

УДК. 534.8.081.7

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗАГАЗОВАННЫХ УЧАСТКОВ ДНА ВОДОЕМОВ СРЕДСТВАМИ ГИДРОАКУСТИКИ

© А.М. Гаврилов, А.Н. Трехин

Ключевые слова: экология; газовые пузырьки; газосодержащий грунт; гидроакустика; фазовые характеристики. Обсуждаются гидроакустические способы мониторинга экологического состояния водоемов, ориентированные на получение информации о загазованных участках дна. Существующая аппаратура в рамках амплитудного метода эхолокации не способна достоверно выявить и оценить присутствие газа (метан, сероводород и др.) в донном грунте. Для решения этой задачи предложено использовать фазовые характеристики эхосигналов, что предполагает создание принципиально нового класса гидроакустической техники.

Интенсивное и повсеместное использование океана и внутренних водоемов в качестве источника пресной воды, биоресурсов, полезных ископаемых и важного звена мировой транспортной системы ставит актуальные задачи по контролю и снижению негативных воздействий антропогенного характера на водные объекты. Решение этих задач невозможно без экологического мониторинга состояния водоемов.

Одним из важнейших показателей экологического состояния водоема является его газовый режим. В работе [1] кислород определен важнейшим компонентом природных вод и рассмотрены вопросы построения экологических моделей водоема с учетом его динамики. В работе [2] содержание метана положено в основу оценки экологического состояния водного объекта. Накопление метана и сероводорода в донных осадках связано с биохимическими процессами, которые вызваны скоплением органических веществ и антропогенным воздействием на водную среду.

Выделяясь из донных осадков, метан активно окисляется, обедняя кислородом как придонные, так и поверхностные слои воды. В водоемах сероводород выступает в роли регулятора окислительно-восстановительных процессов и кислородного режима. Превышение содержания метана и сероводорода в воде ведет к массовым заморам рыб и снижению способности водоема к самоочищению.

Для мониторинга экологического состояния водных объектов используются геохимические и акустические методы. Ведутся работы по использованию спутниковых данных [3–4]. Для определения газового режима водного объекта используют геохимические методы: гелиевая, эманиционная, газортутная и бактериальная съемки. Широко распространен парофазный газохромографический метод, применяемый для газогеохимических работ при отборе проб воды.

К недостаткам газохимических методов относятся большие временные затраты на подготовку и получение результатов. Построение математических моделей распространения газа в исследуемой акватории усложняет сильное влияние метеорологических и гидрологических условий на распространение и растворимость

газа в воде. В рамках газохимических методов невозможно локализовать источники потоков газов.

Звуковые волны распространяются в воде на большие расстояния по сравнению с другими видами излучений. Это делает гидроакустическую аппаратуру важным инструментом дистанционного и мобильного поиска загазованных участков дна и мониторинга экологического состояния водоема.

При прохождении судов над загазованными участками дна на индикаторах эхолотов достаточно четко отображаются газовые потоки, а при использовании высоких частот видны и отдельные пузырьки. Возможность фиксации газовых потоков и отдельных пузырей обусловлена сильным различием акустических параметров газа и воды.

В загазованных грунтах водоемов происходит сильное поглощение и многократное рассеивание акустических волн. При проведении эхолокационной съемки сапропелевых отложений [5] на отдельных участках не удастся определить мощность донных отложений, что вызвано наличием тонкой прослойки ила (до 10 см), содержащей нерастворенный газ, образующийся при биохимических процессах.

Зависимость глубины проникновения от частоты зондирующего акустического сигнала зачастую является решающим фактором для использования низких частот. В традиционных эхолотах применение низких частот ведет к увеличению массогабаритных показателей антенн, что создает проблемы при их эксплуатации.

При сейсмоакустическом профилировании используются мощные акустические источники, генерирующие низкочастотные сигналы «взрывного» типа. К недостаткам таких источников относятся низкая стабильность излучаемых сигналов, преобладание в спектре низкочастотных компонент, ограничивающих пространственное разрешение слоев, и негативное воздействие на экосистему водоемов.

Перечисленные недостатки отсутствуют у параметрических гидролокаторов, которые позволяют перестраивать рабочую частоту в широком диапазоне, сохраняя высокую пространственную направленность.

Низкий КПД используемых здесь нелинейных излучателей (единицы процента) ограничивает возможность зондирования глубоко залегающих донных структур.

Для мониторинга загазованных участков дна разрабатываются новые гидроакустические методы и средства, ведутся работы по использованию существующей аппаратуры. В работе [6] указаны два возможных направления исследования акустических свойств грунта. Первое направление предполагает непосредственное определение акустических параметров в грунте, проводя измерения скорости продольных волн и коэффициента их поглощения. Второе направление изучает акустические свойства грунта, используя звуковое поле над ним. Для этого измеряются коэффициент отражения звуковых волн от донных осадков и входной нормальный импеданс дна.

Исследования газонасыщенных грунтов дополнены направлением, ориентированным на измерение параметров всплывающих пузырьков: скорость подъема, коэффициент отражения звуковых волн от газовых неоднородностей в воде [7–8]. Для этого средствами эхолотации [7] оценивается поток метана со дна водоема прямым подсчетом количества пузырьков, обнаруженных в единицу времени, и определяется объем пузырька по эмпирической кривой, связывающей скорость всплытия пузырька с его радиусом. Подсчеты можно проводить в дрейфе или на скорости судна до 1 м/с с использованием эхолота с широкой диаграммой направленности.

Привлекательность исследований акустических параметров непосредственно в грунте связана с простой реализацией методов и использованием стандартных приборов. В работе [9] методом акустического каротажа изучались акустические свойства сапропелей в полевых условиях. При этом акустические зонды, работающие в режиме излучения и приема, закреплялись на расстоянии друг от друга и погружались на различную глубину исследуемого слоя. По времени прохождения импульса от излучателя к приемнику определена скорость распространения, а по изменению амплитуды импульсов находился коэффициент поглощения среды. При изучении и разведке озерных отложений сапропеля зафиксированы одновременно минимальное значение скорости и максимальное поглощение акустических волн, что вызвано газонасыщенностью ила. Изменение содержания газовой фазы на 1–2 % влияют на акустические свойства сапропеля значительно больше, чем изменение его влажности и зольности на 10 % и более. Данный метод, несмотря на простоту обнаружения загазованных участков дна, ограничен большими временными затратами, дискретностью (точечный характер) работ, нарушением структуры слоя при погружении акустических зондов.

Метод стоячей волны относится ко второму направлению исследований [6] и заключается в изучении интерференционной структуры поля вблизи дна. Экспериментально в озерных и морских условиях фиксировались участки подводных грунтов с газовыми включениями. Данный метод не требует калибровки излучателя и приемника, может применяться в широкой полосе частот. Однако на низких частотах ближнее поле излучателя оказывает влияние на результаты измерений. Применение метода позволяет получить большой объем сведений об акустических свойствах грунта (коэффициент отражения, скорость звука и плотность грунта, коэффициент затухания).

Для исследования отражающих свойств грунта на предельно низких частотах используют векторно-фазовые методы, учитывающие амплитудные и фазовые соотношения между давлением и колебательной скоростью. Измерение давления и вертикальной компоненты колебательной скорости в точке на границе вода-грунт позволяет найти входной импеданс грунта. Недостатком метода является появление ошибки в определении модуля коэффициента отражения подводного грунта из-за несовпадения положения эффективной отражающей поверхности с реальным дном водоема. Использование метода требует знания точной геометрии эксперимента и целесообразно в области высоких частот [10].

Измерение разности фаз между давлением и компонентой колебательной скорости (горизонтальной или вертикальной) позволяет определить параметры грунта. Работы можно проводить на участках с плоским дном, где соотношения между измеряемыми величинами имеют простой вид.

Использование комбинированного приемника в векторно-фазовом методе позволяет отказаться от перемещения приемной системы по вертикали во время измерений, что сокращает временные затраты. По частотной зависимости модуля коэффициента отражения, измеренной под разными углами, можно выявить структуру (слоистость) дна, определить акустические параметры слоя (скорость звука, плотность) и его толщину.

Метод требует точной настройки амплитудно-фазовых характеристик приемных трактов на низких частотах. Ограниченность метода вызвана применением излучателя в виде сосредоточенного источника. Создаваемая им интерференционная картина может иметь сложный вид, в результате чего коэффициент отражения будет зависеть от местоположения приемной системы.

Кроме методов, предполагающих специальные излучатели звука, информацию о загазованных участках дна получают, используя в качестве источника сигнала естественные шумы ветра [11] и движения судна. Для нахождения структуры донных осадков измеряют угловую и частотную зависимости коэффициента отражения звука от дна. Для этого используют судно, лежащее в дрейфе, и опущенную вертикально широкополосную приемную антенну. Присутствие газонасыщенного слоя сопровождается увеличением модуля коэффициента отражения и периодическим изменением его от частоты.

Преимуществами метода при мониторинге газонасыщенных участков дна являются получение угловых зависимостей коэффициента отражения звука дном в широком диапазоне рабочих частот, отсутствие жестких требований к остроте главного максимума характеристики направленности антенны, малая длительность работ. Измерения требуют стабильной метеостановки и гидрологической однородности среды (отсутствие внутренних волн, линз, вихрей). Посторонние источники шума (суда, дождевые шквалы, акустическая активность гидробионтов) препятствуют измерениям. Применение метода затруднено при наклоне дна более 10°. Для определения толщины газосодержащего слоя требуется знать скорость звука в нем, измерение которой является самостоятельной задачей.

Донные газонасыщенные осадки обладают сильно выраженными нелинейными свойствами, из-за чего

распространение интенсивных акустических волн сопровождается искажениями. Для обнаружения и мониторинга таких участков дна можно воспользоваться гармониками излучаемой волны, волнами суммарной и разностной частот, рассеянными на пузырьках [12]. В эксперименте регистрировались эхосигналы суммарной частоты, генерируемые в газонасыщенных осадках падающей из воды бигармонической волной. Амплитуда волны суммарной частоты непосредственно связана с параметром нелинейности и газосодержанием грунта. Контроль пузырьков осуществлялся двумя эхолотами, работающими на близких частотах, которые синхронно озвучивали общий участок дна. Отраженная от дна волна принималась антенной, направленной в сторону дна.

Значительно расширить информацию о грунте удастся при использовании фазовых характеристик эхосигналов, что нашло подтверждение при анализе [13] взаимных фазовых спектров излучаемой и отраженных сейсмических волн. Характерные изменения взаимного фазового спектра, появляющиеся при насыщении лоцируемых слоев грунта газом и нефтью, открывают новые возможности оценки нефтегазоносности осадочных толщ.

Однако реально подойти к решению задачи экологического мониторинга водоемов через поиск загазованных участков дна можно лишь путем создания специализированной акустической аппаратуры, ориентированной на эту задачу. Для этого предложено использовать новый информативный параметр эхосигнала, т. н. фазовый инвариант многочастотной волны [14], однозначно указывающий на наличие газа в грунте. Работа по созданию таких гидроакустических приборов ведется в настоящее время авторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима. М.: Наука, 1988. С. 167.
2. РД 52.24.512-2002 Методические указания. Методика выполнения измерений концентрации метана в водах паровым газохроматографическим методом.
3. Давыденко Д.Б. Зоны газонакопления района Таганрогского залива и возможное влияние их на экосистему // Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию дня рождения Д.Г. Панова. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 85-87.
4. Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Выявление признаков придонной гипоксии в Азовском море и Керченском проливе на базе контактных и спутниковых данных // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 4. С. 71-78.
5. Иванов Г.Н. Применение методов локации для изучения и разведки торфяных и сапропелевых отложений // Труды Инсторта. 2011. Т. 56. № 3. С. 39-52.
6. Грубник Н.А. Исследование акустических свойств подводного грунта на высоких звуковых частотах // Акуст. журн. 1960. Т. 6. № 4. С. 446-453.
7. Диденкулов И.Н., Муякиши С.И., Стромков А.А., Фикс Г.Е. Определение эмиссии метана из донных осадков мелководных водоемов с помощью эхолотатора // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 5 (3). С. 43-49.
8. Вьюгин П.Н., Грязнов И.Ю., Духицкий М.М. О методах акустической диагностики пространственного распределения всплывающих пузырьков газа в воде // Труды (восьмой) научной конференции по радиофизике, 2004. Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. С. 172-173.
9. Иванов Г.Н. Изучение акустических свойств сапропеля и торфа // Труды Инсторта. 2013. Т. 60. № 7. С. 18-42.
10. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
11. Комиссарова Н.Н., Фурдеев А.В. Акустический метод измерения газосодержания в донных осадках // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 666-670.
12. Карпов С.В., Клусек З., Матвеев А.Л., Потапов А.И., Сутин А.М. Нелинейное взаимодействие акустических волн в газонасыщенных морских осадках // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 4. С. 527-533.
13. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Черкасова М.А. Анализ информационных свойств взаимных фазовых спектров отраженных сейсмических волн // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 5. С. 108-115.
14. Гаврилов А.М. Фазозависимые процессы нелинейной акустики: модулированные волны. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 352 с.

Поступила в редакцию 30 августа 2014 г.

Gavrilov A.M., Trekhin A.N. ENVIRONMENTAL MONITORING OF GAS-CONTAINING AREAS OF POND'S BED BY USING HYDRO-ACOUSTIC MEANS

The paper dwells on the means of the ponds' environmental monitoring aimed at receiving information on the gas-containing areas of the pond's ground. The currently existing equipment is not capable of a reliable identification and assessment of the gas presence (hydrogen sulfide, methane, etc.) in the bottom soil within the amplitude method of ultrasonic scanning (echo location). To solve this problem it is proposed to use the phase characteristics of the echo-signal, which involves the creation of fundamentally new class of hydro-acoustic equipment

Key words: ecology, gas bubbles, gas-containing ground, hydro-acoustic, phase characteristics

Гаврилов Александр Максимович, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой физики, e-mail: gavr_am@mail.ru

Gavrilov Aleksander Maksimovich, South Federal University, Taganrog, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Physics Department, e-mail: gavr_am@mail.ru

Трехин Алексей Николаевич, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация, аспирант, кафедра физики инженерно-технологической академии, e-mail: redman79@mail.ru

Trekhin Aleksey Nikolayevich, South Federal University, Taganrog, Russian Federation, Post-graduate Student, Physics of Engineering Technologic Academy Department, e-mail: redman79@mail.ru