

УДК 551.46.09

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОГНОЗА НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МОРСКИХ ШЕЛЬФОВ И ЗАЛЕЖЕЙ ДРУГИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<sup>1</sup>Лискин В.А., <sup>1</sup>Егоров А.В., <sup>2</sup>Гамазов Н.И., <sup>1,2</sup>Римский-Корсаков Н.А.

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru

Проведена разработка комплексной технологии прогноза нефтегазоносности морских шельфов и залежей других полезных ископаемых, а также комплексного экологического мониторинга акваторий, в том числе в условиях ледового покрова. При этом осуществлено использование автономной гидроакустической системы для измерения вертикальных профилей скорости течения, установленной и интегрированной в донный модуль. Модуль был оснащен высокоразрешающей системой геохимического анализа потоков вещества, поступающего из осадочной толщи. В результате осуществлено создание и испытания экспериментального образца автономного океанологического комплекса. Проведено научно-техническое обоснование и разработана математическая программа для обеспечения имитационного высокоразрешающего моделирования системы геохимического анализа потоков вещества через поверхность раздела вода-осадок. Созданы модель и программы расчетов как для потока вещества из осадка в воду, так и для потока из воды в осадок. В основу модели заложена возможность параметризации концентраций анализируемых компонентов геохимической системы. Так, для кислорода максимальная концентрация определяется реально измеряемым значением концентрации в придонном слое воды. Для метана максимальная концентрация определяется равновесным значением его растворимости в присутствии газовых гидратов с учетом реального давления и температуры в верхнем слое осадков. Разработанная модель позволяет по данным потока метана из осадка в воду рассчитывать положение газогидратной залежи под поверхностью дна. Полученные результаты верифицированы с учетом данных, полученных с помощью глубоководных обитаемых аппаратов на газогидратном месторождении в Центральном Байкале.

**Ключевые слова:** комплекс, автономный, экологический, мониторинг, углеводородные, проявления, метан

*Исследования проведены в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0010. Экспериментальная часть исследований выполнялась за счет средств проекта РФФ № 23-17-00156.*

## DEVELOPMENT OF INTEGRATED TECHNOLOGY FOR RESEARCHING AND FORECASTING THE OIL-AND-GAS POTENTIAL OF OFFSHORE SHELVES AND OTHER MINERAL RESERVATIONS

<sup>1</sup>Liskin V.A., <sup>1</sup>Egorov A.V., <sup>2</sup>Gamazov N.I., <sup>1,2</sup>Rimsky-Korsakov N.A.

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru

The development of an integrated technology for forecasting the oil and gas content of sea shelves and deposits of other minerals, as well as integrated environmental monitoring of water areas, including under ice cover. At the same time, an autonomous hydroacoustic system was used to measure the vertical profiles of the current velocity, installed and integrated into the bottom module. The module was equipped with a high-resolution system for geochemical analysis of material flows coming from the sedimentary strata. As a result, the creation and testing of an experimental model of an autonomous oceanological complex was carried out. A scientific and technical substantiation has been carried out and a mathematical program has been developed to provide high-resolution simulation of the system for geochemical analysis of material flows through the water-sediment interface. A model and calculation programs have been created both for the flow of matter from sediment into water and for flow from water into sediment. The model is based on the possibility of parametrizing the concentrations of the analyzed components of the geochemical system. So for oxygen, the maximum concentration is determined by the actually measured value of the concentration in the bottom layer of water. For methane, the maximum concentration is determined by the equilibrium value of its solubility in the presence of gas hydrates, taking into account the real pressure and temperature in the upper layer of sediments. The developed model makes it possible to calculate the position of the gas hydrate deposit under the bottom surface using the data of the methane flow from the sediment into the water. The results obtained were verified taking into account the data obtained using deep-sea manned vehicles at the gas hydrate field in Central Baikal.

**Keywords:** complex, autonomous, ecological, monitoring, hydrocarbon, methane discharge

*The research was carried out within the framework of the State Assignment of the IO RAS on topic No. FMWE-2021-0010. The experimental part of the research was carried out at the expense of the RSF project No. 23-17-00156.*

Проведена разработка комплексной технологии прогноза нефтегазоносности морских шельфов и залежей других полезных

ископаемых, а также комплексного экологического мониторинга акваторий, в том числе в условиях ледового покрова. При этом

осуществлено использование автономной гидроакустической системы для измерения вертикальных профилей скорости течения, установленной и интегрированной в донный модуль. Модуль оснащается высоко-разрешающей системой геохимического анализа потоков вещества, поступающего из осадочной толщи. В результате осуществлена разработка, создание и проведены испытания экспериментального образца автономного океанологического комплекса. Проведено научно-техническое обоснование и разработана математическая программа для обеспечения имитационного высоко-разрешающего моделирования системы геохимического анализа потоков вещества через поверхность раздела вода-осадок. Созданы модель и программы расчетов как для потока вещества из осадка в воду, так и для потока из воды в осадок. В основу модели заложена возможность параметризации концентраций анализируемых компонентов геохимической системы. Разработанная модель позволяет по данным потока метана из осадка в воду рассчитывать положение газогидратной залежи под поверхностью дна. Полученные результаты верифицированы с учетом данных, полученных с помощью глубоководных обитаемых аппаратов на газогидратном месторождении в Центральном Байкале.

Круговорот элементов между литосферой и гидросферой связан с обменом химическими элементами через поверхность раздела вода-дно. Исследование различных процессов на границе между толщей воды и осадками, протекающих в достаточно узком поверхностном слое, представляет значительный интерес. Наиболее значительны изменения концентраций мигрирующих элементов, которые происходят в достаточно малых протяженностях зон, в связи с чем невозможно с необходимой точностью измерить градиенты их концентраций и провести определение диффузионных потоков. Исследования, связанные с названными выше условиями, проводились, но измерения концентраций кислорода с помощью микроэлектродных средств, которые велись в лабораторных условиях, не соответствуют полностью природным условиям.

Другим методом исследований обмена через дно химическими элементами являются так называемые боксовые эксперименты, при использовании которых контактирующая с фиксированной площадью осадка часть гидросферы ограничена стенками бокса. Так как изменение концентраций элементов в боксе осуществляется через дно бокса, то интенсивность чисто природных обменных процессов определя-

ет характер этих изменений. В связи с условиями и задачами таких экспериментов проводится интерпретация полученных результатов, что связано с временными зависимостями измерений концентрации элементов в боксе. Основные допущения, применяемые при исследованиях, анализируются на соответствие системе уравнений, которые описывают временную и пространственную изменчивость концентраций элементов, представленных в водорастворимых формах.

### Материалы и методы исследования

Для количественного мониторинга содержания метана в поверхностных водах использовалось непрерывное сканирование с помощью тракта измерения метана. В результате были получены массивы данных, достаточные, чтобы на их основе рассчитать эмиссию метана из вод Карского моря в атмосферу. Получены систематические данные по вертикальному распределению метана в толще морской воды, в различных зонах Карского моря. В результате были выявлены характерные вертикальные структуры с подповерхностным максимумом концентраций метана. Исследования подповерхностных вертикальных структур позволили выявить подповерхностный максимум метана, что в свою очередь позволяет сделать заключение об определяющей роли процессов, происходящих внутри самой водной толщи на образование, окисление и эмиссию метана из гидросферы в атмосферу. Проведена разработка структуры и объединение в составе автономного океанологического комплекса разработанных технических и программно-методических средств исследований. Выполнен выбор Арктического бассейна в качестве региона проведения предварительных натурных испытаний макета автономного океанологического комплекса. Проведены испытания и научные исследования углеводородных проявлений в Карском море [1; 2].

Рассмотрим структуру реализации датчика метана. Два чувствительных элемента, один для температуры, другой для метана, расположены в головной части датчика. От контакта с водой чувствительный элемент защищен силиконовой мембраной, лежащей на пористой мембране, способной противостоять действию внешнего давления. Оба чувствительных элемента через внутренние разъемы подсоединены к электрической плате, располагающейся в центральной части прочного корпуса. На плате расположены усилительные и компенсаторные схемы, позволяющие подбирать рабочий режим для датчика. Адсорб-

ция углеводородов на активном слое полупроводника ведёт к обмену электронами с  $\text{SnO}_2$  и таким образом изменяет проводимость активного слоя, которая, в свою очередь, конвертируется в напряжение. При помощи аналого-цифрового преобразователя напряжение преобразуется в цифровой формат и подаётся через сериальный порт в компьютер. Одновременно через этот же порт поступают цифровые данные температуры. Компьютер в соответствии с заложенной калибровочной формулой осуществляет пересчет данных напряжения на датчике в значения концентрации метана в протекающей воде. Каждый датчик калибруется независимым образом и, следовательно, является уникальным. Согласно данным калибровки, для используемых в экспедициях датчиков, диапазон измерений концентрации метана составляет  $3 \div 500 \text{ nM}$ , а диапазон температуры  $2 \div 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Забортная насосная система состоит из насоса и системы трубопроводов. Насос располагается на главной палубе судна. Входной трубопровод одним концом погружен в забортную воду по правому борту судна при помощи груза и системы растяжек, а другой конец присоединён к входному патрубку насоса. Ввиду высокого расположения насоса над уровнем забортной воды и интенсивных колебаний входной части трубопровода при сильном волнении и высокой скорости судна, подаваемая насосом вода содержит значительное количество пузырей. Вместе с тем сравнение с данными хроматографических исследований проб воды, отобранных из выходной магистрали, и проб, взятых специальной емкостью с поверхности моря, показало, что присутствие пузырей не влияет существенно на качество измерений концентраций при помощи датчика и системы протока при не слишком малых концентрациях. Предполагается, что в случае значительного количества пузырей при малых концентрациях метана ( $\sim 3 \text{ nM}$ ), прибор выдаёт заниженные концентрации. В ходе экспедиций система отбора воды была модернизирована. Входной патрубков трубы отбора был жёстко закреплён на вертикальной стальной трубе, так что были прекращены колебания входной части трубы. Появление пузырей больше не наблюдалось. В результате отбор вод модернизированной системой производился без появления пузырей. Качество отбираемой воды больше не влияло на достоверность данных. Выходящая из насоса вода распределялась между несколькими пользователями, одним из которых является датчик метана. Вода к датчику подавалась по пластиковому шлангу 3/4». Вода проте-

кала через специальную камеру, в которой располагался чувствительный элемент датчика (детектор метана).

На основании исследований донных осадков сделаны выводы о том, что на Баренцево-Карском шельфе были широко распространены три горизонта вскрытого разреза позднечетвертичного возраста. Проведенный анализ показал, что нижний горизонт был сформирован в период последнего оледенения и представлен «диамиктоном». Горизонт ледниково-морской, является переходным и был накоплен в период дегляциации, которая стала наиболее интенсивной с момента захода атлантических вод в желоб (13.3 тыс. л. назад). С вышерасположенным горизонтом граница проводится по опесчаненному, окисленному, «сухому» прослою. В желобе установились «морские» условия, близкие к современным, начиная с 10 т.л.н. Отметим, что необходимы дополнительные исследования (например, проведение микрофаунистического анализа) для подтверждения приведенной интерпретации разреза.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Создан код (программа (код)-Box\*.exe) для анализа данных боксовых экспериментов. Сначала по зависимости изменения концентрации в изолированном от осадка боксе определяется порядок и скорость реакции потребления кислорода в гидросфере. Далее находятся порядок и скорость реакции потребления кислорода в осадке путем анализа изменения концентрации кислорода в баке, который открыт для проникновения кислорода в осадок. Входная информация (высота бака, толщина пограничного слоя, коэффициент диффузии, концентрационные зависимости в изолированном и открытом баках, точность измерения) содержится в специальном файле: \*.dat. Этот файл создается кодом опроса пользователя. Этот текстовый файл также может быть создан или может редактироваться при помощи любого текстового редактора. Файл помещается в ту же папку, что и код. В начале работы код запрашивает имя этого файла, но имя файла вводится без расширения. Если файл с аналогичным именем уже имеется в папке кода, то опроса не производится, и вся входная информация считывается из этого файла. Далее входные данные выводятся на экран, и для продолжения работы следует нажать любую клавишу.

После этого на экран выводятся результаты анализа реакции в гидросфере, для трех значений порядков:  $m=0, 1, 2$ . Выводятся порядок реакции, константа скоро-

сти реакции и приведенное значение  $\chi^2$ . Данные, отвечающие лучшему приближению, выделены рамкой. Если теперь нажать любую клавишу, то именно эти данные будут использоваться для описания реакции в гидросфере. Но пользователь может сам выбрать порядок реакции, путем перемещения рамки при помощи клавиш курсора. Далее рассчитывается процесс в «рабочем» баке. Расчеты проводятся для различных значений толщин пограничного слоя  $h=h_0*k/4$ , где  $h_0$  – толщина пограничного слоя, независимо определенная в эксперименте и задаваемая входными данными,  $k=0,1, \dots 20$ . На следующем этапе выводятся на экран приведенные значения  $\chi^2$  для различных значений  $h$  и порядков реакций в осадке  $n=0, 1, 2$ . Горизонтальная зеленая линия соответствует  $\chi^2=1$ . Вертикальная зеленая линия соответствует  $h=h_0$ . Вертикальная красная линия соответствует максимально возможному значению толщины пограничного слоя. Аппроксимационные кривые, значения порядков реакции, комплекса В (размерность  $[c]^{(1-n)/2} \text{cm/s}$ ),  $\chi^2$  и начального потока  $j_0$  ( $[c] \text{cm/s}$ ) выводятся на экран только в случае  $h=h_0$ . Все остальные результаты содержатся в выходном файле \*.out [3; 4].

Разработан специальный численный код для обработки данных и анализа измерения концентрации кислорода в рабочей и контрольной емкостях донной станции автономного океанологического комплекса. Код написан на языке программирования «Турбо Паскаль». Анализ явления основан на ранее разработанной физико-химической модели массообмена кислорода на границе дно-осадок. Сначала по зависимости изменения концентрации в изолированном от осадка контрольном баке определяется порядок и скорость реакции потребления кислорода в гидросфере. Далее определяется поток кислорода из гидросферы в осадок, а также порядок и скорость реакции потребления кислорода в осадке путем анализа изменения концентрации кислорода в баке, который открыт для проникновения кислорода в осадок. Входной информацией кода являются: высота бака, толщина пограничного слоя, коэффициент диффузии, концентрационные зависимости в изолированном и открытом баках, полученные при помощи донной станции автономного океанологического комплекса, а также точность измерения. Выходной информацией являются порядок и константы скорости химической реакции потребления кислорода в осадке, а также аппроксимирующие зависимости изменения концентрации кислорода в гидросфере. Следующим блоком выходной информации является набор данных, опи-

сывающих процесс в осадке. В частности, выводятся значения потока растворенного в воде кислорода через границу дно-осадок, а также значения констант и порядков химических реакций потребления кислорода в осадке. Предусмотрен вывод данных в численном и графическом виде на экран компьютера, а также запись данных в текстовый файл для последующего представления выходных данных при помощи стандартных графических редакторов Excel или Origin.

Специфика работы в природных условиях состоит во внешнем давлении, которое для разных модификаций комплекса может достигать 200 атмосфер. Для природных условий морского дна, как правило, характерна низкая температура порядка 4 °С. В арктических водах температура может быть отрицательной. Так, например, на дне подводного грязевого вулкана «Хаакон Мосби», в осадках которого обнаружены залежи газовых гидратов, температура составляет -1.8 °С. Для того чтобы аппаратура работала при столь низких температурах, должны использоваться соответствующие материалы, в частности используемые смазочные масла. Также необходимо тестирование работоспособности всех электронных устройств, при условиях низких температур. Для этого следует проводить лабораторные тесты в холодильных камерах. Для отработки работоспособности комплекса в ледовых условиях необходимо проводить испытания всего комплекса в реальных зимних условиях, чтобы учесть все, иногда совершенно неожиданные, особенности влияния низких и отрицательных температур как на отдельные элементы, так и на работоспособность всего комплекса в целом. В этой связи следует отметить важность создания облегченного шельфового комплекса, что связано с огромными перспективами именно шельфовых зон океана на запасы углеводородного сырья. Однако российский шельф, особенно арктический, имеет недостаточную инфраструктуру и транспортную доступность, что делает особо важным легкость, простоту и надежность используемой техники, особенно на первых этапах освоения этих акваторий. В частности, большое внимание уделяется, в последнее время, вопросам исследований повышенной эмиссии метана огромным шельфом морей восточной Арктики (морем Лаптевых, Восточно-Сибирским и Чукотским морями). Предполагается, что эмиссия метана связана с таянием вечной мерзлоты, залегающей под шельфом, что дает возможность разгружаться в воду, а затем и в атмосферу подмерзлотным залежам метана.

Эмиссия метана столь велика, что этим серьезно озабочена мировая общественность с точки зрения влияния на глобальное потепление, и в частности на потепление в Арктическом регионе. Использование разрабатываемого комплекса в этих акваториях позволило бы получать самую необходимую информацию в потоках метана через поверхность дна.

В итоге отметим, что областью применения полученных результатов, в первую очередь, являются научные исследования акваторий, связанные с процессами обмена химическими компонентами через поверхность раздела вода-осадок. Еще одна область применения – это экологические исследования, связанные с захоронением различных компонентов, загрязняющих воды (например, радиоактивные загрязнения). А также исследования, связанные с последующим процессом выхода этих загрязнений из осадка в воду. Кроме того, необходимо проведение исследований, касающихся фундаментальных вопросов о глобальном цикле углерода. Все эти исследования связаны с потребностями нефтегазового комплекса в проведении нефтепоисковых работ. Перечисленные направления являются основными «потребителями» исследований новых нетрадиционных форм углеводородсодержащего сырья – газовых гидратов, с чем связана их практическая значимость. В этой связи отметим, что запасы газовых гидратов в осадках Мирового океана могут превышать все традиционные источники нефтегазового потенциала на суше. Разработанные образцы техники и программные методы обработки результатов закладывают основу для разработки способов добычи подводных газовых гидратов. Это направление обладает инновационным потенциалом [5; 6].

### Заключение

Проведена разработка структуры и объединение в составе автономного океанологического комплекса разработанных технических и программно-методических

средств исследований. Выполнен выбор Арктического бассейна в качестве региона проведения предварительных натурных испытаний макета автономного океанологического комплекса. Проведены испытания и научные исследования углеводородных проявлений в Карском море. Впервые в мире для количественного мониторинга содержания метана в поверхностных водах использовалось непрерывное сканирование с помощью тракта измерения метана. В результате получен массив данных, достаточный, чтобы на его основе рассчитать эмиссию метана из вод Карского моря в атмосферу. Получены систематические данные по вертикальному распределению метана в водной толще различных зон Карского моря. Выявлена вертикальная структура с подповерхностным максимумом метана, что позволяет сделать заключение об определяющей роли процессов, происходящих внутри самой водной толщи, влияющих на образование, окисление и эмиссию метана из гидросферы в атмосферу.

### Список литературы

1. Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В., Поляков С.Г., Анисимов И.М., Белевитнев Я.И., Пронин А.А., Тронза С.Н. Развитие технологии комплексных инструментальных подводных наблюдений применительно к экосистемам Российской Арктики // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 679–683.
2. Iovino D., Masina S., Storto A., Cipollone A., Stepanov V. A 1/16° eddying simulation of the global NEMOv3.4 sea ice-ocean system // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. P. 2665–2684. DOI: 10.5194/gmd-9-2665-2016.
3. Лебедев К.В. Арго-Модель Исследования Глобального Океана: синтез наблюдений и численного моделирования // *Океанологические исследования*. 2017. Т. 45, № 1. С. 53–69.
4. Писарев С.В. Современные дрейфующие роботизированные устройства для контактных измерений физических характеристик арктического бассейна // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 4. С. 5–31.
5. Lebedev K.V., Tarakanov R.Yu. A model study of the wind stress influence on the interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current // *Russ. J. Earth Sci.* 2018. V. 18. P. ES2002.
6. Gavrillov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // *Geosciences*. 2020. V.10 (12). DOI: 10.3390/geosciences10120484.