

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-347-362

BOTTOM SEISMIC OBSERVATIONS AT SEA. PROBLEMS AND SOLUTIONS

D. A. Ilyinsky^{1,2}, O. Yu. Ganzha¹, A. A. Korneev²

¹ — P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² — Geovendor LLC, Moscow, Russian Federation

The seismic seabed observations, the current state of the issue and the ways of development of bottom seismic using robotic tools are considered in the paper. An overview of the current types of bottom seismic surveys and their division into two main types — deep-water and shallow-water works and works in land-sea transition zones (transit zones) is given. The main current technologies used in both sectors of the bottom works market are discussed. The bottlenecks and problems of each of the types of technologies used are considered. The technology of self-popup seismic nodes for use in deep and shallow water is presented in detail. The advantage of using this technology for the bottom part of hybrid marine seismic surveys in deep water is shown. Several variants of the prospects for the development of self-popup technology in deep water are presented. Among them, a new direction of seabed seismic exploration in deep water has been analyzed in detail. It consists in the design and use of a large number of Autonomous Underwater Vehicles (AUV), each of which is complemented by the ability to receive and record seismic bottom data. A new technology of robotic surveys based on the use of self-popup nodes without leaving anchor on the seabed and an unmanned autonomous surface vessel-platform has been proposed for the shallow-water sector. The model of the self-popup node without leaving the anchor on the seabed has been tested. An effective way of automatically node deployment to the seabed has been found and tested. Marine tests of the emersion of the proposed model of a self-popup seismic node without anchor using compressed air technology have been carried out. The problems of the proposed model are identified. After that a stable modified version of its emersion under all weather conditions has been found.

Keywords: seabed seismic observations, self-popup seismic nodes, unmanned robotic platform.

For citation:

Ilyinsky, Dmitry A., Oleg Yu. Ganzha, and Anton A. Korneev. "Bottom seismic observations at sea. Problems and solutions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 347–362. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-347-362.

УДК 550.834.08

ДОННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА МОРЕ: ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Д. А. Ильинский^{1,2}, О. Ю. Ганжа¹, А. А. Корнеев²

¹ — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П. П. Shirshova Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

² — ООО «Геовендор», Москва, Российская Федерация

Статья посвящена сейсмическим донным наблюдениям на море, текущему состоянию данного вопроса и путям развития донной сейсморазведки с применением роботизированных средств. Выполнен обзор текущих видов донных сейсмических съемок и их подразделение на два основных вида: глубоководные работы и работы на мелкой воде и в переходных зонах суша – море (транзитных зонах). Показаны основные применяемые технологии донных работ и рассмотрены проблемы каждой из них. Подробно представлена технология работы с самовсплывающими станциями для применения на глубокой и мелкой воде. Показано преимущество применения этой технологии для донной части гибридных съемок на глубокой воде. Представлено несколько вариантов перспективы развития самовсплывающей станции на глубокой воде. Подробно проанализировано новое направление донной сейсморазведки на глубокой воде, состоящее в создании и применении большого количества автономных подводных дронов, каждый из которых дополнен возможностью приема и записи на дне сейсмических донных наблюдений. Для мелководного сектора донной сейсморазведки предложена

новая технология роботизированных съемок на основе использования безэкипажного судна-носителя самовсплывающих станций и автоматизированных самовсплывающих донных станций, работающих без оставления груза на дне. Проведены реальные морские испытания модели донной самовсплывающей станции без оставления груза на дне. Найден и испытан эффективный способ автоматической постановки станций на дно. Проведены морские испытания всплытия предложенной модели с использованием технологии сжатого воздуха. Выявлены проблемы предложенной модели и найден устойчивый модифицированный вариант ее всплытия при любых погодных условиях.

Ключевые слова: донные сейсмические наблюдения, самовсплывающая донная станция, беспилотная роботизированная платформа.

Для цитирования:

Ильинский Д. А. Донные сейсмические наблюдения на море: проблемы и методы их решения / Д. А. Ильинский, О. Ю. Ганжа, А. А. Корнеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 347–362. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-347-362.

Введение (Introduction)

Морские донные сейсмические наблюдения с каждым годом занимают все большее место в общем объеме морской сейсморазведки. Это связано не только с освоением месторождений в транзитных зонах, но и расположенных на больших глубинах, достигающих до 3 км и более. Причиной этого являются фундаментальные геофизические преимущества донной съемки по сравнению с технологией буксируемых кос гидрофонов [1], [2]. Недропользователям с каждым годом необходима все более точная и качественная информация о строении подземных недр в море и положении искоемых залежей углеводородов (УВ). Донные наблюдения также помогают решать фундаментальные вопросы происхождения и образования УВ[1].

Существующие технологии донной сейсморазведки, несмотря на их прогрессивное развитие, требуют значительных трудозатрат и постоянного присутствия большого количества высокопрофессиональных специалистов, что предполагает помимо выплаты им заработной платы создание комфортной инфраструктуры для работы и проживания, а также ужесточает требования по безопасности, устанавливая необходимость периодической смены сейсмической партии. В результате размер судов, а, следовательно, и стоимость работ растут. Поэтому приоритетным направлением является развитие роботизированных технологий, требующих минимального количества людей на исследовательских судах.

Традиционно донные сейсмические съемки подразделяются на *глубоководные* с глубиной воды более 500 м, *мелководные* и *транзитные* (переходные зоны суша – море). Это связано с наиболее распространенной технологией их проведения — *технологией буксируемых кос*, состоящих из групп соединенных между собой отдельных гидрофонов, образующих один сейсмический канал. При отсутствии возможности применения буксируемых кос в промышленности были вынуждены использовать различные донные технологии регистрации сейсмических сигналов: от донных кос (вариант тех же буксируемых кос, но изготовленных в донном подводном варианте) до отдельных автономных донных станций.

В настоящее время технологии использования донных регистраторов занимают все больше места в общем объеме сейсморазведочных работ на мелководье. Это связано, прежде всего, с простотой их использования и надежностью работы электроники и датчиков, легкой масштабируемостью, которая позволяет использовать данную технологию для одновременной регистрации очень большого количества приемных каналов. Более того, популярность автономной регистрации привела к возможности использования ее на суше, где конструкция каждого автономного модуля еще проще и дешевле, а количество каналов технически ничем не ограничено.

В последние двадцать лет появился новый вид донных наблюдений, так называемые *гибридные съемки*, когда вместе с буксируемыми косами используются одновременно расставленные на дне донные сейсмические станции в варианте 2Д [2] и 3Д [3] сейсмических съемок. Целью таких донных наблюдений является получение детальной глубинной скоростной модели среды,

используемой при последующей обработке данных, полученных с буксируемых кос для улучшения качества сейсмического изображений, особенно в трудных местах и на больших глубинах. Кроме того, скоростные разрезы в продольных и поперечных волнах имеют также самостоятельную ценность для геологической интерпретации. При этом используется *метод полноволновой инверсии* для получения скоростного разреза, который служит для улучшения изображения, полученного по данным многокосовой съемки. Результатом гибридной съемки может быть ясное изображение подсоевых структур, как это показано при стрельбе многокосового судна на сетке 50×100 м [3] в Мексиканском заливе.

Прототипом гибридной съемки является отечественный способ наблюдений отраженных и преломленных волн одновременно, впервые примененный в Прикаспийской впадине. Геологической задача состояла в поиске в подсоевом разрезе карбонатных тел сравнительно небольших размеров, перспективных для поиска нефти и газа. При невысокой пластовой скорости подсоевого комплекса пород, составляющей около 4,0 км/с, можно было предположить, что в исследуемом районе он представлен в основном терригенными отложениями. Скоростные модели, полученные по данным отраженных и преломленных волн, были использованы для построения глубинных изображений на основе данных МОВОГТ (метод отраженных волн общей глубинной точки) [4].

Целью статьи является обоснование эффективности использования технологии самовсплывания на основе анализа современного опыта донных сейсмических работ и его перспектив развития для морских сейсмических донных работ. Предложена новая технология роботизированных съемок на основе использования безэкипажного судна-носителя самовсплывающих станций и автоматизированных самовсплывающих донных станций, работающих без оставления груза на дне. На основе выполненного исследования были проведены реальные морские испытания модели донной самовсплывающей станции без оставления груза на дне.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первый опыт применения глубоководных донных технологий. Донные сейсмические работы на глубокой воде начинались с применения самовсплывающих сейсмических донных станций. По этой технологии сейсмические донные станции в свободном падении погружаются на дно, а затем после выполнения программы записи данных вызываются по гидроакустическому каналу на всплытие с обслуживающего судна. Каждая станция имеет уникальный код всплытия, позволяющий контролировать этот процесс и сбор информации о всплытии станций с поверхности моря. Именно с помощью данной технологии была выполнена первая в мире трехмерная глубоководная съемка в 2001 г. на месторождении *Tunder Horse* в Мексиканском заливе [5] компанией *GeoPro GmbH* по заказу *British Petroleum*. В то время еще не были решены две основные проблемы самовсплывающей технологии: первая проблема — точность попадания станции в запланированную точку на дне (при глубине 3 км современные тендеры на проведение донных сейсмических съемок требуют попадания станции в круг диаметром 25 м), вторая проблема, связанная с экологией: самовсплывающая станция оставляет на дне якорь-груз. Согласно требованиям экологов, после проведения сейсмической донной съемки дно моря должно оставаться нетронутым. Данное требование остается актуальным несмотря на то, что после аварии на нефтяной платформе *Deepwater Horizon* на месторождении *Макондо* в 2010 г. в Мексиканский залив вылилось около 5 млн баррелей нефти и образовавшееся в результате этого нефтяное пятно достигло площади 75 тыс. км², что составляет около 5 % площади Мексиканского залива.

Донные съемки с помощью управляемых подводных роботов. Важным этапом в развитии сейсмических донных технологий на морском дне, ставшим в последующие два десятилетия ее основным трендом, являлось применение глубоководных дистанционно управляемых роботов (ROV). Схема работ с применением роботов представлена на рис. 1, в левой части которого показано судно-носитель источника сейсмических сигналов, справа — судно, обслуживающее донные станции с двумя подводными роботами-установщиками [6]. Аппараты ROV были разработаны в 1970-х гг. для работы в условиях экстремальных давлений и низких температур. Кроме того,

подводный ROV имеет в своем составе контейнер, в котором расположены донные станции в количестве 30–40 шт. в зависимости от вида ROV.

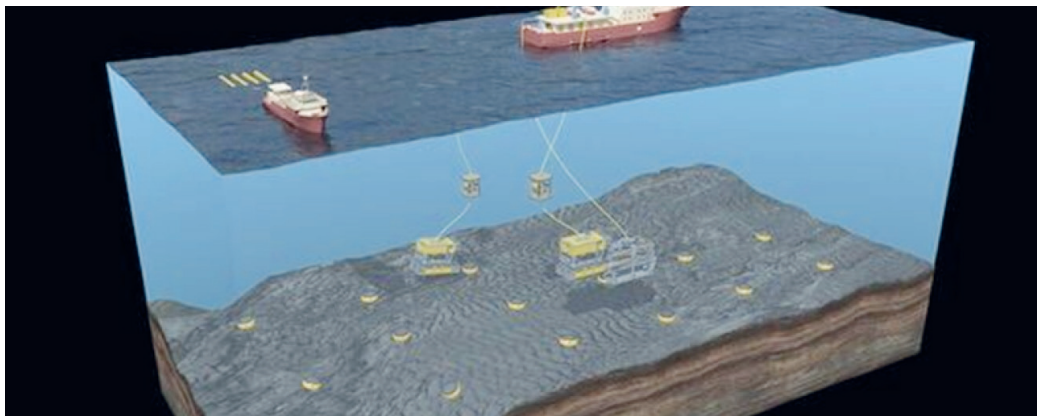


Рис. 1. Современная технология установки / снятия донных сейсмических станций с помощью двух подводных роботов для ускорения процесса сейсмической съемки [6])

Fig. 1. Modern technology of installation/removal of seabed seismic stations using two underwater robots to speed up the seismic survey process [6]

Подводный робот имеет гидроакустическую систему позиционирования относительно несущего судна с точностью определения положения, равной 1 промилле (0,001) от наклонной дальности до ROV со станциями. Впервые такая система сейсмической съемки была применена компанией *Fairfield* по заказу *British Petroleum* в 2006 г. на месторождении *Atlantis* в Мексиканском заливе [7] на глубине 2200 м. Процесс постановки станций на дно, а также их подъема при общем количестве станций в одной постановке порядка 1000 шт. занимает значительное время и требует больших материальных затрат. Для сравнения стоимость съемки с применением донных самовсплывающих сейсмических станций в 8 раз меньше при тех же параметрах съемки.

Прогресс самовсплывающей технологии. С целью преодоления экологических ограничений в 2012–2014 гг. российская компания «Геонод разведка» создала новое поколение донных сейсмических станций, имеющих ряд уникальных свойств, одним из которых является создание экологически чистого якоря-груза, который распадается на составляющие морского дна после проведения геофизических работ, не нанося вреда окружающей среде [8]. Было получено два российских патента на состав якоря и его конфигурацию. Компании удалось создать парк станций и выполнить с ним ряд проектов как в Российской Федерации, так и за рубежом [9]–[11]. Другое решение этой проблемы рассмотрено далее в при исследовании технологий самовсплывающих станций для мелководья в транзитных зонах, а именно рассмотрена конструкция станций без груза на основе двух известных технологий подъема затонувших объектов со дна моря.

Проблема точной постановки станций на дно. Изучение проблемы точной установки донных станций на дно и ее влияния на качество получаемого сейсмического изображения не были изучены с помощью использования математического моделирования даже в упрощенной постановке. Математическое моделирование было проведено только в целях изучения влияния на результат плотности установки донных станций на регулярной сетке перед проведением пионерской 3Д-донной съемки в 2006 г. [12]. Для трехмерного моделирования использовалось простое волновое уравнение, что справедливо для модели жидких слоев со скоростями продольных волн как в донных осадках, но без поперечных волн. Такой подход может быть применен к реальным донным сейсмическим данным, когда полученные записи с помощью хорошо разработанных современных процедур очищены от всех поперечных и обменных волн. Такие очищенные синтетические данные для ожидаемой модели среды (с соляным куполом) были рассчитаны для каждой точки приема (сейсмограммы общей точки приема) при различных регулярных расстояниях между донными станциями. После этого полученные данные обрабатывались по выбранному

графу, в результате чего получался итоговый куб изображения среды для каждого интервала расстановки станций на дне. По результатам сравнения полученных синтетических изображений с исходной моделью был выбран оптимальный интервал расстановки донных станций на дне — донные станции должны были находиться на регулярной сетке с интервалом 450 м между станциями в обоих горизонтальных направлениях.

Аналогичное моделирование необходимо осуществить для исследования влияния отклонения реального положения станций на дне. Например, рассмотрим экспериментальные данные отклонений донного положения станций от поверхностного в месте сброса, при проведении сейсмических съемок в условиях свободного падения станций на дно. Возможно, что даже большие отклонения станций, вплоть до половины заданного регулярного интервала установки станций, не окажут никакого влияния на итоговое качество восстановленного синтетического изображения. В результате проведенного исследования будут выработаны статистические критерии допустимости для таких отклонений. Значительным препятствием на пути реализации подобного проекта является большой объем вычислений. Выполнение трехмерной задачи для решения волнового уравнения методом конечных разностей для 10 000 излучений на кластере производительностью 10 Терафлоп потребовало двадцати дней [13]. Для сокращения времени выполнения этой задачи можно воспользоваться разумными упрощениями модели, которые значительно сокращают время вычислений, не оказывая влияния на результат исследования нерегулярности интервалов постановки станций на дне. Например, использовать осесимметричную модель соли и примыкающих к ней слоев, а также гибридную схему вычислений — конечно-разностную схему в окрестности солевого тела, «сшивая» затем это решение с более простым для плоскопараллельных слоев, окружающих соль. При таком подходе можно использовать также полную систему уравнений теории упругости и получать более реалистичные волновые поля, попутно проверяя и тестируя процедуры очистки записей от поперечных и обменных волн.

4Д-донные съемки. Существует еще одна разновидность донной съемки, где особенно важной является точность установки донных регистраторов на дно — **4Д-сейсмические съемки** или повторные 3Д-съемки через определенный интервал времени для мониторинга добычи углеводородов. Разность трехмерных изображений в разные моменты времени одного и того же места образует так называемый **4Д-сигнал**, позволяя следить за выработкой месторождения. Поскольку 4Д-сигнал достаточно мал, точное повторение условий получения данных может гарантировать положительный результат.

«Веревочная» технология донной съемки. Проблема относительной неточности достижения донной станцией на дне заранее запланированной точки (*preplot*), согласно плану проведения сейсмической съемки, актуальна не только для самовсплывающих станций, но и при использовании технологий постановки станции на дно с помощью прочного фала или троса. Этот способ проведения работ впервые был предложен компанией *Fairfield* после проведения пилотного проекта с донными станциями, устанавливаемыми на дно подводными роботами. Стоимость первой съемки с *ROV* была столь велика, что компания начала искать другие способы постановки станций на дно. При работе с «веревочной» технологией сначала веревка-фал с грузом выбрасывается за корму на ходу судна, затем при движении судна донные станции через равномерные интервалы (50 м или 25 м) подцепляются к ведущему фалу, один конец которого уже опущен с грузом на дно, и таким образом увлекаются на дно. Работа такой системы требует сноровки, и любая задержка при прикреплении станции к фалу чревата риском порвать или запутать основную веревку, а вероятность и возможность приблизить положение станций на дне к запланированной позиции гораздо ниже, чем при использовании самовсплывающей технологии. Очевидно, что с ростом глубины точность укладки станций на дно снижается, поэтому данная технология применяется в настоящее время в мелководных проектах и транзитных зонах.

Ряд компаний (*FairField Nodal*, *MagSeis*, *inApril*) предприняли попытки автоматизировать технологию постановки донных станций на фале и работать в глубоководном секторе донного рынка. Они создали автоматизированные системы крепления станций к тросу при постановке

и снятии с троса при подъеме станций со дна. После подъема на борт судна и отцепления от троса станции попадают на транспортный конвейер внутри судна для доставки к месту копирования данных и подзарядки. Там робот вставляет разъем в каждый донный модуль, а затем отсоединяет разъем, ставит готовый модуль на конвейер и транспортирует его к месту сцепления с тросом для последующей постановки на дно. Данная система является громоздкой и требует наличия специализированного судна-носителя, к тому же «веревочная» технология на средней и глубокой воде не обеспечивает требуемой точности постановки. Несмотря на это компании с автоматизированной «веревочной» технологией получили достаточное количество проектов на средней и глубокой воде (до 3000 м) для их выживания и возврата вложенных инвестиций на разработку и производство необходимого количества оборудования.

Проблема неточной установки станций на дно решалась количественным путем благодаря автоматизации работы со станциями, где их количество может достигать 10 000 ед. при установке с одного судна. Такое количество станций можно установить на дне в 1,5–2 раза плотнее требуемого по геологическому заданию, в этом случае проблема неточной установки их на дне отпадет сама собой. В Российской Федерации упрощенная «веревочная» технология была реализована в 2017–2018 гг. в рамках межотраслевой государственной программы по импортозамещению, организованной Министерством промышленности и торговли РФ и АО «ГазПромНефть» [14]–[16]. Эта система не предусматривает автоматизированную систему крепления станций к тросу при постановке и снятии их с троса, а также систему автоматизированной доставки станций к месту считывания данных на судне и их обслуживания после каждой постановки на дно. Отсутствие автоматизации позволяет применять эту систему на предельном мелководье с выходом на сушу. Сервисная компания АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) успешно использует данное оборудование для проведения донных сейсмических работ [17].

Опытные испытания и результаты (Pilot Tests and Results)

Новая проектная технология донных съемок с помощью подводных дронов. Новой концепцией в донной сейсморазведке является использование подводных автономных аппаратов-дронов (AUV), у которых появляется дополнительная функция носителя сейсмических датчиков и системы записи данных. В идеале каждый подводный дрон с донной станцией на борту, самостоятельно достигая нужной точки на дне, производит необходимую запись сейсмического источника. После того как текущая активная расстановка дронов-станций приняла все положенные по плану излучения от сейсмического источника, они перемещаются на новые точки на дне, согласно плану съемки, и далее до выполнения всего объема работ. Количество участвующих дронов-станций и их программа перемещения позволяют не делать перерывы в работе излучающего судна. Такой подход позволяет для донной сейсмической съемки достичь производительности многокосового судна и открыть широкий рынок морских работ. При этом стоимость съемки будет меньше, чем у многокосового судов, так как для работы со станциями-дронами подходит практически любое судно. Ряд компаний уже получили гранты от нефтяных компаний для создания первых прототипов таких дронов-станций¹, но этой технологии [18] помимо технологических вызовов, предстоит преодолеть также психологический барьер, как это было при массовом внедрении автономной регистрации. В описанной схеме со станциями-дронами отсутствует реальная возможность проверки записи на всех станциях до тех пор, пока полностью не закончена работа над проектом. Конечно, можно использовать выборочно гидроакустическую связь для контроля статуса дрона-станции на дне, но в силу большого количества дронов-станций и ограничений по энергии и полосе пропускания гидроакустики по сравнению с объемом сейсмических данных такой подход имеет определенные ограничения.

В качестве примера дрона-станции рассмотрим концепцию норвежской компании *iDROP Oceano* [18], [19]. Дрон-станция, которая опускается на дно под действием силы тяжести, имеет

¹ <https://www.upstreamonline.com/hc-technology/dipping-into-the-seabed-acquisition-market/1-1-1011999> Andrew McBarnet. Dipping into the seabed acquisition market // Upstream Online. 2016.

форму ракеты с управляющими хвостовыми плавниками (рис. 2), управляющими падением в горизонтальной плоскости, обеспечивая падение в планируемую точку на дне. Дрон использует портативную инерциальную навигационную систему. Для изменения плавучести используется сжатый воздух, находящийся в камере и ресивере. Данный вид дронов имеет практически нейтральную плавучесть, поэтому приходится применять отделяемый и потом вновь присоединяемый относительно тяжелый контейнер с сейсмическими датчиками для обеспечения хорошего сцепления сейсмоприемников с грунтом, что значительно усложняет и приводит к увеличению стоимости каждого дрона-станции.

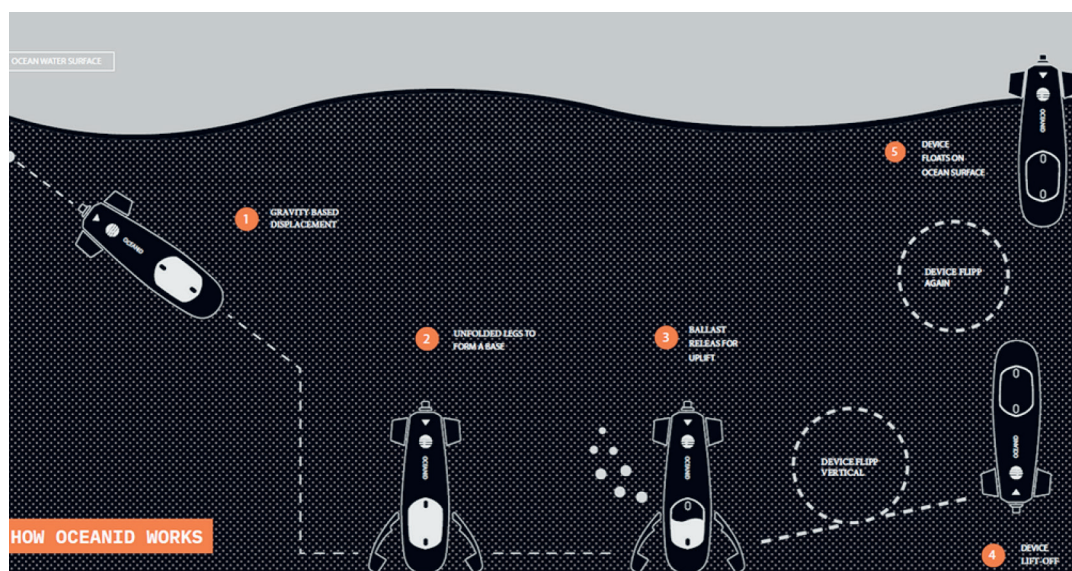


Рис. 2. Технология работы донной станции-дрона: общий вид прототипа во время падения станции на дно и во время записи данных на дне
(Источник заимствования Сайт компании iDrop.no)

Fig. 2. Technology of a bottom station-drone operation: general view of the prototype during the station fall to the bottom and while recording data at the bottom
(Borrowing source is Company website iDrop.no)

Прогресс самовсплывающих технологий. Для решения задачи постановки донной станции на дно в точку с заданной точностью технологию самовсплывающей станции можно усовершенствовать. Для этого существует два пути: первый — с использованием станции-дрона, второй — постановка станции с помощью подводных роботов. В том и другом случае эти решения являются наименее затратными и позволяют экономить значительное время для проведения сейсмической съемки.

Управляемое падение станции на дно. Для обеспечения достижения нужного положения на дне в данном исследовании предлагается использование уже хорошо себя зарекомендовавшей самовсплывающей донной станции с экологическим грузом. Необходимо сделать не дрон, несущий донную станцию, а донную станцию с небольшими дополнениями от конструкции дрона, оснастив ее хвостовым оперением-рулями, которые будут контролировать движение станции в горизонтальной плоскости при ее падении на дно. Вместо инерциальной системы навигации используем отечественную систему подводного позиционирования¹. Эта система использует четыре навигационных буя, которые непрерывно передают по гидроакустике сигналы со своим местоположением, полученные по обычному каналу и сигналы для измерения расстояния от объекта до них. Каждый объект, определяющий свои координаты, использует приемный трансдьюсер в пассивном режиме (важно при проведении длительной сейсмической

¹ <https://www.unavlab.com/o-nas/articles/podvodnyj-gps-na-teleupravljajemom-neobitaemom-podvodnom-apparate-opyt-ispolzovaniya/> Подводный GPS на телеуправляемом обитаемом подводном аппарате: опыт использования.

съемки, так как при этом не затрачивается энергия на передачу гидроакустических импульсов) связи с контроллером, определяющим его координаты в толще воды. Система может обслуживать неограниченное число объектов подводной навигации в силу принципа своей архитектуры. В глубоководной ситуации на море (3 км глубины и более) вместо буйев можно использовать волновые глайдеры с тем же оборудованием.

Буксируемый подводный планер над дном для постановки станций. Другой возможностью увеличения производительности донных сейсмических работ на глубокой воде является некоторая модификация подхода, связанного с применением ROV. Судно-установщик станций буксирует цилиндр-носитель с нейтральной плавучестью (ЦННП), на котором установлены два подруливающих устройства, обеспечивающих прохождение ЦННП по запланированной траектории установки станций с точностью ± 5 м. На переднем и заднем концах ЦННП установлены гидроакустические маяки-ответчики, определяющие с помощью навигации с ультракороткой базой (USBL) положение ЦННП относительно буксирующего судна, т. е. в абсолютных координатах. ЦННП буксируется на глубине 50 м ± 20 м от поверхности дна.

На ЦННП установлен эхолот и датчик глубины. При достижении очередной точки постановки с нужной точностью открывается магнитный захват, удерживающий петлю, расположенную на станции, и она падает на дно в нужное место. При достижении следующей точки постановки освобождается следующая станция и т. д. По буксирующему ЦННП кабель-тросу станции спускаются с судна. Преимущество данной технологии заключается в следующем: быстрая постановка станций на дно со скоростью до 5 уз, быстрый их подъем со дна за счет самовсплывания, а также существенное сокращение времени и стоимости выполняемых работ за счет одновременного использования большего количества станций.

Самовсплывающая технология для гибридных съемок. При проведении гибридных съемок расстояние между станциями обычно составляет 1–1,5 км и проблема точной установки на дне станций не является актуальной даже при глубине моря до 3 км. Поэтому оптимальной для этого является технология самовсплывающих станций. При работах в Индийском океане среднестатистические отклонения от точки сброса не превышали ± 50 м [20]. Использование технологии самовсплывающих станций для этого вида съемок практически не добавляют дополнительных затрат.

Сейсмические работы на мелкой воде и в транзитных зонах (Seismic work on shallow water and in transit zones)

Несмотря на важность глубоководных донных сейсмических работ наиболее массовым применением донных сейсмических станций по-прежнему являются работы на мелкой воде и в транзитных (суша – море) зонах, поскольку по-другому в этих условиях проводить работы нельзя.

Выполним анализ данного вида работ. Для сейсмической разведки в транзитной зоне (глубины воды 0–20 м) на шельфе необходимо найти эффективное решение для ее автоматизации и безопасного проведения. Существующие в настоящее время решения предусматривают использование большого объема небезопасного ручного труда, требуют продолжительного времени проведения работ, привлечения большого количества человеческих ресурсов и плавучих средств, а также подвергают риску жизнь персонала при проведении работ. Гибель двух человек при проведении сейсмической 3Д разведки в 2017 г. в транзитной зоне на лицензионном участке «Газпрома» в северо-западной части полуострова Ямал, является подтверждением этого.

Снижение стоимости углеводородов на мировых рынках также предъявляет новые требования к эффективному расходованию средств на все циклы производства УВ и в частности необходимо искать пути снижения затрат на проведение масштабных трехмерных сейсмических работ в транзитной зоне. Предлагаемый в работе проект направлен на решение и этой актуальной задачи.

В связи с освоением Северного морского пути произойдет развитие прибрежной инфраструктуры для его обслуживания. Для оценки рисков сейсмической, геологической и техногенной опасности необходимо проведение инженерно-геологических изысканий предстоящего проекта. Наиболее эффективным методом оценки материального состава грунтов являются активные / пас-

сивные сейсмические измерения на дне для определения скорости поперечных волн. В отличие от разведки УВ бюджет на проведение инженерно-геологических работ и длительных сейсмологических наблюдений для оценки сейсмической опасности обычно на порядок ниже, поэтому нужны недорогие донные сейсмические инструменты с автоматизированной технологией их применения.

Специалисты ИО РАН при участии компании «ГЕОВЕНДОР» предложили инновационное решение для решения проблемы автоматизации донных сейсмических съемок на мелководье. Основным элементом этой системы должна стать самовсплывающая станция, обладающая рядом специальных свойств, которые сделают возможным применение роботизированных плавучих платформ. Новая донная станция должна быть компактной самовсплывающей четырехкомпонентной и работать без оставления груза на дне, имея возможность в автономном режиме много раз погружаться на дно и возвращаться к поверхности моря. Для многократного всплытия без оставления груза на дне используется технология работы со сжатым воздухом под водой, которая сейчас широко применяется ныряльщиками.

На этапе реализации проекта автоматизации мелководной съемки предлагается разработать надводные роботизированные платформы для сбора самовсплывающей донной станции без оставления груза, использующие технологию сжатого воздуха (рис. 3). Роботизированные платформы работают без участия или с минимальным участием (на начальном этапе) персонала, что автоматически приведет к значительному снижению затрат на сейсмические работы, увеличит скорость проведения работ и значительно повысит безопасность и безаварийность работ для участвующего в них персонала.

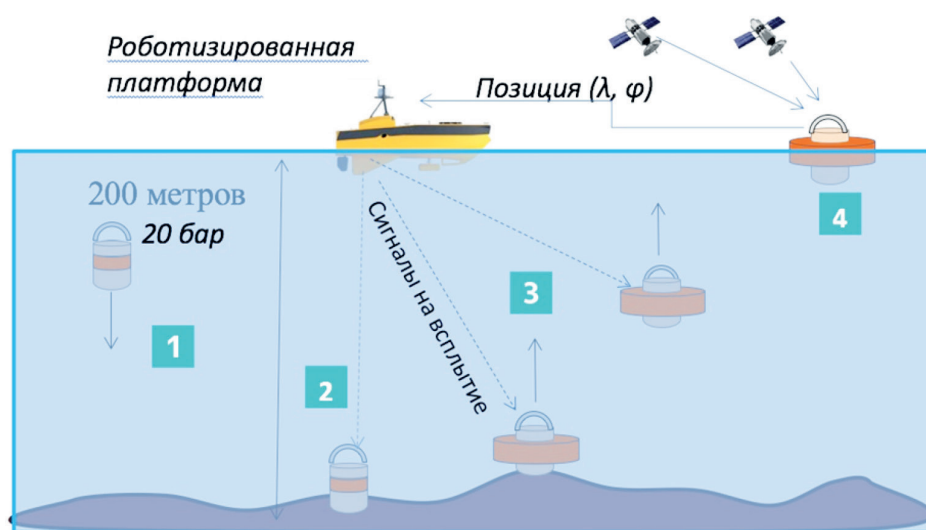


Рис. 3. Схема работы роботизированной платформы с самовсплывающей донной станцией без оставления груза
Fig. 3. Scheme of a robotic platform operation with a self-popup bottom station without leaving a load

Донные станции сначала устанавливаются на дно с роботизированной платформы в режиме свободного падения (позиция 1 на рис. 3). При постановке на дно станция со сжатым плавучим мешком (без воздуха) падает на дно. После того как все станции, согласно плану съемки, установлены на дно, их местоположение проверено по гидроакустическому каналу и они приняли все необходимые излучения от сейсмического источника, мобильная платформа начинает сбор станции со дна. Вначале она посылает сигналы на всплытие (позиция 2 на рис. 3) станции после приема соответствующих кодированных посылок, затем надувает мешок и станция начинает всплывать (позиция 3 на рис. 3). При достижении поверхности моря станция получает сигналы ГЛОНАСС, синхронизирует свои часы и получает каждую секунду свои координаты, которые по радиоканалу передает на плавучую платформу. При получении сигналов с координатами станции мобильная

роботизированная платформа автоматически наводится на всплывшую станцию, поднимает ее к себе на борт с помощью манипулятора, где станция по беспроводному высокоскоростному интерфейсу передает записанные данные. Плавающий мешок при этом сдувается, и станция вновь готова к погружению в новую точку на дне согласно плану выполнения работ.

Беспилотные платформы для работы с самовсплывающими станциями без оставления груза на дне транспортируются к месту съемки судном-носителем, на котором находится сейсмический источник, а также сосредоточено управление проектом, прием и контроль качества сейсмических данных, получаемых с роботизированных носителей.

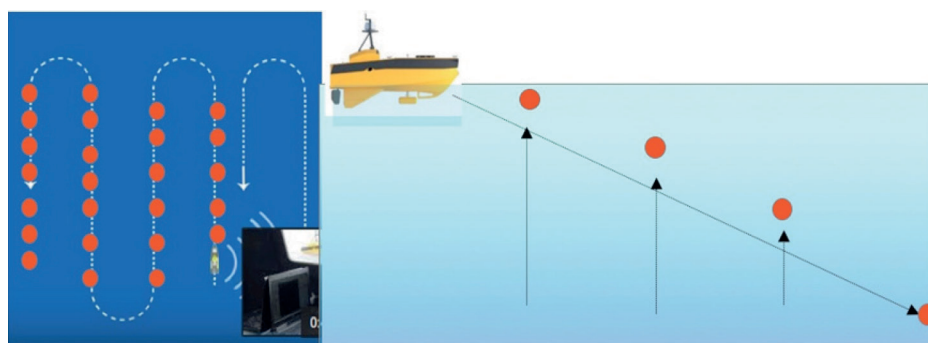


Рис. 4. Сбор станций со дна беспилотной платформой
Fig. 4. Gathering of stations from the bottom by an unmanned platform

На рис. 4, в его левой части, показан путь беспилотной платформы при сборе станций, в нижнем правом углу выделен терминал контролирующей системы на управляющем съемкой судне. Справа на этом рисунке показан последовательный процесс подъема станций со дна моря: станции вызываются на всплытие со дна с некоторой задержкой, позволяющей последовательно их собирать с поверхности моря по мере всплытия.

Испытания модели корпуса для самовсплывающей станции без груза. При создании новой самовсплывающей станции без оставления груза на дне выбрана следующая концепция корпуса (рис. 5): станция должна состоять из двух оболочек. Внутренний корпус является водонепроницаемым (коричневый внутри синего цилиндра на рис. 5, а), установлен на жестком основании, в которое вставлены два баллона сжатого воздуха высокого давления (300 бар), объемом по 1 л каждый. Внешняя оболочка крепится к внутреннему корпусу, представляя собой открытый книзу пластиковый цилиндр. Модель такого корпуса, приведенная на рис. 5, б, использовалась для дальнейшего тестирования процесса всплытия станции со дна. Выбор предложенной конструкции самовсплывающей станции без оставления груза на дне обусловлен попыткой сделать постановку и подъем донной станции максимально простым и автоматизированным. С внешней стороны при этом станция выглядит как простой цилиндр с крышкой, выполненный из тонкого прочного пластика. Все рабочие части, такие как прочный корпус, баллоны сжатого воздуха, воздушная арматура, сейсмический гидрофон и гидроакустический трансдьюсер, находятся внутри внешнего корпуса и защищены от случайных внешних воздействий при транспортировке и эксплуатации станции.

Процесс постановки станции на дно представляет собой скатывание по наклонному желобу, который опускается с борта судна в воду. Станция скатывается по этому желобу в воду, где она должна набрать воду и опуститься на дно. Процесс скатывания станции по направляющим с борта судна занимает одно и то же время, поэтому можно использовать одинаковое упреждение по времени перед достижением точки сброса, корректируя его в зависимости от вариации скорости несущего судна (рис. 5, в). Был выполнен ряд натурных испытаний на модели донной станции для проверки процесса погружения станции на дно и конструкции направляющего желоба. В результате проведения испытаний оказалось, что для надежного погружения станции на дно недостаточно наличия направляющих без верхних ограничителей. Иногда станция не успевает набрать достаточное количество воды между внешним и внутренним корпусом и в течение длительного про-

межутка времени остается на плаву. Только после того, как конструкция желоба была дополнена верхними ограничивающими направляющими, станция смогла надежно набирать воду и уходить на дно в течение одного и то же периода времени при фиксированном наклоне направляющего желоба и его длины в воде.



Рис. 5. Концепция донной станции без оставления груза на дне (а), ее модель, выполненная из пластикового ведра и груза (вид сверху) (б), графический вид метода погружения станции на дно (в)
Fig. 5. The concept of a bottom station without leaving a load at the bottom (a), its model made of a plastic bucket and a load (top view) (b), a graphical view of the method of immersing the station to the bottom (c)

Далее были проведены испытания работы модели станции при всплытии ее со дна моря. Модель опускалась на дно на глубину 10 и 20 м (рис. 6). Затем водолазы добавляли сжатый воздух в пространство между внешним и внутренним корпусом, после чего станция начинала всплывать. Это действие водолазов имитировало штатный процесс всплытия станции со дна, когда она по гидроакустической команде открывает воздушный клапан на определенное время и выпускает сжатый воздух из баллонов в пространство между внутренним и внешним корпусами и станция за счет вытесненного объема воды начинает всплывать. Весь процесс на дне и на поверхности моря был зафиксирован видеосъемкой для того чтобы понять, насколько устойчиво происходят процессы всплытия станции и дальнейшего ее нахождения на поверхности моря. Испытания проводились на базе Южного отделения института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Геленджик. Было проведено три серии испытаний с перерывом в несколько недель.

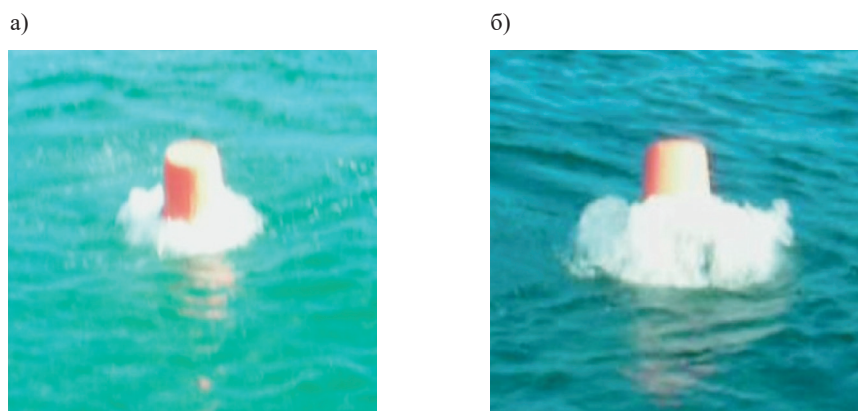


Рис. 6. Выброс воздуха при всплытии модели станции:
а — после всплытия с глубины 10 м; б — после всплытия с глубины 20 м
Fig. 6. Air release during emersion of the station model:
a — (on the left) after emersion from a depth of 10 m; b — after emersion from a depth of 20 m

В результате проведенных испытаний был выявлен ряд недостатков, устранением которых специалисты Института океанологии занимаются в рабочем порядке. Одним из них является воздействие

на корпус станции воздуха под давлением, в результате которого станция выпрыгивает из воды, теряя в этот момент основные излишки воздуха, равные его объемному расширению из-за разницы давлений на дне и на поверхности.

Прыжок из воды данной конструкции станции с открытым корпусом иногда приводит к ее падению набок, в результате чего станция набирает воду и уходит на дно, откуда ее надо опять вызывать по акустике, расходуя непроизводительно запас сжатого воздуха из баллонов, который используется для следующих циклов погружения / всплытия. Иллюстрацией эффекта прыжка служат отдельные видеокadres (рис. 6, а), сделанные в момент наибольшего выброса воздуха. Накопленный за время всплытия воздух с избыточным давлением выходит в последний момент всплытия. При всплытии с глубины 20 м объем выброшенного воздуха в два раза больше, чем с глубины 10 м (рис. 6, б). Для устойчивой работы станции необходим плавный выход станции из воды, чтобы она устойчиво оставалась на поверхности воды до того момента, пока ее не подберет на борт плавучая платформа. Проблема смягчения прыжка станции при выходе из воды была решена увеличением количества отверстий на внешней оболочке станции. Следующей модификацией было предусмотрено использование водолазного клапана сброса излишнего давления, вмонтированного в верхнюю поверхность внешнего корпуса. Это еще более замедлило «прыжок» донной станции при выходе ее на поверхность (рис. 7) и обеспечило стабильное поведение станции после всплытия на поверхность воды.

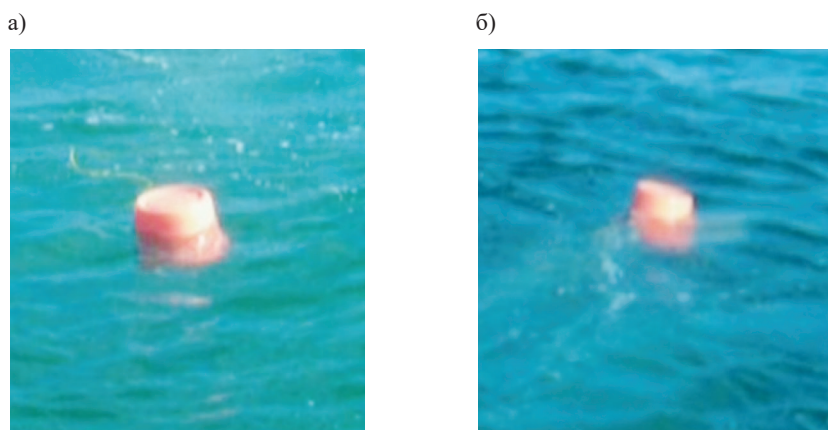


Рис. 7. Устойчивое положение модели после сброса лишнего воздуха:

а — с глубины 10 м; б — с глубины 20 м

Fig. 7. Stable position of the model after releasing excess air:

a — from a depth of 10 m; b — from a depth of 20 m

Таким образом, после проведения морских испытаний модели донной самовсплывающей станции без оставления груза на дне был найден эффективный способ автоматической постановки станций на дно. Проведены морские испытания всплытия предложенной модели самовсплывающей станции без оставления груза на дне с использованием технологии сжатого воздуха. Выявлены проблемы предложенной модели, после чего найден устойчивый модифицированный вариант ее всплытия при любых погодных условиях.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены проблемы автоматизации проведения донных сейсмических съемок на глубокой и мелкой воде.
2. Показано, что технологии, построенные на базе самовсплывающих сейсмических донных станций, имеют существенное преимущество при проведении донной составляющей гибридных съемок.
3. Рассмотрено несколько альтернативных методов автоматизации 3Д сейсмической донной съемки на глубокой воде и сопутствующие им проблемы.

4. Предложена новая концепция автоматизации мелководных сейсмических съемок на основе использования самовсплывающих станций без оставления груза на дне и беспилотного автономного надводного судна-платформы

5. В результате проведенных испытаний предложенной модели донной сейсмической станции найден легкий и стабильный способ ее постановки на дно с помощью направляющего желоба особой конструкции.

6. Проведены испытания по всплытию модели новой донной станции с глубин 10 м и 20 м. В результате выявлена ограниченность применения внешнего корпуса с открытым контуром. Дальнейшее усовершенствование конструкции приводит к использованию закрытой камеры всплытия (например, вложенного торообразного мешка всплытия между внешним и внутренним корпусом с клапаном сброса излишнего давления). Это решение является наиболее оптимальным для нахождения всплывшей станции на поверхности моря и не зависит от погодных условий (высоты волн).

Финансирование

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2024–0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Д. А. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.
2. Górszczyk A. Regional-scale FWI of wide-angle OBN data from a crude initial model using graph-space optimal transport / A. Górszczyk, R. Brossier, L. Métivier // First International Meeting for Applied Geoscience & Energy. — Society of Exploration Geophysicists, 2021. — Pp. 707–711. DOI: 10.1190/segam2021-3577774.1.
3. Vigh D. Sparse-node regional study from acquisition to imaging / D. Vigh, X. Cheng, K. Lyons, N. Seymour, E. Kocel, Z. Pan // First International Meeting for Applied Geoscience & Energy. — Society of Exploration Geophysicists, 2021. — Pp. 722–726. DOI: 10.1190/segam2021-3583372.1.
4. Юров Ю. Г. Определение скоростной модели среды с помощью наблюдений отражённых и преломлённых волн / Ю. Г. Юров // Технологии сейсморазведки. — 2009. — № 3. — С. 28–35.
5. Ray A. First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico / A. Ray, B. Nolte, D. Herron // SEG International Exposition and Annual Meeting. — SEG, 2004. — Pp. SEG-2004-0406.
6. Brown I. Ocean Bottom Seismic: Robots on the Seabed [Электронный ресурс] / I. Brown. — Режим доступа: <https://geoexpro.com/ocean-bottom-seismic-robots-on-the-seabed/> (дата обращения: 01.04.2024).
7. Beaudoin G. Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey / G. Beaudoin, A. A. Ross // The Leading Edge. — 2007. — Vol. 26. — Is. 4. — Pp. 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.
8. Ильинский Д. А. О создании цифровых донных сейсмических станций нового поколения: настоящее и взгляд в будущее / Д. А. Ильинский, А. А. Гинзбург, В. В. Воронин, О. Ю. Ганжа [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2019. — № 2. — С. 87–101. DOI: 10.31857/S0869-78092019287-101.
9. Ильинский Д. А. Инновационный подход и мобильная технология реализации сейсморазведки в приливно-отливной зоне в труднодоступных районах Арктики / Д. А. Ильинский, А. Ю. Разумов, А. А. Корнеев, А. М. Русалин [и др.] // Сейсмические приборы. — 2013. — Т. 49. — № 2. — С. 58–70.
10. Рыжов В. А. Опыт проведения тестовых работ по технологии Низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ) на шельфе Охотского моря (о. Сахалин) / В. А. Рыжов, О. С. Жукова, А. И. Чернышков, А. В. Хаженец [и др.] // Тезисы докладов 19-ой международной научно-практической конференции «Гео-модель-2017». — Геленджик, 2017.
11. Ningthoujam L. S. Plume-ridge interactions in the Central Indian Ocean Basin: Insights from new wide-angle seismic and potential field modelling / L. S. Ningthoujam, D. K. Pandey, N. Nair, R. Yadav, S. Khogenkumar, S. S. Negi, A. Kumar // Tectonophysics. — 2022. — Vol. 824. — Pp. 229222. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229222.

12. Regone C. J. A modeling approach to wide-azimuth design for subsalt imaging / C. J. Regone // *The Leading Edge*. — 2006. — Vol. 25. — Is. 12. — Pp. 1467–1475. DOI: 10.1190/1.2405331.
13. Regone C. J. Using 3D finite-difference modeling to design wide-azimuth surveys for improved subsalt imaging / C. J. Regone // *Geophysics*. — 2007. — Vol. 72. — Is. 5. — Pp. SM231–SM239. DOI: 10.1190/1.2668602.
14. Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы «КРАБ» (этап 1) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.
15. Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы КРАБ (этап 2) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.
16. Рогинский К. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Опыт-промышленные испытания системы «КРАБ-400» (этап 3) / К. А. Рогинский, Д. А. Ильинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 611–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624.
17. Казанин Г. С. Результаты испытаний отечественных 4-компонентных автономных донных станций «КМС» в юго-восточной части Баренцева моря / Г. С. Казанин, С. О. Базилевич, А. В. Зимовский, И. А. Матвеев [и др.] // *Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового Океана: материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 70-летию основания НИИГА — ВНИИОкеангеология* / Отв. ред. А. С. Бич. — СПб.: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018. — С. 29–30.
18. Steen-Hansen P. The future is at the bottom of the sea / P. Steen-Hansen // *GeoExPro*. — 2017. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 42–45.
19. Kombrink H. Dropping nodes from a supply vessel [Электронный ресурс] / H. Kombrink. — Режим доступа: <https://geoexpro.com/dropping-nodes-from-a-supply-vessel/> (дата обращения: 01.04.2024).
20. Ilinskiy D. A. Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation / D. A. Ilinskiy, O. Y. Ganzha, A. I. Elnikov, K. A. Roginskiy // *Marine Technologies* 2019. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. — Vol. 2019. — Pp. 1–10. DOI: 10.3997/2214-4609.201901820.

REFERENCES

1. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. “Geophysical technologies for study of deep oil genesis.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.
2. Górszczyk, Andrzej, Romain Brossier, and Ludovic Métivier. “Regional-scale FWI of wide-angle OBN data from a crude initial model using graph-space optimal transport.” *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy*. Society of Exploration Geophysicists, 2021. 707–711. DOI: 10.1190/segam2021-3577774.1.
3. Vigh, Denes, Xin Cheng, Kevin Lyons, Nigel Seymour, Eray Kocel, and Zhenwen Pan. “Sparse-node regional study from acquisition to imaging.” *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy*. Society of Exploration Geophysicists, 2021. 722–726. DOI: 10.1190/segam2021-3583372.1.
4. Yurov, Yu. G. “Opredelenie skorostnoi modeli sredy s pomoshch'yu nablyudenii otrazhennykh i prelomlennykh voln.” *Tekhnologii seismorazvedki* 3 (2009): 28–35.
5. Ray, Amal, Bertram Nolte, and Don Herron. “First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico.” *SEG International Exposition and Annual Meeting*. SEG, 2004.
6. Brown, Iain. “Ocean Bottom Seismic: Robots on the Seabed.” Web. 1 Apr. 2024 <<https://geoexpro.com/ocean-bottom-seismic-robots-on-the-seabed/>>.
7. Beaudoin, Gerard, and Allan A. Ross. “Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey.” *The Leading Edge* 26.4 (2007): 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.
8. Il'inskiy, D. A., A. A. Ginzburg, V. V. Voronin, O. Yu. Ganzha, A. B. Manukin, and K. A. Roginskiy. “Towards a design of new generation digital seismic seabed seismographs — current state and future outlook.” *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* 2 (2019): 87–101. DOI: 10.31857/S0869-78092019287-101.
9. Ilinski, D. A., A. U. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalin, and I. A. Gotz. “Application of new approach and mobile technology for offshore seismic acquisition project in the remote arctic transition areas.” *Seismic Instruments* 49.2 (2013): 58–70.

10. Ryzhov, V. A., O. S. Zhukova, A. I. Chernyshkov, A. V. Khazhenets, A. V. Kharakhinov, S. A. Feofilov, I. R. Sharapov, and D. A. Ilyinsky. "The Experience of Conduction of Low-Frequency Seismic Sounding Technology (LFS) Test Works on the Shelf of the Sea of Okhotsk (Sakhalin Island)." *19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development «Geomodel 2017» — Gelendzhik, Russia, 11–14 September 2017*. Gelendzhik. 2017.
11. Ningthoujam, Lachit S., Dhananjai K. Pandey, Nisha Nair, Rahul Yadav, Shoraisam Khogenkumar, Sanjay S. Negi, and Amit Kumar. "Plume-ridge interactions in the Central Indian Ocean Basin: Insights from new wide-angle seismic and potential field modelling." *Tectonophysics* 824 (2022): 229222. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229222.
12. Regone, Carl J. "A modeling approach to wide-azimuth design for subsalt imaging." *The Leading Edge* 25.12 (2006): 1467–1475. DOI: 10.1190/1.2405331.
13. Regone, Carl J. "Using 3D finite-difference modeling to design wide-azimuth surveys for improved subsalt imaging." *Geophysics* 72.5 (2007): SM231–SM239. DOI: 10.1190/1.2668602.
14. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in the transit zone. Fullscale tests of the KRAB system. Stage 1." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.
15. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. KRAB system full-scale tests. Stage 2." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.
16. Roginskiy, Konstantin A., Dmitry A. Ilinskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. Krab system full-scale tests (Stage 3)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 611–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624.
17. Kazanin, G. S., S. O. Bazilevich, A. V. Zimovskii, I. A. Matveev, D. G. Kuoma, D. A. Il'inskii, K. A. Roginskii, and O. Yu. Ganzha. "Rezul'taty ispytaniy otechestvennykh 4-komponentnykh avtonomnykh donnykh stantsii «KMS» v yugo-vostochnoi chasti Barentseva moray." *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Novoe v geologii i geofizike Arktiki, Antarktiki i Mirovogo Okeana», posvyashchennaya 70-letiyu osnovaniya NIIGA — VNIIOkeangeologiya*. Edited by A. S. Bich. SPb.: FGBU «VNIIOkeangeologiya», 2018. 29–30.
18. Steen-Hansen, Petter. "The future is at the bottom of the sea." *GeoExPro* 14.4 (2017): 42–45.
19. Kombrink, Henk. "Dropping nodes from a supply vessel." Web. 1 Apr. 2024 <<https://geoexpro.com/dropping-nodes-from-a-supply-vessel/>>.
20. Ilinskiy, D. A., O. Y. Ganzha, A. I. Elnikov, and K. A. Roginskiy. "Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation." *Marine Technologies* 2019. Vol. 2019. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. 1–10. DOI: 10.3997/2214-4609.201901820.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильинский Дмитрий Анатольевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, технический директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук» 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 ООО «Геовендор» 117449, Российская Федерация, г. Москва, ул. Шверника, д. 16, к. 2, помещ. 1 e-mail: dilinskiy61@mail.ru
Ганжа Олег Юрьевич — главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук» 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 e-mail: ganzhaoy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilyinsky, Dmitry A. — PhD, Senior Research Scientist, CTO P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117997, Russian Federation Geovendor LLC 16/2 Shvernika Str., Moscow, 117449, Russian Federation e-mail: dilinskiy61@mail.ru
Ganzha, Oleg Yu. — Chief Specialist P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117997, Russian Federation e-mail: ganzhaoy@mail.ru

Корнеев Антон Александрович —
генеральный директор
ООО «Геовендор»
117449, Российская Федерация, г. Москва,
ул. Шверника, д. 16, к. 2, помещ. 1
e-mail: red_77777@mail.ru

Korneev, Anton A. —
CEO
Geovendor LLC
16/2 Shvernika Str., Moscow, 117449,
Russian Federation
e-mail: red_77777@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 20 марта 2024 г.
Received: March 20, 2024.*