ЗПРМ с глубинами в интервале от 65 до 755 м. Выявлены характерные особенности распределения ЗПРМ по глубине. Построена карта-схема положения ЗПРМ в Татарском проливе у побережья о. Сахалин. Для отдельных характерных участков дна построены карты-схемы ЗПРМ, совмещенные с батиметрическими картами, построенными по данным эхолотного промера в этих экспедициях. На их основе выявлены связи ЗПРМ с такими особенностями морского дна, как бровка шельфа, ложбины, каньоны и покмарки. Оценены размеры протяженных ЗПРМ, достигающих 0,4 км². На шельфе о. Сахалин обнаружены протяженные мелководные ЗПРМ, которые могут являться значимым источником поступления метана в атмосферу.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № АААА-А20-120021990003-3.

Литература

 Грейнерт Дж., Макгиннис Д.А. Модель растворения одиночного пузырька – графический интерфейс пользователя SiBu-GUI // Моделирование и программное обеспечение. 2009. 24. С. 1012–1013. DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.12.011 2. Черных Д.В., Космач Д.А., Константинов А.В., Шахова Н.Е., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Силионов В.И., Семилетов И.П. Стенд для исследования газообмена между всплывающими пузырьками метана и водной средой // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 156–157.

References

- Greinert J., McGinnis D.A. Single Bubble Dissolution Model The Graphical User Interface SiBu-GUI // Environmental Modelling and Software. 2009. 24. P. 1012–1013. DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.12.011
- Chernykh D.V., Kosmach D.A., Konstantinov A.V., Shakhova N.Ye., Salomatin A.S., Yusupov V.I., Silionov V.I., Semiletov I.P. Stend dlya issledovaniya gazoobmena mezhdu vsplyvayushchimi puzyr'kami metana i vodnoy sredoy // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2019. № 1. P. 156–157.