

УДК 534.222.1;551.463.26

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ ДОННЫХ ОСАДКОВ
МЕЛКОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ С ПОМОЩЬЮ ЭХОЛОКАТОРА**© 2011 г. *И.Н. Диденкулов*¹, *С.И. Муякшин*², *А.А. Стромков*¹, *Г.Е. Фикс*¹¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород² Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

muyakshin@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 08.02.2011

Описаны первые результаты эхолокационной регистрации выходов газовых (метановых) пузырьков из осадков в южной части акватории Горьковского моря. Пузырьки возникают случайным образом в пространстве и времени. Поток газа, переносимый пузырьками, составляет $1.2 \cdot 10^{-6}$ моль*м⁻²*с⁻¹ и почти полностью достигает атмосферы. Рассмотрены особенности эхолокационного метода для оценки потока метана со дна мелководных водоемов.

Ключевые слова: акустическая локация, метановые пузырьки, поток метана, донные осадки, мелководный водоем.

Введение

Хорошо известно, что метан вносит в парниковый эффект второй по величине вклад после углекислого газа. Поэтому разработка инструментальных методов измерения потока метана в гидросферу и атмосферу остается актуальной задачей. Ископаемый метан биогенного и термогенного происхождения поступает в воду из морских донных осадков за счет диффузии, а также может выноситься всплывающими пузырьками. Установлено, что при всплытии метан из пузырька диффундирует в воду, частично замещаясь азотом и кислородом [1]. При глубинах менее 30 м значительная часть метана может выноситься пузырьками в атмосферу. Растворенный метан может попадать в атмосферу за счет турбулентной диффузии. По некоторым оценкам именно пузырьковый транспорт является наиболее эффективным механизмом переноса метана в атмосферу и гидросферу.

На дне океана, морей и глубоководных озер с помощью ультразвуковой акустической локации обнаружено [2–6] большое число пузырьковых источников метана. К настоящему времени несколькими исследовательскими группами [2, 3] разработаны методики оценки потока метана, основанные на регистрации обратного рассеяния ультразвука на пузырьковых струях. Однако большинство работ по данной тематике относится к морским источникам. Между тем, мелководные водоемы – озера и водохранилища – также являются источниками метана, который образу-

ется при анаэробном бактериальном разложении накапливающихся на дне органических осадков [7, 8]. Работ, где акустическая локация применялась бы для регистрации пузырьков в озерах, водохранилищах и других мелководных водоемах, очень мало [9]. В данной публикации представлены первые результаты эхолокационной регистрации выходов газовых (метановых) пузырьков из осадков в южной части акватории Горьковского моря. Рассмотрена специфика методики эхолокационного определения потока метана со дна мелководных водоемов и ее возможные приложения.

**Методы и результаты
натурных измерений**

Для эхолокационной съемки применялись портативные эхолоты промышленного производства «Hydrobox» (фирма «SyQwest Inc.», USA) и «Humminbird 798 с combi» (фирма «Humminbird», USA). Для определения координат к эхолоту «Hydrobox» подключался приемник GPS фирмы «JJ connect». Эхолот «Humminbird» имел встроенный приемник GPS. Оба эхолота имеют два вертикальных канала зондирования, работающих на разных частотах. Кроме этого, эхолот «Humminbird» имеет два канала бокового обзора, работающих на частоте 455 кГц. Поэтому его в принципе можно использовать для классификации типа дна. Рабочие частоты и характеристики диаграмм направленности (ДН) этих эхолотов приведены

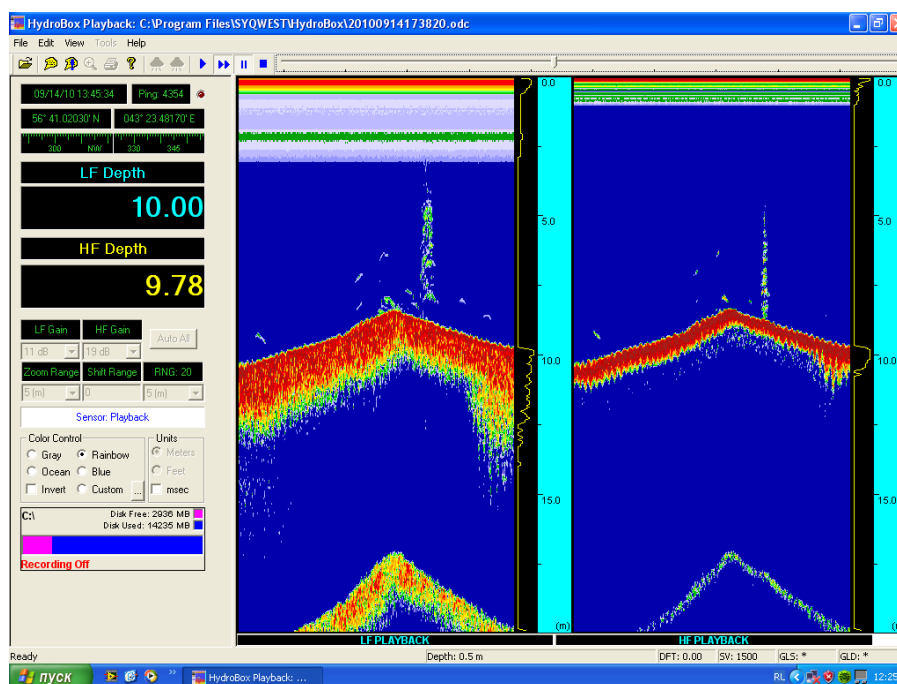


Рис.1. Двухчастотная эхограмма цепочки пузырьков, полученная 14 сентября 2010 года с помощью эхолота «Hydrobox». Слева – на частоте 33 кГц, справа – 210 кГц

ниже. Эхолот «Hydrobox» с преобразователем P04816 на рабочей частоте 33 кГц имеет ДН шириной 23 град, на частоте 210 кГц – 8 град. Эхолот «Humminbird 798 с combi» с преобразователем XHS9HDS1180T на рабочей частоте 83 кГц имеет ДН шириной 60 град, на частоте 200 кГц – 20 град. Оба эхолота позволяют регистрировать эхосигналы в цифровой форме, а затем воспроизводить их. Калибровка эхолотов на данном этапе работы не проводилась, хотя для прямых измерений сечений рассеяния различных неоднородностей водной толщи это необходимо.

Эхолокационная съемка проводилась в южной части водохранилища Горьковской ГЭС 24 июня, 26 августа и 14 сентября 2010 года с борта катера с водоизмещением около 50 тонн. Антенны эхолотов крепились на штангах с растяжками около борта с заглублением от 0.3 до 1 м. Поскольку работа имела поисковый характер, специальные схемы маневрирования не применялись и съемка велась в «попутном режиме» как во время движения судна со скоростями от 1 до 5 м/с, так и в дрейфе. Во время первого же выхода около левого берега водохранилища при глубине примерно 10 м на эхограммах были обнаружены отметки, характерные для всплывающих пузырьков. На рис. 1 показан пример эхограмм, полученных на среднем ходу с помощью эхолота «Hydrobox» на частотах 33 и 210 кГц. На рис. 2 показана карта,

на которой отмечены места обнаружения подобных отметок во время всех выходов. Качественный анализ экспериментальных данных показал, что пузырьки появляются спонтанно, случайным образом во времени и пространстве. Из одной точки дна за раз выходит от одного до полутора–двух десятков пузырьков. Постоянно действующих источников, из которых пузырьки выходили бы непрерывно, обнаружено не было. В подавляющем большинстве случаев на эхограммах пузырьки проявляются в виде хорошо различимых визуально наклонных траекторий. Этот признак позволяет отличить их от рыб, которые оставляют на эхограмме характерные дугообразные отметки. Особенно хорошо выделяются пузырьки при измерениях в дрейфе или на малом ходу (скорость судна не более 1 м/с). Пример такой эхограммы, полученной 14 сентября с помощью эхолота «Humminbird», приведен на рис. 3. При больших скоростях отметки становятся слишком короткими и трудно различимыми. Характерная параболическая форма траекторий связана не с уменьшением вертикальной скорости всплывания пузырьков, а с изменением наклонной дальности, вызванным горизонтальным смещением рассеивателя внутри ДН. Совершенно очевидно также, что при проведении систематической эхолокационной съемки какой-либо акватории для обнаружения всплывающих пузырьков больше подходит широкая диаграмма

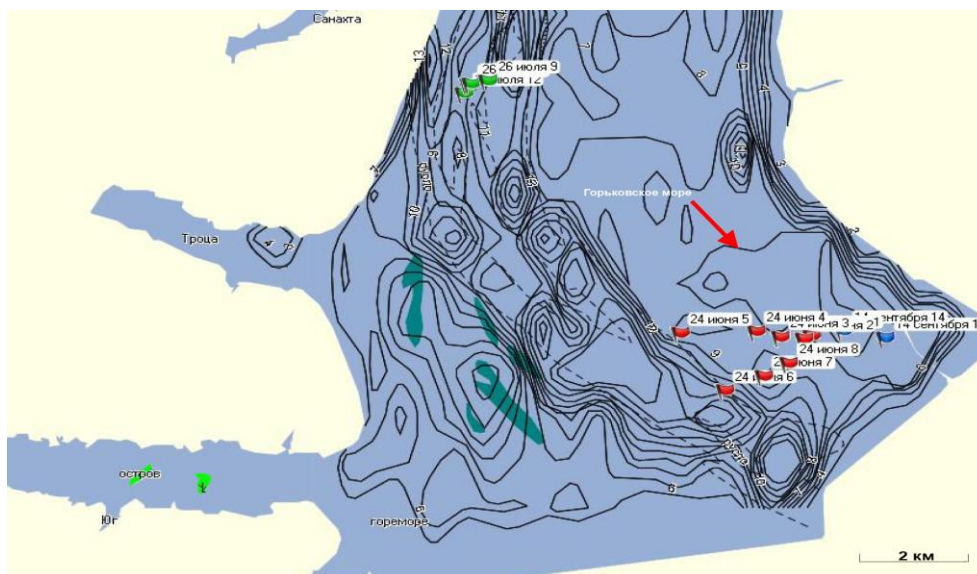


Рис. 2. Места обнаружения выходов пузырьков в июне-сентябре 2010 года. Цифры после даты обозначают число наблюдавшихся пузырьков

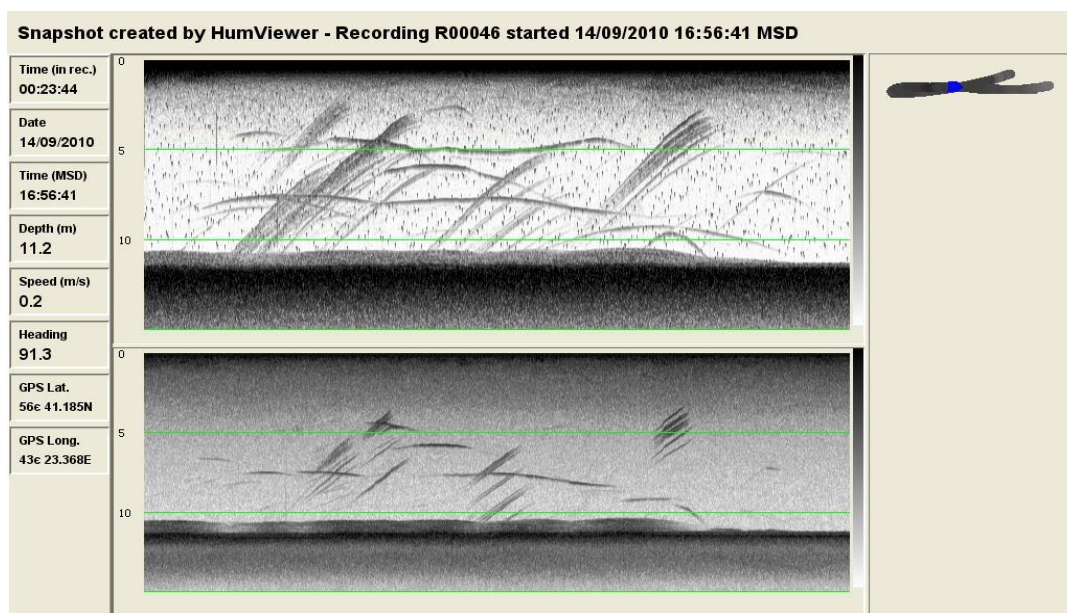


Рис. 3. Эхограммы на частотах 83 кГц (вверху) и 200 кГц (внизу), полученные в Горьковском море (дрейф, эхолот «Humminbird 798 с combi»)

направленности. На рис. 4 в более крупном масштабе показан участок с размерами 1000 м x 800 м, где 14 сентября в основном с помощью эхолота «Humminbird» были обнаружены многочисленные выходы пузырьков. Квадратиками помечены места, где в течение 50-минутного дрейфа с запада на восток наблюдались пузырьки. Всего их было обнаружено 148 штук. Скорости всплытия пузырьков определялись по наклону траекторий. Для измерений отбирались те из них, которые мало отклонялись от прямых. Скорости имеют разброс от 0.209 м/с до

0.238 м/с. По кривой, связывающей размер пузырька с его радиусом (см. рис. 5), косвенно был определен разброс радиусов, который составил 0.42–0.58 см.

Взяв в качестве среднего значения радиус $r = 0.5$ см, мы оценили удельный поток молярной массы метана по очевидной формуле (1):

$$Q = V_b(r) P(h) N_b / (RTSt). \quad (1)$$

Здесь $V_b(r) = 4/3 \times \pi \times r^3$ – объем пузырька с радиусом r (без учета его несферичности), $P(h) = P_a + \rho gh$ – давление на глубине h , P_a – атмосферное давление, ρ – плотность воды, g –

ускорение свободного падения, N_b – число обнаруженных пузырьков, S – площадь, «осмотренная» антенной, t – длительность измерений, R – газовая постоянная. Площадь S рассчитывалась по формуле: $S = Lh2tg(\alpha^*)$, где L – путь судна, α^* – полуширина ДН эхолота. Для канала 200 кГц эхолота «Humminbird» $\alpha^* = 10$ град. При значениях $h = 10$ м, $N_b = 148$, $S = 1763$ м², $T = 293$ К и $t = 50$ мин поток оказался равен $Q = 1.2 \times 10^{-6}$ моль \times м⁻² \times с⁻¹.

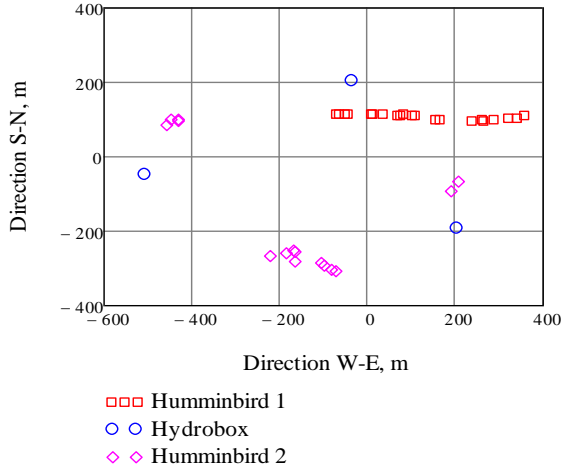


Рис. 4. Места обнаружения пузырьков 14 сентября 2010 года

В отличие от методики, изложенной в [2], где для расчета потока использовалось усредненное по импульсному объему эхолота сечение рассеяния, в этом случае применялся прямой подсчет количества пузырьков, обнаруженных эхолотом в единицу времени. Для определения радиуса и объема пузырька нами был использован косвенный метод – по эмпирической кривой, связывающей скорость всплытия пузырька с его радиусом. Это вызвано тем, что простейший однолучевой эхолот, даже если выполнена его калибровка, не позволяет провести измерение сечения рассеяния пузырька, по которому можно было бы определить его радиус и объем. Данное ограничение возникает из-за того, что неизвестен угол отклонения пузырька от оси ДН эхолота. О возможности его преодоления будет сказано ниже.

Итак, мы получили оценку потока метана у дна. Наблюдения в безветренную погоду показали, что пузырьки достигают поверхности. Как было отмечено во введении, при всплытии метан из пузырька диффундирует в воду, частично замещаясь кислородом и азотом. Следовательно, нужно ответить на вопрос, сколько метана пузырек доставляет к поверхности. Для

моделирования этого процесса с использованием [1, 10] нами была получена система уравнений, приведенная ниже.

Система состоит из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений: уравнения установившегося движения пузырька в жидкости (2); уравнения изменения его радиуса r с учетом изменения внешнего давления, массы газов в смеси метана, азота, кислорода и уравнений состояния для всех трех газов (3); уравнений диффузии для всех трех газов (4)–(6). Независимой переменной является время, зависимыми – текущая глубина пузырька Z , его радиус r и молярные массы содержащихся в пузырьке метана N_1 , кислорода N_2 и азота N_3 . Соотношения (7) задают начальные условия – глубину Z_H и радиус пузырька r_H :

$$\frac{\dot{Z}}{Z_0} = -\frac{U(r)}{Z_0}, \quad (2)$$

$$\dot{r} = \left\{ \frac{R U(r)}{3 Z_0} + \frac{T}{T_0} \times \left[K_1(r) \left(\alpha_1^0 - \alpha_1^S \left(1 + \frac{Z}{Z_0} + \frac{3}{2} \times \frac{r^*}{r} - \frac{T}{T_0} \times \left(N_2 + N_3 \right) \frac{1}{C_0 \times 4/3\pi \times r^3} \right) \right) \right] + \dots \right. \\ \left. \dots + K_2(r) \left(\alpha_2^0 - \alpha_2^S \frac{T}{T_0} N_2 \frac{1}{C_0 \times 4/3\pi \times r^3} \right) \dots \right. \\ \left. \dots + K_3(r) \left(\alpha_3^0 - \alpha_3^S \frac{T}{T_0} N_3 \frac{1}{C_0 \times 4/3\pi \times r^3} \right) \right\} \times \left(1 + \frac{Z}{Z_0} + \frac{r^*}{r} \right)^{-1},$$

$$\frac{\dot{N}_1}{C_0} = 4\pi R^2 K_1(r) \frac{T}{T_0} \left(\alpha_1^0 - \alpha_1^S \left(1 + \frac{Z}{Z_0} + \frac{3}{2} \frac{r^*}{r} - \frac{T}{T_0} \times \left(N_2 + N_3 \right) \frac{1}{C_0 \times 4/3\pi \times r^3} \right) \right), \quad (4)$$

$$\frac{\dot{N}_2}{C_0} = 4\pi R^2 K_2(r) \frac{T}{T_0} \times \left(\alpha_2^0 - \alpha_2^S \left(\frac{T}{T_0} N_2 \frac{1}{C_0 \times 4/3\pi \times r^3} \right) \right), \quad (5)$$

$$\frac{\dot{N}_3}{C_0} = 4\pi R^2 K_3(r) \frac{T}{T_0} \times \left(\alpha_3^0 - \alpha_3^S \left(\frac{T}{T_0} N_3 \frac{1}{C_0 \times 4/3\pi \times r^3} \right) \right). \quad (6)$$

Таблица 1

	Метан ($i=1$)	Кислород ($i=2$)	Азот ($i=3$)
C_i^0 (моль/м ³)	$2 \cdot 10^{-4}$	$9.76 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-1}$
C_i^S (моль/м ³)	1.64	0.7	1.44
D_i (м ² /с)	$1 \cdot 10^{-9}$	$1.12 \cdot 10^{-9}$	$9.9 \cdot 10^{-10}$

Нормировочные константы: $Z_0=10.33$ м, $C_0=44.62$ моль/м³, $r^*=1.021 \times 10^{-7}$ м, T – температура воды в град. Кельвина, $T_0 = 273.15$ К.

Начальные условия: $r(0)=r_n$; $Z(0)=Z_n$,

$$\sum_{i=1}^3 \frac{P_i^0}{P_a} = 1 + \frac{Z(0)}{Z_0} + \frac{3 r^*}{2 r(0)} \quad (7)$$

При выводе уравнения для радиуса пузырька предполагалось, что полное давление в пузырьке, уравновешивающее внешнее давление водяного столба на соответствующей глубине, складывается из избыточного давления, обусловленного поверхностным натяжением, и парциальных давлений всех газов. Парциальное давление каждого газа подчиняется уравнению состояния Менделеева–Клапейрона. Считалось также, что диффузия каждого газа происходит независимо от других через всю поверхность пузырька. Поведение решения этой системы зависит от начальных условий и набора констант. Помимо физических постоянных (газовой постоянной R , нормального атмосферного давления P_a и т.д.) в их число входят концентрации газов в воде C_i^0 и насыщающие концентрации C_i^S . Насыщающие концентрации связаны с т.н. постоянными Генри H_i соотношениями: $C_i^S = P_a / H_i$. Эти величины введены в систему с помощью безразмерных констант $\alpha_i^0 = C_i^0 / C_0$ и $\alpha_i^S = C_i^S / C_0$. Кроме этого, на поведение фазовых траекторий системы оказывают влияние две функции. Во-первых, зависимость скорости всплытия пузырька от его радиуса $U = U_{rise}(r)$ (показана на рис. 5). Во-вторых, зависимости коэффициентов массопереноса газов $K_i(r)$ от радиуса пузырька и скорости всплытия. Мы использовали простейшую параметризацию для этих величин в форме: $K_i(r) = \sqrt{D_i U_{rise}(r)} / r$, где D_i – коэффициенты молекулярной диффузии для газов. В табл. 1 приведены значения констант, которые были использованы при моделировании, они заимствованы из [12]. Для решения этой системы уравнений была разработана программа на языке MATLAB.

Согласно расчетам по разработанной нами модели динамики всплывающего пузырька, 97% потока метана с глубины 10 м достигает

атмосферы. Расчеты проводились для начального радиуса $r = 0.5$ см, который использовался и при оценке потока.

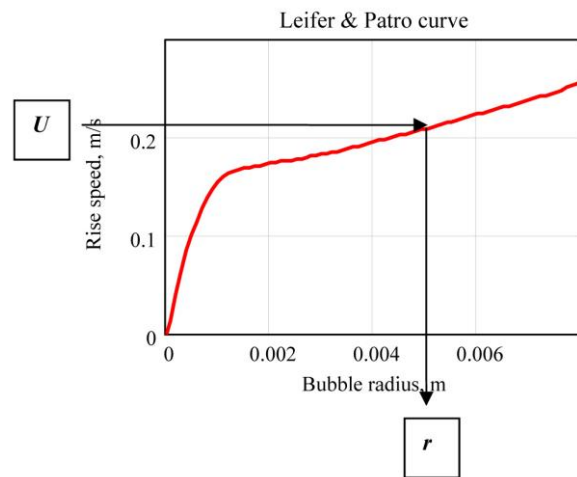


Рис. 5. Зависимость скорости всплытия пузырька от радиуса. Схема, поясняющая определение радиуса пузырьков по скорости всплытия

Обсуждение результатов

Прежде всего, отметим следующие особенности наблюдавшейся нами пузырьковой эмиссии. Во-первых, пузырьки возникают случайно в пространстве и времени группами от одного до полутора-двух десятков. Во-вторых, пузырьки имеют небольшой разброс радиусов. Как уже говорилось выше, были зарегистрированы пузырьки с радиусами от 0.42 до 0.58 мм. На данную особенность распределения пузырьков по размерам (РПР) обратили внимание и авторы работы [9], которые проводили эхолотационную съемку оз. Киннерет (Израиль). Можно предположить, что пузырек отрывается от поверхности жидкого вязкого осадка в тот момент, когда обволакивающая его пленка рвется. При этом подъемная сила, однозначно связанная с объемом пузырька, должна быть уравновешена силой поверхностного натяжения тонкой перемычки, которая связывает пузырек с жидким илом перед отрывом. Если ил более или менее однороден, пузырьки будут почти одинаковыми. В локализованных струйных вы-

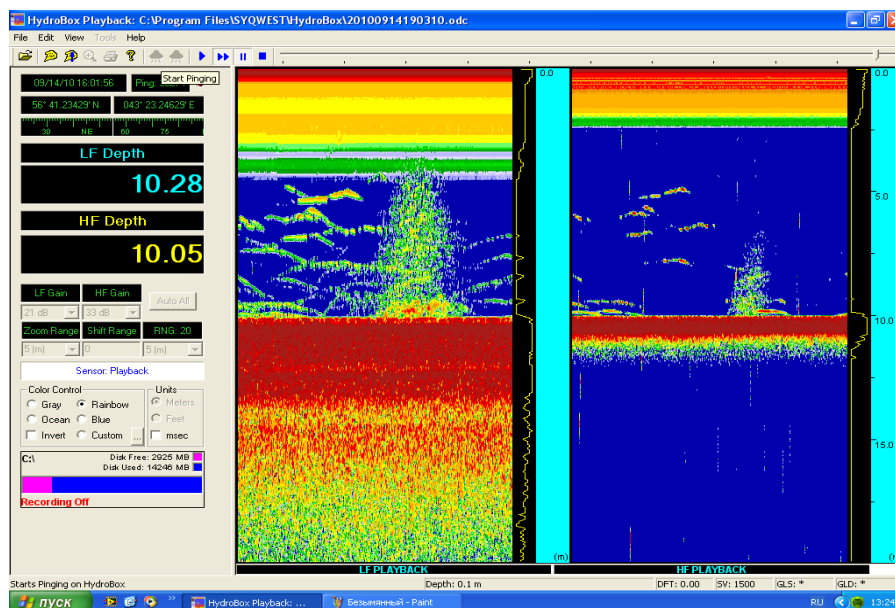


Рис. 6. Эхограмма искусственно вызванного облака пузырьков (слева – на частоте 33 кГц, справа – 210 кГц)

ходах пузырьков с большим расходом, которые часто наблюдаются на морском дне, вариации размеров пузырьков намного больше. В-третьих, мы наблюдали появление пузырьков только на глубинах до 8–10 м. При пересечении затопленного русла р. Волги, глубины которого в южной части водохранилища достигают 20 м, пузырьки нами не наблюдались. Впрочем, данный вывод нуждается в проверке.

В-четвертых, искусственное воздействие на дно (сброшенный с борта судна камень) вызвало настоящее «извержение» газовых пузырьков и частиц осадка, что говорит о высокой насыщенности газом осадочного слоя. Соответствующая эхограмма приведена на рис. 6.

В работе [11] приведена оценка среднего потока метана со дна Охотского моря, равная $Q = 5 \text{ ммоль} \times \text{км}^{-2} \times \text{с}^{-1}$. Эта величина примерно в 5 раз больше полученной нами ($1.2 \text{ ммоль} \times \text{км}^{-2} \times \text{с}^{-1}$). Однако из-за существенно больших глубин лишь небольшая часть этого потока достигает атмосферы (если вообще достигает). Таким образом, мелководное равнинное водохранилище, возможно, порождает больший удельный поток метана в атмосферу, чем одно из окраинных морей Мирового океана. В озере Киннерет (Израиль) авторами [9] зарегистрирован средний удельный поток со дна почти на два порядка превышающий полученную нами оценку.

Остановимся на некоторых методических особенностях данного исследования. Обработка данных была проведена фактически «вручную». Траектории всплывающих пузырьков выделялись на эхограммах и подсчитывались визуаль-

но. Их наклон, по которому рассчитывалась скорость всплытия пузырьков, также определялся на глаз. Это не позволило провести полный статистический анализ всех случаев обнаружения пузырьков. Для этого необходимо разработать автоматизированные алгоритмы. Если строить их как алгоритмы обработки изображений, основной сложностью будет наличие в толще воды таких сильных целей, как рыбы. Более простой подход, к тому же не требующий разработки специальной аппаратуры, создание корреляционного алгоритма определения локальной скорости подъема рассеивателей (пузырьков) по цифровой эхограмме интенсивности. Резко расширить возможности методики обнаружения и определения характеристик одиночных пузырьков может использование технологии «сдвоенного» или «расщепленного луча» (dual-beam or split-beam). Это даст возможность определять не только скорость всплытия, но и точно измерять сечение рассеяния обнаруженных пузырьков. В этом случае уже потребуются эхолоты другого класса, или необходимо будет провести собственную разработку.

Выводы и заключение

Первые результаты эхолокационной съемки южной части водохранилища Горьковской ГЭС показали, что из донных осадков происходит активная эмиссия пузырьков газа (метана). Собранные данные показали, что с помощью эхолокации возможно количественное определение потока метана из осадков. Анализ особенностей

эхограмм позволил прояснить специфику необходимых для этого методик и сформулировать возможные направления дальнейших работ.

Данная методика может быть использована для измерений эмиссии метана со дна мелководных водоемов. Она может также стать частью междисциплинарных исследований, направленных на оценку экологического благополучия водохранилищ и озер.

Работа поддержана РФФИ, грант 09-02-97087-р_поволжье_а «Разработка акустического эхолотационного метода определения потока метана в атмосферу и океан из подводных пузырьковых источников» (2009–2010 г).

Список литературы

1. Leifer I., Patro R.K. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study // *Continental Shelf Research*. 2002. V. 22. P. 2409–2428.
2. Муякшин С.И., Заутер Э. Дистанционный акустический метод определения производительности подводного источника газовых пузырьков // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 6. С. 1045–1051.
3. Nikolovska A., Sahling H., Bohrman G. Hydroacoustic methodology for detection, localization and quantification of gas bubbles rising from the seafloor at gas seeps from the eastern Black Sea // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. V. 9. Q10010, doi: 10.1029/2008GC002118.
4. McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wuest A. Fate of rising methane in stratified water: How much methane reaches the atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. C09007, doi: 10.1029/2005JC003138.
5. Greinert J., Artemov Yu., Egorov V., et al. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 244. P. 1–15.
6. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatchovskiy R.Y. Gas seeps in Lake Baikal – detection, distribution and implication for water column mixing // *Geo-Mar. Letters*. 2010. V. 30, 3–4. P. 399–409. doi 10.1007/s00367-010-0201-3.
7. Delsontro T., McGinnis D.F., Sobek S., Ostrovsky I., Wehrli B. Extreme Methane Emissions from a Swiss Hydropower Reservoir: Contribution from Bubbling Sediments // *Environ. Sci. Technol.* 2010. 44. 2419–2425.
8. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emission from lakes: Dependence of lake characteristics, two region assessments, and a global estimate // *Global biogeochemical cycles*. 2004. 18:GB4009 doi: 4010:1029/2004GB002238
9. Ostrovsky I., McGinnis D.F., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake // *Limnol. Oceanography*. 2008. No 6. P. 105–118.
10. Гончаров В.К., Клементьева Н.Ю. Моделирование динамики и условий звукорассеяния газовых пузырьков, всплывающих с больших глубин в море в районе нефтегазовых месторождений // *Акуст. журнал*. 1995. Т. 42, №3. С. 371–377.
11. Salomatin A., Yusupov V., Chernykh D. Hydroacoustic survey of gas «flares» of the sea of Okhotsk // 10th Intern. Conf. on gas in marine sediments, 6-12 September 2010, Limnological Institute of SB RAS, Lystvyanka, Russia. Abstracts. P. 144–145.
12. Leifer I., Judd A.G. Oceanic methane layers: the hydrocarbon seep bubble deposition hypothesis // *Terra Nova*. 2002. V. 14, No 6. P. 417–424.

DETERMINATION OF METHANE EMISSIONS FROM SHALLOW RESERVOIR SEDIMENTS BY SONAR

I.N. Didenkulov, S.I. Muyakshin, A.A. Stromkov, G.E. Fiks

The first results are given of sonar detection of gas (methane) bubble escapes from sediments in the southern area of the Gorky Sea. Bubbles occur randomly in space and time. The gas flux transported by the bubbles is $1.2 \times 10^{-6} \text{ mmol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and almost entirely reaches the atmosphere. The features of the echolocation method designed to estimate the methane flux from the shallow reservoir sediments are considered.

Keywords: acoustic radar, methane bubbles, methane flux, bottom sediments, shallow water reservoir.