

УДК 550.83+551.35+553.98 (985)

ИННОВАЦИОННЫЙ ВЕКТОР РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МОРСКОЙ ГЕОФИЗИКИ

© 2017 г. | Г.С. Казанин¹, Г.И. Иванов², А.Г. Казанин³, Е.С. Макаров¹¹ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», Мурманск, Россия; kazaning@mage.ru; makarov@mage.ru;²Московский филиал ОАО «МАГЭ» Москва, Россия; ivanov.gi@mage.ru;³Сезонная сейсмическая мелководная партия ОАО «МАГЭ», Санкт-Петербург, Россия; a.kazanin@mage.ru

INNOVATIVE VECTOR OF RUSSIAN MARINE GEOPHYSICS DEVELOPMENT

© 2017 | G.S. Kazanin¹, G.I. Ivanov², A.G. Kazanin³, E.S. Makarov¹¹JSC "Marine Arctic Geological Expedition", Murmansk, Russia; kazaning@mage.ru; makarov@mage.ru;²Moscow Office of JSC MAGE, Moscow, Russia; ivanov.gi@mage.ru;³Season Shallow Seismic Group of JSC MAGE, St. Petersburg, Russia; a.kazanin@mage.ru

Поступила 13.07.2017 г.

Принята к печати 11.09.2017 г.

Ключевые слова: Арктика; инновационные технологии; подледная сейсморазведка; многокомпонентные сейсмические исследования; транзитные зоны; сейсмика высокого и ультравысокого разрешения; инженерно-геологические изыскания.

В статье рассмотрены инновационные технологии при проведении морских геолого-разведочных работ, задающие новый вектор развития отечественной геофизики. За последние несколько лет ОАО «МАГЭ» разработало и внедрило в производство подледную сейсморазведку, многокомпонентные сейсмические исследования в транзитных зонах и геофизические работы при проведении инженерно-геологических изысканий. Впервые в мире удалось пересечь Северный полюс со всем комплексом геофизических исследований и получить новые сведения о строении центральной глубоководной части Северного Ледовитого океана благодаря использованию технологии подледной сейсморазведки. Использование технологии 4C с донными станциями обеспечивает постепенный переход к многоволновой сейсморазведке. Созданный единый технологический кластер сейсморазведочных работ на шельфе, транзитной зоне и суше с высоким качеством сейсмической записи позволяет выполнять бесшовную съемку наиболее перспективных участков шельфа России. Использование сейсмики высокого и ультравысокого разрешения для детального расчленения верхней части разреза с целью обнаружения газовых «линз» и залежей газогидратов, а также прогнозирования скоплений мелкозалегающего газа обеспечивает надежную и эффективную основу для разработки месторождений нефти и газа на шельфе.

Received 13.07.2017

Accepted for publishing 11.09.2017

Key words: the Arctic; innovative technologies; subsea seismic exploration; multicomponent seismic studies; transit zones; high and ultra high resolution seismic; engineering and geological surveys.

New technologies used in conducting offshore geological prospecting operations are considered in the article. In a way these technologies set up a "new vector" for development of the domestic geophysics. Today, when talking of competitiveness of the Russian marine geophysics, the work done by JSC "MAGE" can be named as a vivid illustration of the study conducted at a state-of-the-art scientific and methodological level in the most difficult climatic conditions of the Arctic Region. Over the past few years the company has developed and introduced innovative technologies including sub-glacial marine seismic operation, multi-component seismic surveys in transit zones and geophysical observations in the process of engineering and geological surveys. For the first time in the World history the company managed to perform the whole set of geophysical studies (refraction, reflection and CDP seismic, gravity, seismic side-scanner) across the North Pole and thus obtain new information on structure of the central deep-water part of the Arctic Ocean owing to use of sub-glacial seismic exploration technology developed by the company. Use of the 4C technology with bottom stations provides for a gradual transition to the multi-wave seismology. The integrated technological cluster of seismic operations on the sea shelf, transit zone and land with high quality of seismic recording allows for a seamless mapping of the most promising areas on the Russian shelf. Use of the high and ultra-high resolution seismic for detailed stratification of the section upper part aimed at detecting gas "lenses" and gas-hydrate pools, as well as predicting the shallow accumulations of gas in the upper part of the section, provides a reliable and effective basis for the development of oil and gas fields on the shelf.

Морская арктическая геологоразведочная экспедиция (ОАО «МАГЭ»), которая в этом году отмечает свое 45-летие, занимает особое место в истории исследования арктического шельфа России.

Ее создание в г. Мурманске в 1972 г. положило начало систематическому изучению геологии Ба-

ренцева и Карского морей, увенчавшемуся впоследствии открытием богатейшей Западно-Арктической нефтегазоносной мегапровинции.

Благодаря первым сейсмическим и гравиманитным исследованиям в 1973–1978 гг. оконтурены крупнейшие осадочные бассейны: Восточно-

GEOPHYSICAL SURVEYS

Баренцевский мегапрогиб и Южно-Карская синеклиза, определяющие и сегодня высокие перспективы региона.

В последние годы ОАО «МАГЭ» достигло значительных успехов при проведении геолого-разведочных работ на нефть и газ арктического шельфа и геолого-геофизических исследований на современном научно-методическом уровне в сложнейших климатических условиях [5, 7, 12].

В данной статье внимание сфокусировано на арктическом шельфе России и тех технологиях, которые демонстрируют инновационный вектор развития отечественной морской геофизики. Говоря о новых технологиях при выполнении геолого-геофизических исследований на арктическом шельфе России, в первую очередь необходимо выделить подледную сейсморазведку, многокомпонентные сейсмические исследования в транзитных зонах и геофизические работы при проведении инженерно-геологических изысканий.

Технология подледной сейсморазведки

Одной из наиболее важных научно-технологических и технических разработок ОАО «МАГЭ», особенно в связи с курсом на импортозамещение, стало создание и внедрение в производство технологии подледной сейсморазведки. В настоящее время, когда ведущие российские нефтегазовые компании получили лицензии на разработку месторождений на континентальном шельфе России, значительная часть которых большую часть времени покрыта льдом, данная технология обеспечит выполнение лицензионных обязательств компаниями и своевременный ввод в эксплуатацию открытых месторождений нефти и газа.

На основе разработанной в компании технологии подледной сейсморазведки удалось в сложнейших ледовых условиях центральной глубоководной части Северного Ледовитого океана выполнить пионерские комплексные геофизические исследования.

Основой подледной технологии является устройство ледовой защиты (УЛЗ) (рис. 1). При выполнении работ на акваториях, покрытых льдом, возникает необходимость в обеспечении крепления сейсмического оборудования и пневмоисточников ниже поверхности воды для исключения контакта буксируемых приборов со льдом. УЛЗ устанавливается на корме судна и позволяет зафиксировать магистраль пневмоисточников и сейсмическую косу вдоль устройства. Тем самым оно выполняет функцию защиты буксируемых приборов от плавающего на поверхности льда.

Устройство, установленное на судне, изготовлено в виде колонны обтекаемой формы с внутренней нишей, образованной боковыми стенками колонны

Рис. 1. Ледовая защита, смонтированная на корме НЭС «Академик Федоров»

Fig. 1. Ice guard mounted on the stern of SRV "Akademik Fedorov"



и основанием в виде горизонтальной платформы с креплением к днищу судна горизонтальными балками. При этом верхняя часть ледовой защиты расположена выше ватерлинии судна. Боковые стенки колонны образуют вертикальную нишу и продолжают выше места крепления ледовой защиты к корпусу судна с формированием обтекателей. При этом вертикальная ниша имеет вид продольно разделенной внутренней зоны для прокладки и закрепления буксировочных и прижимных тросов и внешней зоны для размещения кабелей сейсмического оборудования. Внутренняя зона разделена на три продольных канала, каждый из которых предназначен для размещения тросов для пневмоисточников и сейсмического оборудования, а также фиксации запасных буксировочных и/или прижимных тросов, находящихся в нерабочем положении. Три роульса предназначены для направления косы и линий пневмоисточников.

Размеры конструкции составили: высота 17,5 м, ширина подводной части 6,5 м. Общая масса конструкции 10 т. В 2015 г. на устройство ледовой защиты получен патент (см. рис. 1).

Данная научная разработка была сразу внедрена в производство и использована при выполнении государственного контракта экспедицией «Арктика-2014». Поскольку в настоящее время ни одна организация в России не способна выполнить весь объем подобных работ самостоятельно, был создан альянс квалифицированных организаций-соисполнителей, координация которых была поручена ОАО «МАГЭ» как головному предприятию, накопившему в ходе проведения работ в арктических и дальневосточных морях РФ значительный опыт успешного руководства коллективным выполнением комплексных проектов [10, 11].

Главной задачей, отличающей экспедицию «Арктика-2014» от всех предыдущих, являлось выполнение комплексных геофизических работ с целью создания геолого-геофизической основы для оценки перспектив нефтегазоносности. Экспедиция проходила под эгидой Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации и Федерального агентства по недропользованию.

Работы были проведены в июле–октябре 2014 г. В состав экспедиции входили НЭС «Академик Федоров» и НИС «Николай Трубятчинский» при поддержке атомного ледокола «Ямал». Судно «Академик Федоров» было переоборудовано для ведения подледной сейсморазведки. Сейсмические работы МОВ-ОГТ выполнялись в двух вариантах: с приемным устройством длиной 4500 м и с твердотельной косой 600 м в сочетании с зондированиями МОВ-МПВ. Расстояние между пунктами возбуждения колебаний составляло 50 м. Шаг дискретизации был равен 2 мс, а длина записи составила 12 с. Точность планово-высотной привязки пунктов физических наблюдений выдерживалась не менее ± 10 м. Глубина буксировки приемного устройства изменялась в зависимости от ледовых условий в пределах 10–15 м, достигая местами 20 м. В качестве источников возбуждения использовались группы пневмоисточников Bolt 1500 и Bolt 1900 / Bolt 8500APG объемом 21,3 л [10].

Для определения скоростных характеристик основных границ в осадочном чехле и построения скоростной модели в комплексе с работами МОВ-ОГТ были проведены инновационные сейсмические работы МОВ-МПВ. Исследования выполнялись радиотелеметрической системой сбора сейсмических данных ВОХ вместе с плавающим модулем телеметрического сейсмического комплекса ВОХ с гидрофоном MP-24L3 (GeoSpace). Шаг дискретизации составил 4 мс, расстояние между зондированиями — не более 50 км. Длина годографа была равна 15–25 км при длине записи 8–12 с [2].

Кроме того, впервые был отработан профиль глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Для выполнения сейсмических работ ГСЗ использовался модернизированный аппаратный комплекс, состоящий из самовсплывающих автономных донных сейсмических станций с многокомпонентной цифровой регистрацией сейсмического сигнала (АДГС-2М, АДСС-5000), сейсмического низкочастотного пневматического источника СИН-6 и бортовых устройств управления. Подрыв на профилях выполнялся каждые 150 с. Шаг дискретизации составлял 8 мс, длина сейсмической записи — 60 с. На волновых полях зондирований ГСЗ в первых вступлениях выделяются преломленные волны, связанные с границами в осадочном чехле и внутри коры. Зарегистрирована отраженная волна от границы М (PmP), которая начинает проследиваться с удалений 40–60 км на протяжении

почти всего профиля. Достаточно уверенный интервал прослеживания составляет 60–80 км, в отдельных случаях он достигает 100–110 км [6, 7, 9].

Для площадного изучения рельефа дна вдоль профилей были использованы многолучевой эхолот EM122 Kongsberg Maritime AS (Норвегия) и резервный однолучевой эхолот EA 600 12 кГц той же фирмы. С целью получения дополнительной информации о верхней части разреза и рельефе дна был применен профилограф TOPAS PS 18 частотой 18 кГц [1, 2, 15, 16].

Гравиметрическая съемка в рейсе осуществлялась одновременно двумя мобильными гравиметрами: «Чекан-АМ» и гравиметрическим комплексом «Шельф-Э» [10]. Перед началом работ были проведены все необходимые подготовительные мероприятия, оба гравиметра были откалиброваны. В г. Наантали (Финляндия) перед началом рейса и по его окончании были выполнены опорные гравиметрические наблюдения.

Общий объем комплексной гидрографо-геофизической съемки составил более 10000 км: МОВ-ОГТ с косой 600 м в сочетании с зондированиями МОВ-МПВ 3373,2 км; с 4500-м косой — 5596,95 км. Дополнительно было выполнено 1165,9 км съемки рельефа дна в комплексе с гравиметрической. Карта фактического материала представлена на рис. 2.

Большая часть работ проходила во льдах сплошностью 9–10 баллов и толщиной до 160 см. На некоторых профилях встречался двухлетний лед толщиной до 240 см и наблюдались торосы до 4 м. Ледокол «Ямал» обычно сначала пробивал дорогу себе, а после возвращался и прокладывал дорогу для НЭС «Академик Федоров» (рис. 3) [10].

Контроль качества данных подтвердил пригодность сейсмического материала для решения поставленных геологических задач — поверхность акустического фундамента и отражающие границы в осадочной толще прослеживаются на большей части разрезов уверенно и непрерывно. Также уверенно прослеживаются все отражающие горизонты по их классификации, принятой для восточно-арктических морей [7].

В ходе исследований впервые был выполнен непрерывный сейсмический профиль AR1407, пересекающий все основные структуры Евразийского бассейна: котловину Амундсена, хребет Гаккеля, котловину Нансена. Результаты выполненных работ позволили создать согласованную сейсмостратиграфическую модель, увязанную с данными скв. ACEX IODP-302 на хребте Ломоносова [10, 11] и учитывающую сопоставление мест выклинивания основных осадочных комплексов у поверхности акустического фундамента (АВ) с положением линейных магнитных аномалий (ЛМА), определяющих возраст фундамента.

GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 2. Схема сейсмических работ в Арктике по материалам экспедиции «Арктика-2014»

Fig. 2. Map of seismic works conducted in the Arctic Region by actual materials obtained by expedition "Arctic-2014"

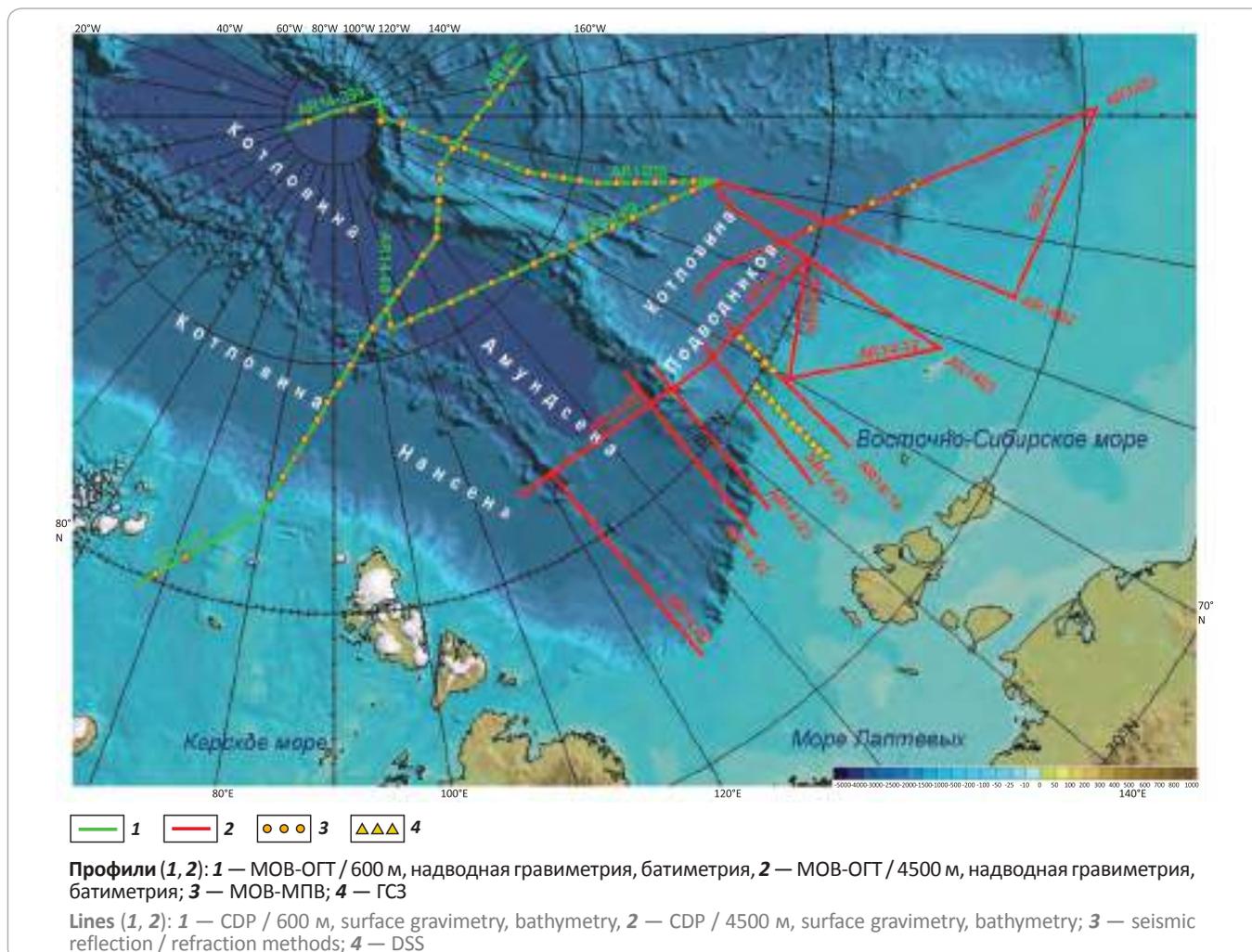
**Рис. 3.** Технология отработки профиля в сплошных ледовых полях

Fig. 3. Technology of line shooting for continuous ice fields



Полученные данные показали асимметричное строение фундамента котловин Нансена и Амундсена относительно современной оси спрединга на хребте Гаккеля. Обращает на себя внимание не только смещение к югу от оси хребта рифтовой долины хребта Гаккеля, но и отсутствие явной сопоставимости в характере сейсмической записи в котловинах Нансена и Амундсена. В то же время общая мощность осадочного чехла в котловине Нансена превышает мощность осадочного чехла котловины Амундсена по крайней мере в два раза.

Сравнительный анализ согласованных по отраженным и рефрагированным P -волнам значений интервальных скоростей одновозрастных осадочных комплексов в котловинах Амундсена и Нансена показывает определенные закономерности. Если в миоцен-четвертичном комплексе скорости практически идентичны (1,8–2,3 км/с в котловине Амундсена, 1,9–2,3 км/с в котловине Нансена), то в эоцен-

олигоцене комплекс (2,4–2,7 км/с в котловине Амундсена, 2,7–3,3 км/с в котловине Нансена) и палеоцен-эоценом комплексе (2,8–3,5 км/с в котловине Амундсена, 3,5–4,2 км/с в котловине Нансена) существенно различаются. Эти различия можно объяснить разными источниками терригенных осадков. Для котловины Нансена это классическая пассивная окраина — Баренцево-Карский шельф, континентальная окраина Евразийской литосферной плиты; для котловины Амундсена — морфоструктуры провинции Центрально-Арктических подводных поднятий. Этим же можно объяснить и существенно меньшую ($\approx 1,5$ раза) общую мощность осадочного чехла в котловине Амундсена.

Еще одним принципиально важным сейсмическим профилем для понимания эволюции Арктического бассейна стал профиль AR1401, который позволил проследить структуру осадочного чехла от шельфа Восточно-Сибирского моря до котловины Подводников. В результате анализа полученных данных, в ходе которого привлекались сейсмические материалы, полученные в экспедициях более ранних годов («Шельф-2011» и «Арктика-2012»), в пределах провинции Центрально-Арктических подводных поднятий Амеразийского бассейна было выделено семь сейсмостратиграфических комплексов.

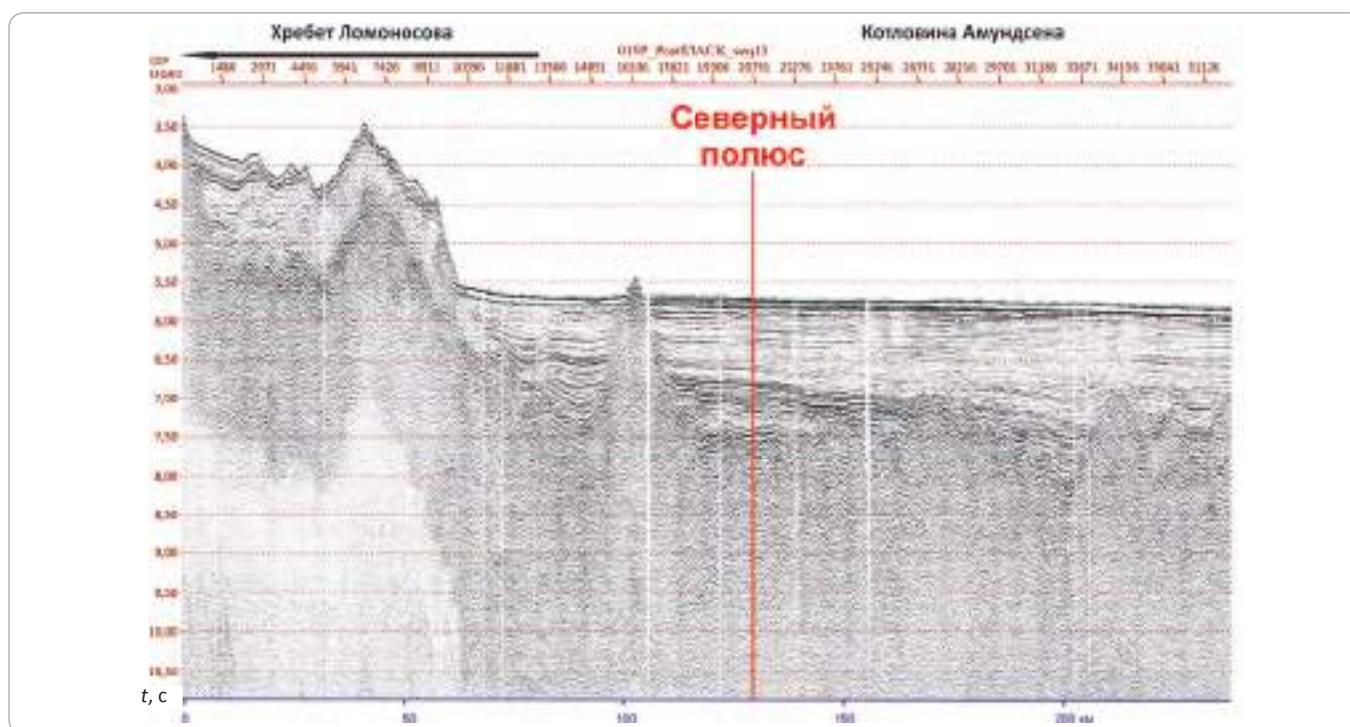
В кайнозойской части осадочного чехла сейсмические данные коррелируют с сейсмическим разре-

зом AWI-91090, калиброванным бурением скв. ACEX IODP 302 на хребте Ломоносова (профиль проходит через скважину) [9]. В соответствии с датировкой прослеженных несогласий RU и pCU, выделены два сейсмокомплекса (сверху вниз по разрезу): ССК-1 — N_1-Q (нижний миоцен–плейстоцен) и палеогеновый ССК-2 — P_1-P_2/P_3 (верхний палеоцен–средний эоцен / в котловинах олигоцен). Оба сейсмокомплекса непрерывно прослеживаются с хребта Ломоносова в котловину Подводников, прогиб Вилькицкого, на поднятие Менделеева, а также через транзитную зону на шельф Евразии.

В заключение необходимо подчеркнуть, что 10 августа 2014 г. впервые в мире в районе Северного полюса были выполнены комплексные геофизические исследования, включавшие сейсморазведку МОВ-ОГТ (при работе с косой 600 м в сочетании с зондированиями МОВ-МПВ), съемку рельефа дна и гравиметрическую съемку силами исключительно российских специалистов на основе разработанного специалистами ОАО «МАГЭ» новаторского геофизического комплекса (рис. 4) [9].

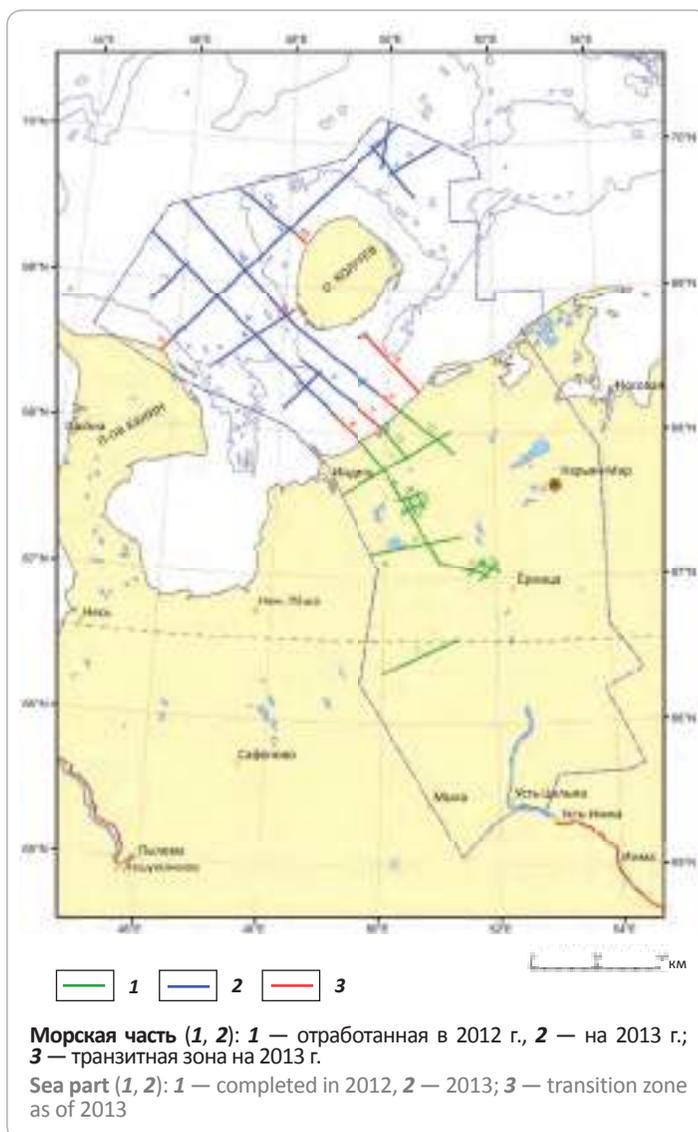
Выполненные в экспедиции комплексные геофизические исследования позволили существенно усилить аргументацию Российской Федерации при обосновании внешней границы континентального шельфа. В частности, предварительный анализ временных разрезов МОВ-ОГТ позволил увязать стра-

Рис. 4. Уникальный сейсмический разрез, проходящий через Северный полюс
Fig. 4. Unique seismic section passing across the North Pole



GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 5. Схемы расположения профилей 2D/4C, выполненных ОАО «МАГЭ» в транзитной зоне приямальской части Южно-Карского шельфа
Fig. 5. Schematic layout of the 2D/4C lines shot by JSC "MAGE" in the transition zone of the Pri-Yamal part of the South Kara shelf



тификацию осадочного чехла мелководных шельфов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и стратификацию в глубоководной котловине Подводников. Разработана генеральная концепция новой стратификации, которая будет представлена в Заявке РФ в Комиссию по континентальному шельфу. Впервые были проведены сейсмические исследования МОВ-ОГТ по прямолинейным профилям в одном из самых труднодоступных районов Арктики — котловине Макарова.

Результаты исследований позволили подтвердить ранее высказанную идею российских ученых о рифтогенной природе этой котловины. Информация о скоростях сейсмических волн в осадочном чехле,

полученная в экспедиции в результате зондирований МОВ-МПВ, дает возможность корректно построить глубинные разрезы вдоль отработанных профилей.

Многокомпонентные сейсмические исследования в транзитной мелководной зоне

В настоящее время важнейшее направление геолого-разведочных работ на шельфе — работы в транзитной мелководной зоне. Большинство таких районов остаются слабоизученными многократным МОВ-ОГТ и относятся к наиболее труднодоступным акваториям Арктики. С одной стороны, малые глубины, значительные приливы, сильные прибрежные течения и неблагоприятная гидрологическая обстановка в целом приводят к неоправданным рискам при использовании стандартных методов исследований. С другой стороны, эти районы являются стратегически значимыми объектами для увеличения ресурсной базы УВ, в первую очередь — мелководные районы Приямальского шельфа и Печорского моря, перспективные структуры на которых имеют морское продолжение и относительно доступны для их освоения с берега [3].

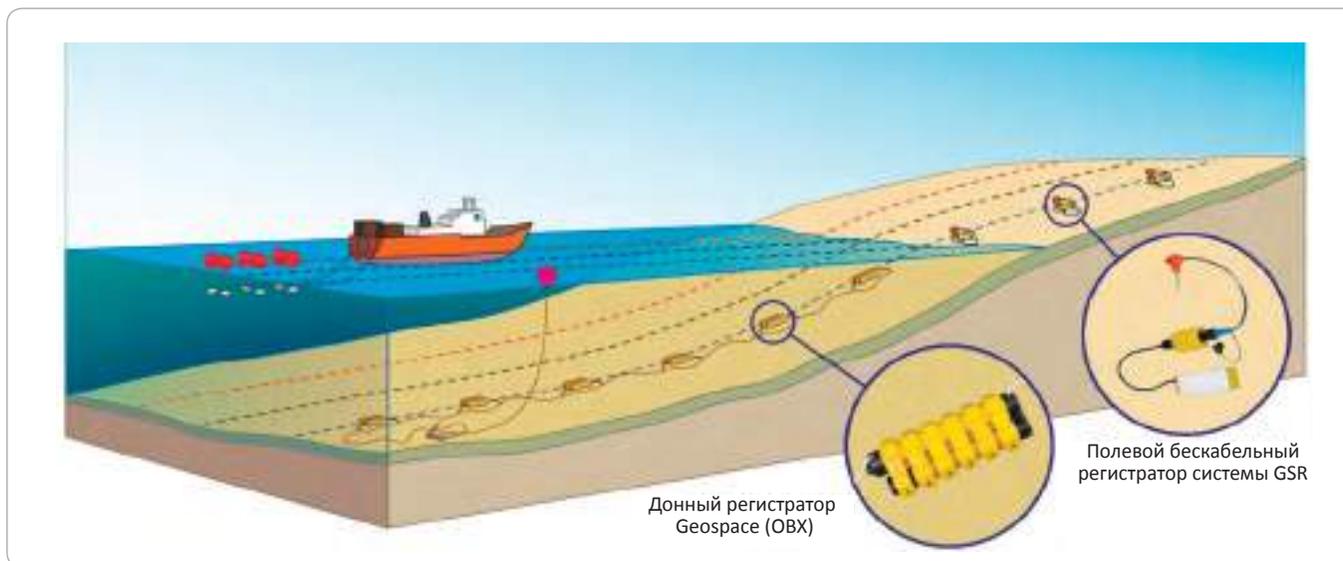
Использование многокомпонентных донных систем в сейсморазведочных работах позволяет повысить качество и информативность сейсмических разрезов. Помимо уменьшения влияния поверхностных волн на гидрофон и повышения соотношения сигнал/помеха, в донном регистраторе добавляется возможность регистрации обменных волн и применения технологий многоволновой сейсморазведки (МВС).

Учитывая 15-летний опыт работы специалистов в транзитных зонах России, была разработана технология многокомпонентной регистрации сейсмических данных в переходной зоне и на предельном мелководье арктического шельфа, позволяющая регистрировать сейсмический сигнал в диапазоне глубин 0 + 1/50 м с применением морской донной бескабельной системы автономной регистрации сейсмических волн (АДР) типа OBX Geospace производства фирмы OYO Geospace Ind. (США). В итоге создан единый технологический кластер сейсморазведочных работ на шельфе, в транзитной зоне и на суше с высоким качеством сейсмической записи [8].

В 2013–2016 гг. на арктическом шельфе в рамках четырех региональных проектов ОАО «МАГЭ» выполнено сейсморазведочные работы 2D/4C общим объемом более 1 200 км. Схема расположения профилей на обследованных полигонах представлена на рис. 5.

При работах с автономными донными регистраторами возможна реализация систем наблюдений любой конфигурации с необходимым максимальным удалением «источник – приемник», ограниченным только целевыми горизонтами и числом приборов.

Рис. 6. Технология выполнения сейсмических работ с 4-компонентными донными станциями в транзитной зоне шельфа
Fig. 6. Technology of seismic operations with 4-component bottom stations in the shelf transit zone



Появляется возможность проведения полноазимутальных сейсмических съемок.

Для работ был использован автономный донный 4-компонентный модуль (OBX) Geospace, представляющий собой цифровой регистратор с непрерывным режимом записи сигнала со встроенного гидрофона MP 18BH-1000 с частотой 1–206 Гц (шаг дискретизации 2 мс) и систему из трех ортогональных геофонов OMNI-X-LT с диапазоном регистрируемых частот от 3 до 15000 Гц (рис. 6). Принятый сейсмический сигнал в цифровой форме записывается во встроенную энергонезависимую память. Время автономной работы регистратора составляет 20 сут. Приемник снабжен инклинометром, позволяющим определять вертикальные углы наклона осей геофонов с точностью не менее $\pm 2^\circ$. Максимальная глубина погружения станции составляет 700 м, что обеспечивает универсальность ее применения. Технология полевых сейсморазведочных работ 2D/4C на арктическом шельфе подразумевает использование трех судов: судно-база, судно-расстановщик и судно-источник.

Геометрия расстановок зависит от заданного проектом шага ОГТ и номинальной проектной кратности. В данном случае шаг ОГТ составлял 25 м, шаг пикетов приема и пикетов отстрела — 50 м. Линия отстрела смещена на 50 м параллельно линии приема, поскольку на малых глубинах движение судна непосредственно по линии приема невозможно. Сейсмические наблюдения проводились по методике МОВ-ОГТ с применением комплекса центрально-симметричной и фланговой систем наблюдения. Возбуждение сейсмического сигнала выполнялось групповым пневмоисточником, рассчитанным для

транзитной зоны. Группа состояла из одной линии, включающей пять пневмопушек GI-Gun 210 общим объемом 15 л.

Навигационно-гидрографическое сопровождение работ заключалось в обеспечении судоводителя навигационной информацией при расстановке и отстреле, промерных работах, обработке навигационных данных. В результате были получены информативные сейсмические данные по четырем компонентам регистрации. Контроль качества *H*-, *Z*-компонент был проведен программами ProMAX R5000 и SeisWin QC.

Выполненные сейсморазведочные работы позволили решить поставленные геологические задачи и получить новую информацию по обменным волнам для достоверного определения литологического состава осадочного чехла.

Первые результаты, полученные при выполнении работ в транзитной зоне Печорского моря и Приямальского шельфа, показали свою эффективность и высокое качество сейсмического материала (рис. 7). На разрезах хорошо видно, что качество полевых материалов для транзитной зоны сопоставимо с результатами стандартных морских сейсмических работ с судна. Более того, результаты работ на Приямальском шельфе показали высокую степень информативности материалов как для транзитной зоны, так и сухопутных работ (рис. 8).

На основании структурных построений, выполненных по отражающим горизонтам *M*₁, *B* и *A* были построены карты мощности осадочных комплексов между этими горизонтами. На сейсмических разрезах выделены возможные ловушки, представленные

GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 7. Временной разрез по линии профиля шельф – транзитная зона (Печорское море)
Fig. 7. Time section along profile line shelf – transit zone (Pechora Sea)

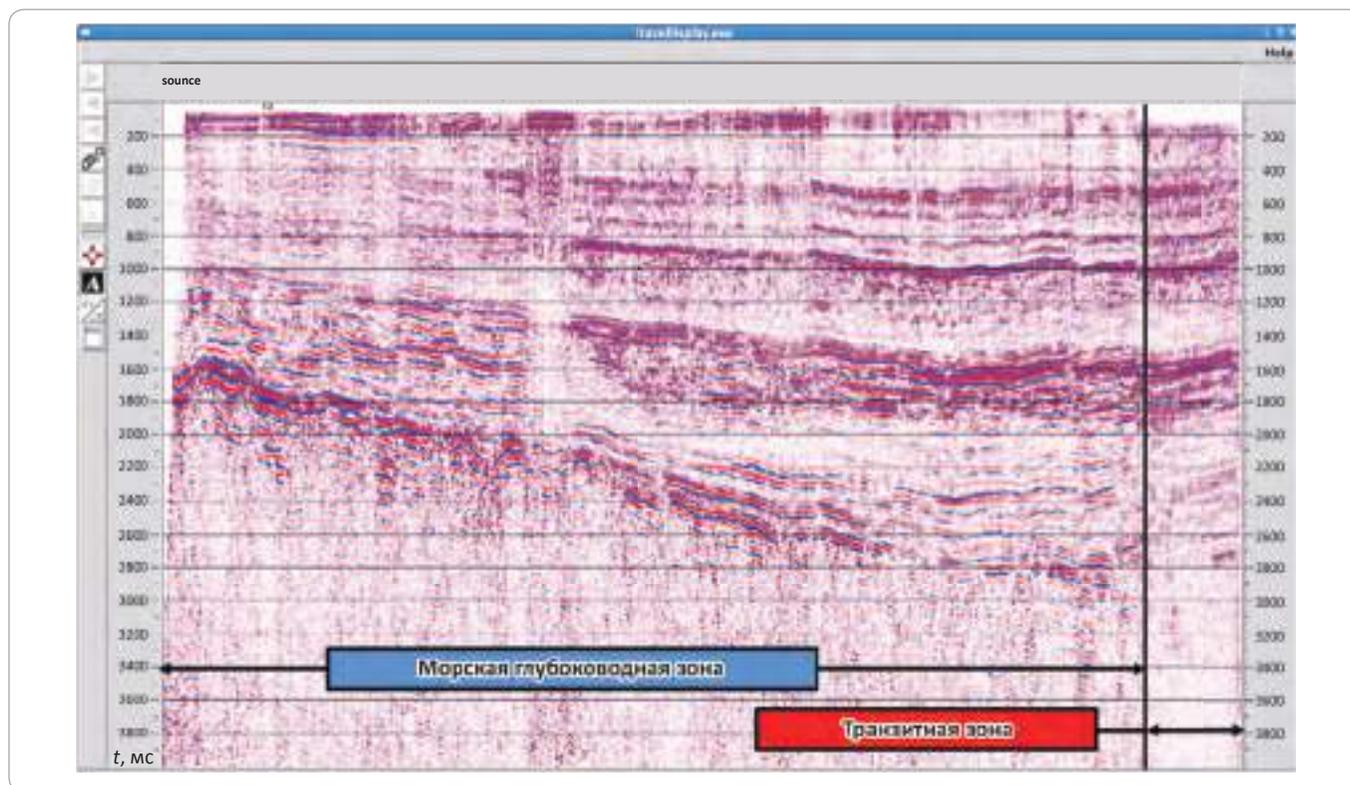
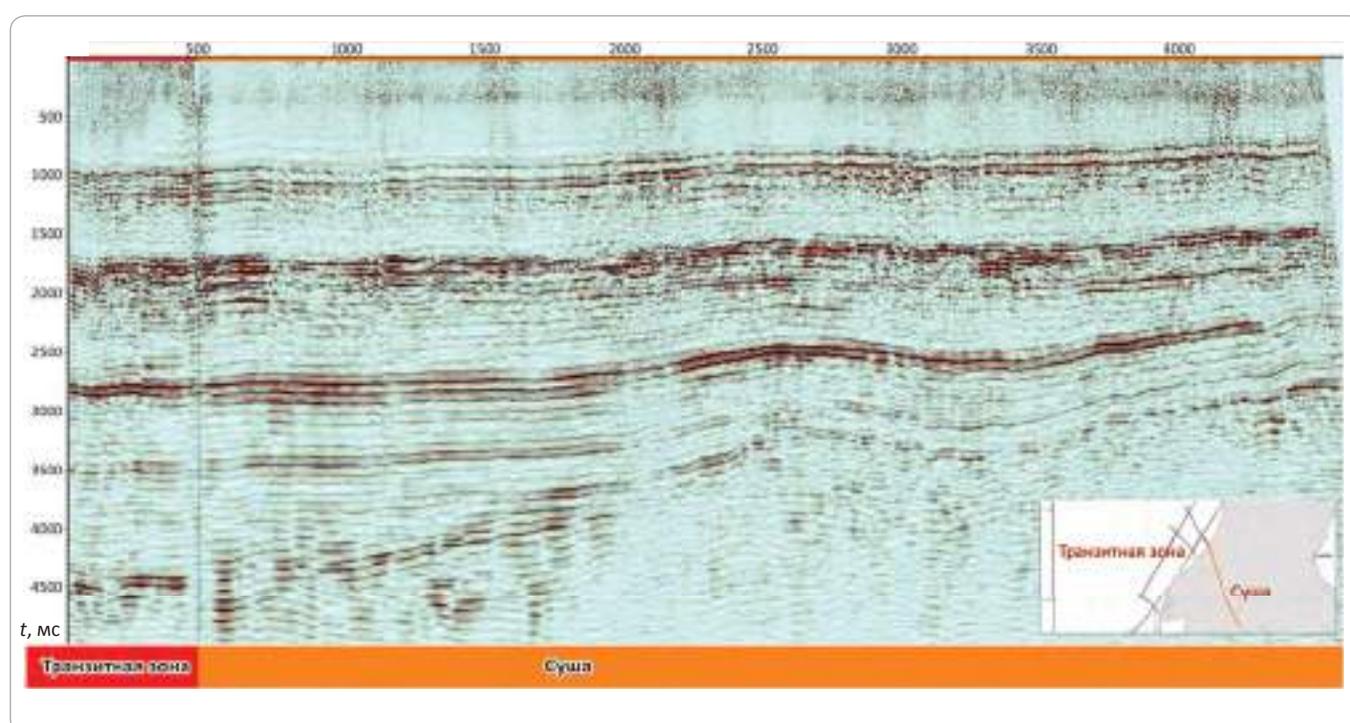


Рис. 8. Временной разрез по линии профиля транзитная зона – суша (Приямальский шельф)
Fig. 8. Time section along profile line transit zone – land (Pri-Yamal Shelf)



в основном антиклиналями, имеющими структурные (оси прогибов), тектонические (границы блоков) или стратиграфические (выклинивание) ограничения. Выполненная прогнозная оценка ресурсов по категориям D_1 и D_2 была проведена для пяти нефтегазоносных комплексов: нижнеюрского, среднеюрского, неокомского, аптского, альб-сеноманского. Прогнозные ресурсы нижнеюрского комплекса составляют 820,94 млн т усл. топлива (геологические) и 802 млн т усл. топлива (извлекаемые); среднеюрского — 2247,78 млн т усл. топлива (геологические) и 2194,53 млн т усл. топлива (извлекаемые); неокомского — 1164,97 млн т усл. топлива (геологические) и 1074,04 млн т усл. топлива (извлекаемые); аптского — 923,4 млн т усл. топлива (геологические) и 913,92 млн т усл. топлива (извлекаемые); альб-сеноманского — терригенного — 554,01 млн т усл. топлива (геологические и извлекаемые). По фазовому составу предполагаются газоконденсатные залежи пластового и пластово-сводового типов, в альб-сеноманском комплексе — газовые. Итого прогнозные ресурсы осадочного чехла составляют 5711,08 млн т усл. топлива (геологические) и 5538,49 млн т усл. топлива (извлекаемые). Сейсмическими исследованиями по юрской части осадочного чехла подтверждены ранее выявленные локальные объекты: Шкиперская, Северо-Шараповская, Нярмейская, Скуратовская и Морская, а также выявлены два новых локальных объекта: Западно-Тарминская и б/н 1.

В настоящее время, ввиду санкций и курса на импортозамещение, ОАО «МАГЭ» инициировало своими силами опытно-конструкторские работы по замене импортных гидрофонов на отечественные. В следующем году планируется провести испытания.

В итоге удалось создать единый технологический кластер сейсморазведочных работ на шельфе, транзитной зоне и суше с высоким качеством сейсмической записи. Работы, выполненные в транзитной зоне за последнее время, открывают новый этап технического развития в отрасли и делают доступным проведение многокомпонентных (4С) сейсморазведочных работ в Арктике, обеспечивая постепенный переход к многоволновой сейсморазведке.

Сейсмика высокого разрешения

Инженерно-геологические исследования являются относительно новым направлением деятельности компании. За последние годы специалистам ОАО «МАГЭ» удалось разработать современный комплекс инженерно-геологических исследований на арктическом шельфе, который востребован российскими ведущими нефтяными и газовыми компаниями — ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром». В настоящее время компания выполняет весь спектр инженерных изысканий: наряду со стандартными

методами исследований (бурением, пробоотбором, высокочастотной геоакустикой) используются сейсмика высокого разрешения и акустическая съемка ультравысокого разрешения.

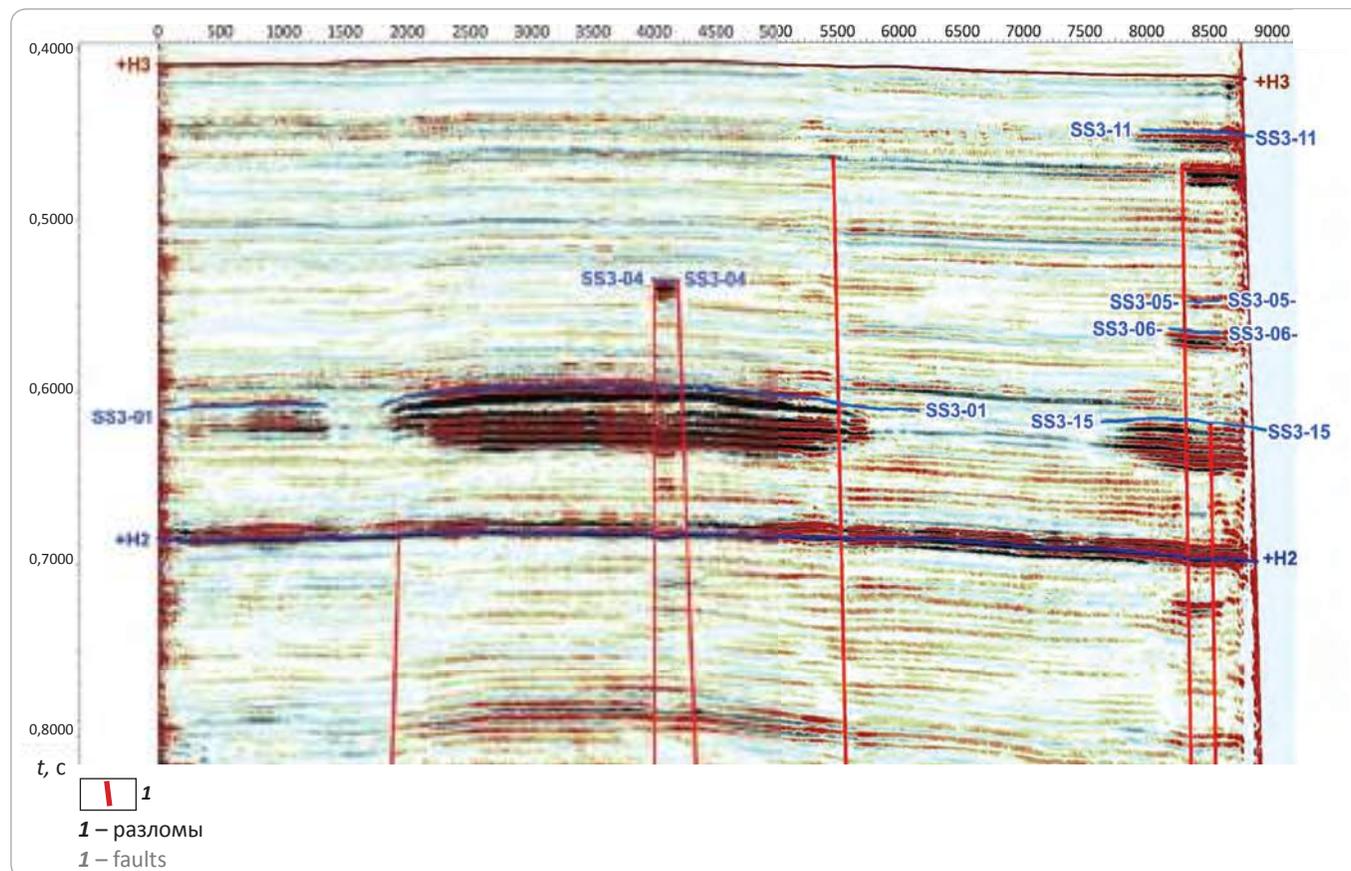
Сейсмика высокого и ультравысокого разрешения предназначена в первую очередь для детального расчленения верхней части разреза с целью обнаружения газовых «линз» и залежей газогидратов, а также прогнозирования скоплений мелкозалегающего газа в верхней части разреза [13]. Своевременное обнаружение скоплений газа является актуальной задачей при разведке и разработке месторождений УВ на шельфе. Избыточные пластовые давления, возникающие в таких газовых карманах, представляют значительные риски при строительстве скважин и размещении подводных объектов обустройства. Одной из причин пристального внимания к данной проблеме послужила авария на скв. 2 в Охотском море.

К важнейшим элементам технологии сейсмики высокого разрешения относится регистрирующая система комплекса, работающая на основе специализированной сейсмической косы. Если на первом этапе выполнения работ такого уровня применялась твердотельная голландская сейсмическая коса с шагом между датчиками 6,25 м компании Hydrosience Technologies, то в настоящее время для выполнения данного вида исследований ОАО «МАГЭ» использует современное оборудование производства отечественной компании «Си Технолоджи Инструмент» (Геленджик) с близкими параметрами. Это российская 192-канальная цифровая коса модели XZoneBottomFish с активной длиной 1200 м. Отличительной особенностью регистрирующей системы этого комплекса является уменьшенный шаг между каналами сейсмокосы (6,25 и 3,125 м), что позволяет значительно повысить детальность сейсмического разреза [4]. Стабилизация сейсмокосы на заданной глубине осуществляется при помощи компасных контроллеров глубины DigiBird 5011E. Положение сейсмокосы непрерывно выводится на дисплей управляющего контроллера DigiCOURSE в табличной и графической формах. На конце сейсмической косы установлен концевой буй PartnerPlast 800L, оборудованный проблесковым маячком, радаром-рефлектором и GNSS-приемником.

Глубина освещения разреза — около 1 км при разрешающей способности 2–5 м, в зависимости от геологического строения осадочного чехла (рис. 9). Важную роль играет экологически безопасная твердотельная конструкция заборной части приемного устройства. В качестве источника упругих колебаний используется кластер, состоящий из четырех пневмопушек G.GUN II объемом от 2,5 до 0,66 л каждая. Эти пневмоисточники являются передовыми в своем классе в результате высокой производительности в самых тяжелых условиях.

GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 9. Сейсмический разрез AVO-атрибута (произведение интерсепта и градиента), иллюстрирующий аномальные участки
 Fig. 9. AVO-attribute seismic section (intersect and gradient product), illustrating the anomalous zones



Также имеется альтернативный источник, состоящий из четырех пневмопушек SleeveGun по 0,66 л каждая. Автоматический контроль и синхронизация работы пушек осуществляются с помощью контроллера BigShot, который имеет временное разрешение 0,1 мс. Дополнительно контроллер пневмоисточников получает информацию о заглублении кластера пневмопушек. Для набивки пневмоисточников воздухом до давления 13,8 мПа используется российский компрессор высокого давления ЭК 2ВМ-5 221 Краснодарского компрессорного завода.

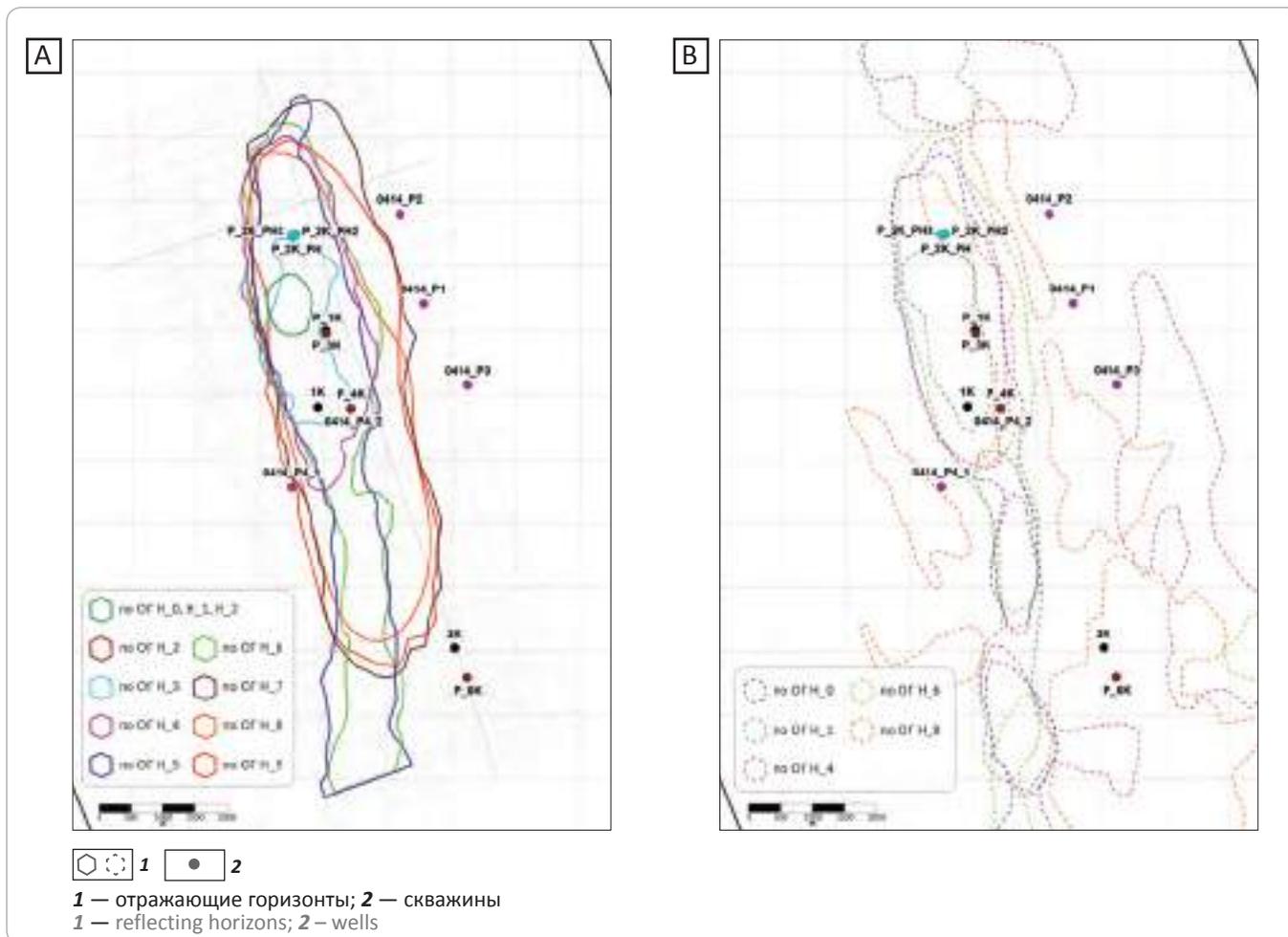
Интерпретация сейсмических данных производилась в программном пакете Kingdom Software. Для более удобного ранжирования аномальных зон в изучаемом разрезе были выделены основные отражающие горизонты. Детальный анализ сейсмических разрезов показал наличие большого числа амплитудных аномалий разной мощности и размеров в пределах выделенных сейсмических комплексов.

Впервые данная технология была применена компанией в акватории Штокмановского газоконденсатного месторождения Баренцева моря. Выполненные опытно-методические работы продемонстрировали высокую информативность и эф-

фективность технологии при обнаружении и картировании газовых линз в верхнем слое осадков.

Максимальный риск при проведении буровых работ связан с наличием на сейсмических разрезах амплитудных аномалий, предположительно приуроченных к газонасыщенным отложениям и зонам разрывных нарушений, которые, вероятно, служат каналами миграции газа вверх по разрезу. Для анализа и идентификации аномальных зон использовались следующие признаки: очень высокие амплитуды отражений (более чем в 10 раз превышающие среднее значение по латерали), высокие амплитуды отражений (более чем в 5 раз превышающие среднее значение по латерали), инверсия фаз отражений (смена полярности), «прогибание» осей синфазности под аномалией, обусловленное уменьшением значений скорости («скоростной эффект»), резкое уменьшение амплитуд по латерали, не связанное с разрывными нарушениями, поглощение высоких частот под аномалиями, высокие значения AVO-атрибута — произведение интерсепта на градиент, ослабление амплитуд под аномалией, приуроченность аномалий к ослабленным зонам (в том числе системам разломов). Совокупность всех перечисленных признаков свидетельствует о значительной загазованности от-

Рис. 10. Пример картирования областей аномально высоких амплитуд волнового поля по данным: А — 2D-съемки; В — 3D-съемки
Fig. 10. Exemplary mapping of zones with abnormally high amplitudes of the wave field: A — by 2D-survey data; B — by 3D-survey data



ложений верхней части разреза. Аномальные зоны характеризуются в основном субгоризонтальной формой по латерали, а также небольшой мощностью (см. рис. 9) [14].

Для каждого фактора было определено весовое значение. Оценка производилась по 10-балльной шкале. После ранжирования всех составляющих по совокупности вклада каждого из факторов была составлена классификация амплитудных аномалий по степени риска для бурения. Интегрированный показатель оценки степени риска определялся на основе суммы всех составляющих. В итоге была предложена следующая классификация: незначительный — 0; низкий — 1–24; средний — 25–48; высокий — 49–72.

Результаты картирования областей аномально высоких амплитуд волнового поля по данным 2D и 3D-съемки приведены на рис. 10 [14]. По результатам оконтуривания всех высокоамплитудных участков строится сводная карта рисков [14], на которой цветовая гамма соответствует степени риска при

проведении буровых работ. Анализ приведенных сейсмических данных позволяет выявить основные геолого-геофизические факторы, определяющие условия бурения верхнего интервала и строительства проектной скважины.

Выделенные зоны амплитудных аномалий имеют разную форму, мощность и распространение. Результаты работ на лицензионных участках ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть» в Охотском и Карском морях с использованием технологии сейсмоки высокого разрешения показывают ее высокую эффективность и информативность для детального расчленения верхней части разреза с целью обнаружения газовых линз и залежей газогидратов.

По данным высокоразрешающей сейсморазведки наблюдается загазованность разреза, проявляющаяся аномалиями повышенных амплитуд. Выделенные зоны характеризуются рядом признаков, идентифицирующих их с газонасыщенными отложениями, которые, в свою очередь, указывают на

GEOPHYSICAL SURVEYS

вероятность наличия в разрезе зон высоких давлений. Таким образом, для более безопасного бурения верхнего ствола скважины при выборе проектных координат расположения буровой платформы рекомендуется исключить участки с разрывными нарушениями, а также минимизировать число контактов с аномальными зонами повышенных амплитуд по вертикали в точке бурения.

Заключение

ОАО «МАГЭ» за последние несколько лет разработало и внедрило в производство новые технологии проведения морских геолого-разведочных работ. Впервые в мире удалось пересечь Северный полюс со всем комплексом геофизических исследований (сейсмика МОВ-ОГТ, МОВ-МПВ, гравиразведка, локация бокового обзора) и получить новые сведения о строении центральной глубоководной части Север-

ного Ледовитого океана благодаря использованию технологии подледной сейсморазведки.

Использование технологии 4С с донными станциями обеспечивает постепенный переход к многоволновой сейсморазведке. Созданный единый технологический кластер сейсморазведочных работ на шельфе, транзитной зоне и суше с высоким качеством сейсмической записи позволяет выполнять бесшовную съемку наиболее перспективных участков шельфа России.

Использование сейсмики высокого и ультра-высокого разрешения для детального расчленения верхней части разреза с целью обнаружения газовых «линз» и залежей газогидратов, а также прогнозирования скоплений мелкозалегающего газа в верхней части разреза обеспечивает надежную и эффективную основу для разработки месторождений нефти и газа на шельфе.

Литература / References

1. Алексеев С.П., Зеньков А.Ф., Курсин С.Б., Ставров К.Г. Батиметрические исследования ОАО «ГНИНГИ» в центральной части Арктики // Навигация и гидрография. – 2010. – № 30. – С. 9–17.
Alekseev S.P., Zenkov A.F., Kursin S.B., Stavrov K.G. Bathymetric studies performed by ОАО "GNINGI" in the central part of the Arctic region. Navigatsiya i gidrografiya. 2010;(30):9–17.
2. Алексеев С.П., Глумов И.Ф., Ледовских А.А. Гидрографические исследования в Центральном Арктическом бассейне на надводном судне в интересах обоснования внешней границы континентального шельфа России // Тр. Научной конференции XIV Съезда Российского географического общества (11–14 декабря 2010 г., Санкт-Петербург). – СПб. : Изд-во РГО, 2010. – С. 101–110.
Alekseev S.P., Glumov I.F., Ledovskikh A.A. et al. Hydrographic studies in the Central Arctic basin using a surface ship with the aim to justify the outer limit of the continental shelf of Russia. Tr. Nauchnoy konferentsii XIV Siezda Rossiyskogo geograficheskogo obshchestva (December 11–14, 2010, St. Petersburg). St. Petersburg: RGO; 2010. pp. 101–110.
3. Верба М.Л., Герман Е.В., Григоренко Ю.Н., Зинченко А.Г. Транзитные зоны акваторий России. – СПб. : Недра, 2005. – 140 с.
Verba M.L., German E.V., Grigorenko Yu.N., Zinchenko A.G. Transit zones in Russian offshore areas. St. Petersburg: Nedra; 2005. 140 p.
4. Запорожец Б.В., Крутов А.Л., Леонтьев И.В. Технологии сейсморазведочных работ в зонах мелководья с оборудованием XZone // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2015. – № 1. – С. 63–67.
Zaporozhetz B.V., Krutov A.L., Leontiev I.V. Technologies of seismic operations in shallow zones with the XZone equipment. Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki. 2015;(1):63–67.
5. Иванов Г.И. Морская геофизика на самом современном уровне // Нефть. Газ. Новации. – 2014. – Т. 180. – № 1. – С. 28–30.
Ivanov G.I. State-of-the art marine geophysics. Neft. Gaz. Novatsii. 2014;180(1):28–30.
6. Казанин Г.С., Заяц И.В., Макаров Е.С., Кацанюк В.А., Васильев А.И., Кузнецов А.В., Кадыш Т.И., Журавлев В.А., Павлов С.П., Черников С.Ф., Дьяченко А.Б., Кириллова-Покровская Т.А. Геофизические исследования ОАО «МАГЭ» в Северном Ледовитом океане на хребте Ломоносова // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. – Вып. 3. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 19–30.
Kazanin G.S., Zayatz I.V., Makarov E.S., Kacanyuk V.A., Vasilyev A.I., Kuznecov A.V., Kadysh T.I., Zhuravlev V.A., Pavlov S.P., Chernikov S.F., Dyachenko A.B., Kirillova-Pokrovskaya T.A. Geophysical studies performed by JSC "MAGE" in the Arctic Ocean at the Lomonosov Ridge. Geologiya i geoekologiya kontinentalnykh okrain Evrazii. Moscow: GEOS; 2011. Issue 3. pp. 19–30.
7. Казанин Г.С., Иванов Г.И. Инновационные технологии — основа стабильного развития ОАО «МАГЭ» // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 4. – С. 3–7.
Kazanin G.S., Ivanov G.I. Innovative technologies are the basis for a stable development of JSC "MAGE". Razvedka i okhrana nedr. 2014;(4):3–7.
8. Казанин Г.С., Нечхаев С.А., Щедров В.А., Зимовский А.В. Многокомпонентные морские сейсмические исследования на арктическом шельфе на базе технологии GEOSPACE // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 4. – С. 40–44.
Kazanin G.S., Nechkhaev S.A., Shchedrov V.A., Zimovskiy A.V. Multi-component marine seismic surveys on the Arctic shelf based on GEOSPACE technology. Razvedka i okhrana nedr. 2014;(4):40–44.

9. Казанин Г.С., Макаров А.С., Васильев А.С., Прудников А.Н., Иванов Г.И. Инновационная технология подледной сейсморазведки // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – Т. 193. – № 2. – С. 21–24.
Kazanin G.S., Makarov A.S., Vasiliev A.S., Prudnikov A.N., Ivanov G.I. Innovative technology of under-ice seismic survey. Neft. Gaz. Novatsii. 2015;(2):21–24.
10. Казанин Г.С., Иванов Г.И., Макаров Е.С. Комплексная геофизическая экспедиция к Северному полюсу — «Арктика-2014» // Научно-технические проблемы освоения Арктики. – М. : Изд-во РАН, 2015. – С. 162–165.
Kazanin G.S., Ivanov G.I., Makarov E.S. Integrated geophysical expedition to the North Pole — "Arctic-2014". Nauchno-tekhnicheskie problemy osvoeniya Arktiki. Moscow: RAN; 2015. pp. 162–165.
11. Казанин Г.С., Заяц И.В., Иванов Г.И., Макаров Е.С., Васильев А.С. Геофизические исследования в районе Северного полюса // Океанология. – 2016. – Т. 56. – № 2. – С. 333–335.
Kazanin G.S., Zayatz I.V., Ivanov G.I., Makarov E.S., Vasiliev A.S. Geophysical studies in the North Pole region. Okeanologiya. 2016;56(2):333–335.
12. Казанин Г.С., Иванов Г.И., Заяц И.В., Казанин А.Г., Макаров Е.С., Шкарубо С.И., Павлов С.П., Нечхаев С.А. Инновационные технологии ОАО «МАГЭ» — потенциал для укрепления МСБ арктического шельфа России // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 9. – С. 56–64.
Kazanin G.S., Ivanov G.I., Zayatz I.V., Kazanin A.G., Makarov E.S., Shkarubo S.I., Pavlov S.P., Nchkhayev S.A. Innovative technologies of JSC "MAGE" as a potential for increasing mineral resource base of the Arctic shelf of Russia. Razvedka i okhrana nedr. 2016;(9):56–64.
13. Казанин А.Г., Казанин Г.С., Иванов Г.И., Саркисян М.В. Инновационные инженерно-геологические технологии на арктическом шельфе России [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. – 2017. – № 1. – С. 120–124. – Режим доступа: http://magazine.neftegaz.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=9&action=issue&issue=85 (дата обращения: 08.06.2017).
Kazanin A.G., Kazanin G.S., Ivanov G.I., Sarkisyan M.V. Innovative engineering-geological technologies used in the Arctic shelf of Russia. Neftegaz.RU. 2017;(1):120–124. – Available at: http://magazine.neftegaz.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=9&action=issue&issue=85 (accessed 08.06.2017).
14. Курносова О.М., Яковлев И.В., Зиновкин С.В. Прогнозирование скоплений мелкозалегающего газа в верхней части разреза на месторождениях Киринского ЛУ // Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ROOGD-2014): тезисы докладов V Международной конференции (20–30 октября, 2014 г.). – М. : Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – С. 34–36.
Kurnosova O.M., Yakovlev I.V., Zinovkin S.V. Prediction of shallow gas accumulations in the upper part of the section for the Kirinsk LB fields. Osvoenie resursov nefti i gaza rossiyskogo shelfa: Arktika i Dalniy Vostok (ROOGD-2014): tezisy dokladov V Mezhdunarodnoy konferentsii (20–30 October 2014). Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2014. pp. 34–36.
15. Шкатов М.Ю., Иванов Г.И. Первая российская скважина на дне Северного Ледовитого океана // Океанология. – 2013. – Т. 53. – № 4. – С. 569–572.
Shkatov M.Yu., Ivanov G.I. The first Russian well on the bottom of the Arctic Ocean. Okeanologiya. 2013;53(4):569–572.
16. Glumov I.F., Zenkov A.F., Zhilin D.M. A challenge in the Arctic. Bathymetric survey for delineation of the extended continental shelf of the Russian Federation. *Hydro international*. 2012;(1):27–30.