

Новая методика трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях

А.А. Шматков

аспирант, кафедра сейсмометрии и геоакустики,
геологический факультет¹
shmatkovalex@gmail.com

М.Ю. Токарев

старший преподаватель, кафедра сейсмометрии
и геоакустики, геологический факультет¹
tokarev@decogeo.com

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

В статье описана новая методика для проведения трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях. В связи с растущими объемами инженерно-геологических изысканий, особенно на арктическом шельфе России, становится актуальной задача повышения качества и достоверности получаемой информации о строении верхней части донных отложений. Относительно редкая пространственная сеть профильных одно- и многоканальных сейсмоакустических наблюдений не позволяет картировать большинство потенциально опасных геологических объектов, вследствие чего повышаются риски при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Трёхмерные наблюдения позволяют получить детальное сейсмическое изображение геологической среды, однако их применение для решения инженерно-геологических задач ограничивается технологическими и экономическими факторами, вследствие чего на сегодняшний момент существуют единичные разработки, которые применяются для решения практических задач.

Введение

В настоящее время происходит активное освоение шельфа арктических морей России, при этом многие лицензионные участки расположены на акваториях с глубиной воды менее 50 метров. На различных этапах разведки и эксплуатации месторождений требуется проведение инженерно-геологических изысканий, которые необходимы для комплексного изучения строения верхней части донных отложений, выделения и идентификации различных геологических опасностей. Опасные инженерно-геологические явления можно определить, как результат деятельности геологических процессов, возникающих в земной коре под действием различных природных, или антропогенных факторов, или их сочетания, которые имеют потенциальную возможность стать опасными и причинить вред человеку, окружающей среде или сооружениям [1]. Для российского арктического шельфа наиболее типичными геологическими опасностями являются зоны распространения многолетнемерзлых пород, мелкозалегающие газонасыщенные отложения и приповерхностные разломы. Их картирование, как в плане, так и в пространстве является важной задачей, поскольку позволяет снизить риски при проведении буровых работ, добычи и транспортировке углеводородов, строительстве и эксплуатации различных гидротехнических сооружений.

Относительно редкая пространственная сеть профильных одно- и многоканальных сейсмоакустических наблюдений (2Д) не позволяет картировать большинство потенциально опасных геологических объектов, вследствие чего повышаются риски при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Трёхмерные наблюдения позволяют получить детальное сейсмическое изображение геологической среды, однако их применение для решения инженерно-геологических задач ограничивается технологическими и экономическими факторами.

В статье представлена разработанная авторами методика трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях и показаны результаты её практического применения в акватории Белого моря. Рассматриваются существующие на сегодняшний день приёмоизлучающие системы для решения инженерно-геологических задач и особенности проведения трёхмерных съёмки в сейсмогеологических условиях арктических шельфов России.

Современные методы сейсмоакустических наблюдений на акваториях

Стандартными методами, входящими в состав инженерно-геологических изысканий, являются одно- и многоканальное непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), а также высокоразрешающая сейсморазведка (ВРС). Выбор методики съёмки определяется решаемой задачей и объектом исследований. Требуемая глубинность при

этом может варьироваться от первых метров при проведении исследований вдоль трасс трубопроводов до нескольких сотен метров при изысканиях на площадках под установку буровых платформ

Главным недостатком двумерных сейсмических методов является относительно редкая пространственная сеть наблюдений — на глубинах до 150 метров рекомендуемое межпрофильное расстояние должно составлять порядка 25–50 метров [2], однако на практике оно увеличивается до 100 метров. Поперечные профили при этом располагаются еще с большим расстоянием, что не позволяет в полной мере и с достаточной точностью получить информацию о строении геологической среды [3]. Вследствие этого возможности применения получаемых данных для картирования опасных геологических явлений ограничены, поскольку линейные размеры многих потенциально опасных объектов существенно меньше, чем расстояние между соседними линиями съёмки, а в случае нахождения аномальной зоны вне линии наблюдений возможно образование боковых отражений и дифракций, что приведет к неопределенности при построении сейсмического изображения среды и дальнейшей интерпретации.

Очевидно, что применение трёхмерных методик дает более широкие возможности при картировании геологических опасностей. Даже учитывая относительно низкую разрешающую способность разведочной трёхмерной сейсморазведки возможность получения информации в поперечном направлении дает более широкие возможности при интерпретации и изучения геологического строения среды. Однако для использования подобных данных в инженерно-геологических целях необходимо подвергнуть их дополнительной высокочастотной обработке [2], что требует дополнительных финансовых и временных ресурсов. В случае изучения мелководных акваторий большие удаления будут приводить к «размыванию» верхней части разреза из-за больших углов регистрации отраженных волн [3].

Особенности проведения сейсмических работ на мелководных акваториях и необходимость детального изучения верхней части поддонных отложений привели к развитию методик трёхмерных высокоразрешающих сейсмических и сейсмоакустических методик. Первые приёмоизлучающие системы появились в начале 90-х годов XX века. За прошедшее время различными научными группами было разработано несколько приёмоизлучающих систем для изучения верхней части геологического разреза на мелководных акваториях. Важно отметить, что физические и технические ограничения не позволяют добиться необходимого результата путем простого масштабирования существующих методик разведочной 3Д сейсморазведки [4]. В дополнении к этому, их развитие сильно ограничивается несколькими факторами:

Предлагаемая методика сейсмоакустических наблюдений позволяет проводить трёхмерные съемки на акваториях с использованием стандартного комплекса оборудования и может быть легко адаптирована для решения конкретных задач. В статье рассматриваются результаты полевых наблюдений в Кандалакшском заливе Белого моря.

Материалы и методы

Проведение трёхмерной сейсмоакустической съемки на мелководной акватории.

Ключевые слова

сейсмоакустические наблюдения, 3Д, трёхмерные, акватория, методика, съемка

- большинство разработанных на сегодняшний момент методик имеют научный характер и малопригодны для практического применения в рамках производственных работ;
- проведение трёхмерных сейсмоакустических съемок в рамках стандартного комплекса исследований как правило требует наличия дополнительного оборудования, что повышает стоимость проведения полевых работ;
- повышение стоимости работ в свою очередь не выгодно как заказчику, так и исполнителю, поскольку применение нестандартных методов увеличивает риски и требует дополнительного времени на проведение изысканий и последующий анализ полученных материалов.

Существующие методики можно разделить на три типа по способу буксировки приёмного массива:

1. Использование выстрелов является одним из наиболее распространённых способов при проведении, в том числе и профильных наблюдений, поскольку позволяет вывести приёмные элементы за пределы кильватерной струи. Преимуществами является простота технической реализации и простота проведения спускоподъёмных операций. Ширина приёмной системы в этом случае определяется шириной судна и длиной выстрелов по обим бортам. Как правило, используется 4 сейсмические косы с расстоянием 6,25 или 12,50 метров [5];
2. «Жесткая рама» к которой крепятся отдельные гидрофоны или короткие сейсмические косы. Благодаря этому удается обеспечить наименьшее расстояние между отдельными приёмными элементами и точно определять их координаты, но максимальная ширина системы ограничена первыми метрами, вследствие чего их применение ограничено изучением приповерхностных объектов [6];
3. Параваны позволяют обеспечить максимальную ширину разведки сейсмических кос (до 200 метров с расстоянием

между косами 12,5 метров [7]). Количество кос и расстояние между ними может изменяться в широких пределах, что позволяет легко адаптировать систему для решения широкого круга задач. Для повышения точности расчета геометрии наблюдений в этом случае применяются ГНСС приёмники, установленные на параванах, и цифровые компасы в косах.

Особенности трёхмерных съемок на мелководных акваториях

Главной особенностью трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях с небольшой глубиной воды (до первых десятков метров) является необходимость равномерной пространственной дискретизации получаемых данных. В то же время это вызывает конфликт интересов с экономическим аспектом проведения полевых работ. С точки зрения обработки и интерпретации сейсмоакустических данных, особенно в случае их дальнейшего использования для решения инженерно-геологических задач, важно иметь плотную сеть наблюдений, поскольку от этого зависит точность построения сейсмического изображения геологической среды. Очевидно, что близкое расположение проектных профилей увеличивает пространственную разрешающую способность и повышает соотношение сигнал/шум путем накопления большего объема данных, но в то же время значительно возрастают затраты на проведение полевых работ. В связи с этим на мелководных акваториях эффективными оказываются методики, позволяющие за один проход судна получить сейсмограммы в максимально широкой полосе. При этом кратность наблюдений, распределение удалений и азимутов играют меньшую роль, чем при проведении разведочной трёхмерной сейсморазведки.

Еще одной особенностью работы на мелководных акваториях является снижение эффективности многоканальных кос большой длины, поскольку отражения от целевых горизонтов могут приходиться под углами, превышающими критическое значение,

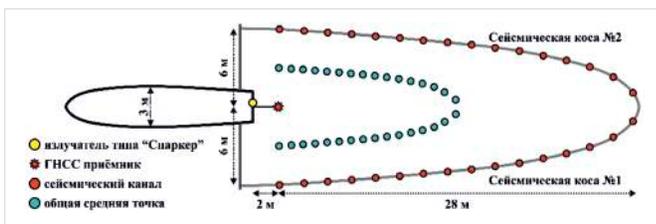


Рис. 1 — Схема приёмноизлучающей системы с двумя многоканальными косами для проведения трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях

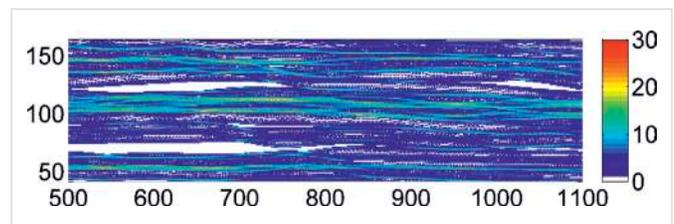


Рис. 3 — Карта распределения кратности по площади исследований



Рис. 2 — Схема района работ



Рис. 4 — Временные срезы сейсмоакустического куба после предварительной обработки

а применение кинематических поправок на больших удалениях будет приводить к сильному растяжению сигнала. Недостаток информации о скорости распространения упругих колебаний может быть восполнен проведением дополнительных профильных наблюдений по ряду профилей.

Проведение полевых наблюдений на мелководных акваториях, как правило, осуществляется с небольших судов с ограниченным свободным палубным пространством, что накладывает ограничения на физические размеры приёмноизлучающего массива. При больших линейных размерах системы повышается сложность проведения спускоподъемных операций, что может значительно замедлить выполнение полевых работ.

Поскольку сейсмоакустические наблюдения проводятся в комплексе с другими методами инженерно-геологических изысканий и при этом площадь исследований, как правило не большая, то время их выполнения ограничено, вследствие чего приёмноизлучающая система должна быть мобильной и легко транспортироваться с места хранения на судно и обратно. Компактность в сложном состоянии также является преимуществом, поскольку позволяет задействовать минимальное место на судне во время выполнения других методов изысканий.

Новая методика трёхмерных сейсмоакустических наблюдений

В результате анализа существующих технических и методических решений для проведения трёхмерных сейсмоакустических наблюдений были сформулированы следующие требования к новой методике съёмки, которая должна обеспечить получение достоверных данных для изучения строения верхней части донных отложений на глубину до первых десятков метров:

1. Использование стандартных многоканальных сейсмических кос и минимального набора дополнительных технических средств;
2. Широкая полоса покрытия с достаточной дискретизацией геологической среды;
3. Возможность адаптации системы наблюдений и параметров съёмки к конкретным техническим и геологическим условиям.

В качестве приёмного массива предлагается использовать две многоканальные косы, оголовье которых буксируется с использованием выстрелов или параванов, а хвостовые части соединены вместе (рис. 1). При буксировке описанным способом набегающий поток воды приведет к изменению формы сейсмических кос, которая может быть с высокой точностью аппроксимирована цепной линией. Для возбуждения упругих колебаний предлагается использовать излучатель типа «спаркер». Для повышения продуктивности предлагается использовать два излучателя, срабатывающих попеременно.

Характеристики системы наблюдений определяются расстоянием между оголовьями сейсмических кос и приёмными каналами, а также их количеством. Распределение удалений и азимутов зависит от положения источников упругих колебаний и вышеозначенных параметров. Таким образом, предложенная методика может быть легко адаптирована для проведения полевых наблюдений с практически любого судна при минимальных финансовых затратах.

Практическая апробация предложенной методики

Полевой эксперимент проводился в начале июля 2014 года в губе Ругозерская Кандалакшского залива Белого моря с борта НИС «Студент». Район исследований располагается в 4 км восточнее н.п. Пояконда и в 9 км западнее ББС МГУ (рис. 2). Всего было получено 22 профиля с межпрофильным расстоянием 3 метра на опытном полигоне размером 750 на 60 метров.

Для возбуждения упругих колебаний использовался многоэлектродный электроискровой излучатель типа «спаркер», буксировавшийся в 3 метрах за кормой судна. Энергия (100 Дж) на излучатель подавалась высоковольтным источником CSP-D 2400 два раза в секунду. Средняя скорость движения судна составляла 1,2–1,5 м/с (примерно 2,5 узла), что обеспечило среднее расстояние между пунктами возбуждения порядка 0,625 метра. Центральная частота сигнала составляла порядка 750 Гц, поэтому приёмноизлучающая система буксировалась на глубине 0,5 метра.

Приёмная часть состояла из двух 16-канальных аналоговых сейсмических кос и станций Геонт-Шельф на базе 14-разрядного АЦП. Буксировка кос осуществлялась с двух выстрелов, длиной около 4,5 метров, расположенных по бортам судна. Это обеспечило разнос первых каналов сейсмических кос на 12 метров друг от друга. Для получения необходимой формы приёмной системы хвостовые части кос были соединены вместе. Схема взаимного расположения элементов приёмноизлучающей системы во время проведения полевого эксперимента показана на схеме (рис. 1).

Географическая привязка пунктов наблюдений и навигация судна осуществлялась при помощи дифференциального ГНСС-приёмника C-Nav 3050. Его отличительной особенностью является возможность получения дифференциальных поправок через спутники Inmarsat, что обеспечивает дециметровую точность наблюдений.

Предварительная обработка и анализ полученных результатов

Предварительная обработка трёхмерных сейсмоакустических данных выполнялась в программном пакете RadExPro Professional 2014.2. Перед началом обработки из исходных файлов в формате SEG-Y были выбраны все сейсмограммы, относящиеся к площади исследований. Всего в пределах изучаемого полигона было зарегистрировано 25 000 сейсмограмм общего пункта возбуждения, общим объемом около 3,2 Гб. Для детального анализа был выбран участок сейсмического куба размером 600 × 60 метров.

Для обработки данных применялся следующий граф обработки:

1. Загрузка полевых сейсмограмм двух кос в формате SEG-Y в систему обработки;
2. Редакция заголовков сейсмических трасс;
3. Ввод статических поправок за аппаратурную задержку;
4. Расчет и присвоение геометрии наблюдений, контроль качества;
5. Амплитудная коррекция за сферическое расхождение и полосовая фильтрация;
6. Подавление помех-выбросов с использованием фильтрации в частотно-временной области;
7. Уменьшение влияния волн-спутников с использованием адаптивной рекурсивной фильтрации;
8. Сортировка данных по методу ОГТ;
9. Балансировка амплитуд;
10. Расчет и ввод статических поправок за приливно-отливные течения;
11. Ввод кинематических поправок и суммирование по методу ОГТ.

В результате проведенной обработки был получен сейсмоакустический куб с размером бина 0,5 × 0,5 метра. Средняя кратность составила 5. На карте распределения кратности (рис. 3) видны зоны повышенной и пониженной кратности, связанные с неточным соблюдением проектных профилей съёмки во время проведения полевых

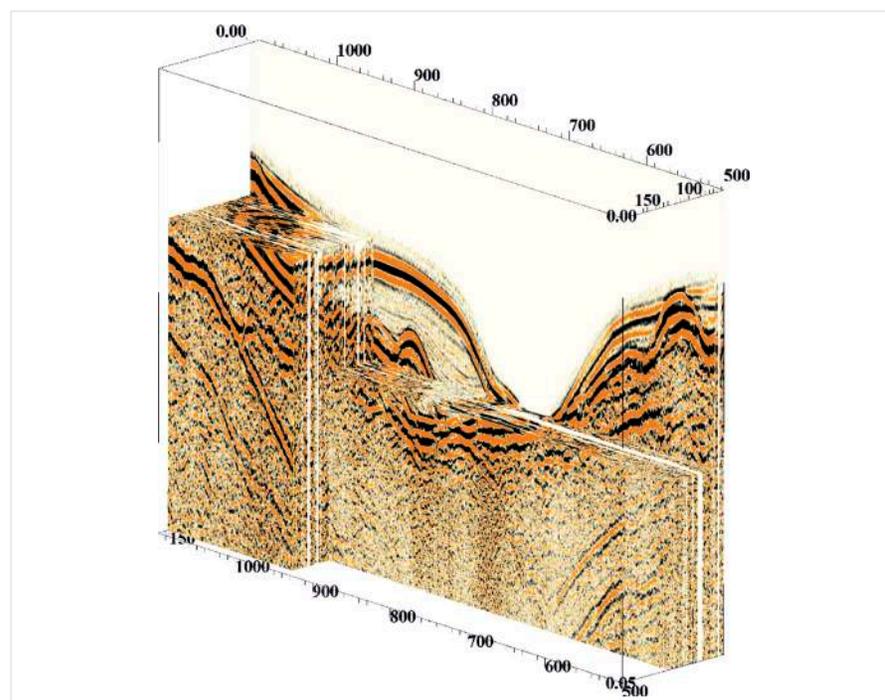


Рис. 5 — Объемное изображение сейсмоакустического куба после предварительной обработки

наблюдений. Для получения высокого качества сейсмоакустических данных важно обеспечивать равномерное покрытие исследуемой площади. На этапе регистрации данных необходимо в режиме реального времени производить построение карт кратности и до завершения полевых работ планировать выполняющие профили.

Важным этапом обработки трёхмерных сейсмоакустических данных является расчет статических поправок за приливно-отливные течения. Изменение уровня воды за все время проведения полевых работ составило до 1,5 метров. Поскольку соседние линии съемки могут выполняться в различное время, то при суммировании будет происходить статические сдвиги, приводящие к образованию ложных границ. Для расчета поправок использовались как априорные данные об уровне воды, так и статистические методы, основанные на анализе времен регистрации волн, отраженных от поверхности дна.

На представленных ниже временных срезах сейсмоакустического куба (рис. 4) и его объемном изображении (рис. 5) прослеживается понижение в рельефе, сформированным моренными отложениями, заполненное четвертичными осадками.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив ББС МГУ за помощь при проведении полевых работ,

а также ООО «Деко-геофизика СК» за предоставленное программное обеспечение. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет Программы развития Московского университета.

Итого

Результаты практической апробации предложенной методики в акватории Кандалякшского залива показали, что предлагаемая методика трёхмерных сейсмоакустических наблюдений может применяться для детального изучения верхней части донных отложений. Использование стандартного сейсмоакустического оборудования снижает стоимость проведения полевых наблюдений, при этом параметры приёмноизлучающей системы могут изменяться в широких пределах и адаптироваться для решения конкретной инженерно-геологической задачи.

Выводы

Для решения различных инженерно-геологических задач на мелководных акваториях эффективно применение трёхмерных сейсмоакустических наблюдений, особенно в районах со сложным геологическим строением среды. Экономическая эффективность методики является ключевым фактором, определяющим возможность ее использования в рамках стандартного комплекса геофизических исследований.

Список используемой литературы

1. Kvalstad T.J. What is the current "Best Practice" in offshore Geohazard investigations? A State-of-the-Art Review. OTC 18545. Offshore Technology Conference, 2007.
2. OGP, Guidelines for the conduct of offshore drilling hazard site surveys, 2011, OGP Report No. 373-18-1.
3. Games K.P. Shallow gas detection – why HRS, why 3D, why not HRS 3D? First Break, 2012, Vol. 30, issue 10, pp. 67–75.
4. Henriët J.-P., Verschuren M. and Versteeg W. Very high resolution 3D seismic reflection imaging of small-scale structural deformation. First Break, 1992, Vol. 10, issue 3, pp. 81–88.
5. Games K.P., Wakefield N.D. The Successful Design, Development and Acquisition of a UHRS 3D Seismic Dataset, First Applied Shallow Marine Geophysics Conference, 2014.
6. Missiaen T. VHR marine 3D seismics for shallow water investigations: Some practical guidelines // Marine Geophysical Researches, 2005, Vol. 26, pp. 145–155.
7. Гайнанов В.Г., Шматков А.А., Шматкова А.А. Некоторые особенности обработки данных морских высокоразрешающих трёхмерных сейсмических исследований // ГЕОразрез. 2014. № 1, стр. 1–16.

ENGLISH

GEOPHYSICS

A new 3D ultra-high resolution seismic technique for shallow water studies

UDC 550.8

Authors:

Alexey A. Shmatkov — post-graduate student, department of seismics and geoacoustics, of geology faculty¹; shmatkovalex@gmail.com
Mikhail Y. Tokarev — senior teacher, department of seismics and geoacoustics, of geology faculty¹; tokarev@decogeo.com

¹Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

Abstract

The article describes a new 3D ultra-high resolution seismic technique for shallow water studies. Due to the growing volume of site-surveys, especially on the Arctic shelf of Russia, it has become an urgent task of improving the quality and reliability of the information obtained about the structure of the top of sub-bottom sediments. Relatively rare spatial network of single- and multichannel UHR seismic surveys does not allow mapping the most potentially dangerous geological hazards, thereby increasing the risks associated with construction and operation of engineering structures. 3D seismic surveys allow to obtain a detailed seismic image of the geological environment, but its application to geotechnical problems is limited by technological and economic factors, so that at

the moment there are individual techniques, which are used to solve practical problems. The proposed 3D UHR survey system can be composed from standard set of equipment and can be easily adapted to solve specific problems. The article discusses the results of field observations in Kandalaksha Bay of the White Sea.

Materials and methods

Acquisition of 3D ultra-high resolution shallow water seismic survey.

Results

The results of 3D UHR survey with using the proposed technique in Kandalaksha Bay of the White Sea showed that it can be used for a detailed study of the upper part of the sub-bottom sediment. Using the standard

seismic equipment reduces the cost of the field observations, the parameters of recording systems can vary widely and adapt to address specific engineering geological problem.

Conclusions

It is effective to use a 3D UHR seismic data to solve various geotechnical problems in shallow waters, especially in areas with complex geological environment. The economic efficiency of the method is a key factor in determining the possibility of its use in a standard set of geophysical research.

Keywords

ultra-high resolution seismics, 3D, UHR, VHR, three-dimensional, marine, technique, design, survey

References

1. Kvalstad T.J. What is the current "Best Practice" in offshore Geohazard investigations? A State-of-the-Art Review. OTC 18545. Offshore Technology Conference, 2007.
2. OGP, Guidelines for the conduct of offshore drilling hazard site surveys, 2011, OGP Report No. 373-18-1.
3. Games K.P. Shallow gas detection – why HRS, why 3D, why not HRS 3D? First Break, 2012, Vol. 30, issue 10, pp. 67–75.
4. Henriët J.-P., Verschuren M. and Versteeg W. Very high resolution 3D seismic reflection imaging of small-scale structural deformation. First Break, 1992, Vol. 10, issue 3, pp. 81–88.
5. Games K.P., Wakefield N.D. The Successful Design, Development and Acquisition of a UHRS 3D Seismic Dataset, First Applied Shallow Marine Geophysics Conference, 2014.
6. Missiaen T. VHR marine 3D seismics for shallow water investigations: Some practical guidelines. Marine Geophysical Researches, 2005, Vol. 26, pp. 145–155.
7. Gaynanov V.G., Shmatkov A.A., Shmatkova A.A. *Nekotorye osobennosti obrabotki dannykh morskikh vysokorazreshayushchikh trekhmernykh seysmicheskikh issledovaniy* [Features of the high resolution marine 3D seismic data processing]. *GEORazrez*, 2014, issue 1, pp. 1–16.