



РАЙОН ОКСАФЬЕРДУР, ГРЕНЛАНДСКОЕ МОРЕ: ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА В ГОЛОЦЕНОВОМ ОСАДОЧНОМ СЛОЕ, ВЫЗВАННОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

✉ Смагличенко Т.А.¹, Саянкина М.К.¹, Смагличенко А.В.²

¹ФГБУ «Институт проблем нефти и газа РАН», Москва, Россия

²ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Россия
✉ t.a.smaglichenko@gmail.com

Согласованность сейсмического лучевого трассирования и экспериментальных наблюдений позволяет адекватно оценить свойства геологических структур, в том числе поверхностных форм, отвечающих рельефу. В данной статье для улучшения точности моделирования двух градиентной сложно построенной среды мы представляем краткое описание новой разработки авторов - метода лучевой трассировки, сочетающего метод Эйлера и классические тригонометрические манипуляции. Лучевое моделирование двухслойной среды с постоянными градиентами внутри каждого слоя и горизонтальной границей на глубине 5 км было применено к территории высокоширотной Арктики, включающей район Оксафьердур потенциального месторождения нефти и газа на северо-востоке Исландии. Томографические изображения (до глубины 10 км), получены на основе лучевого трассирования и инновационного метода решения обратной задачи. Верхний слой (0-5 км) впервые сопоставляется с геологической картой побережья. Второй слой (5-10 км) демонстрируется впервые. Мы полагаем, что осадочная толща района имеет местами мощность на 1 км больше, чем это предполагалось в предыдущих исследованиях по данным бурения. Важнейший результат в том, что из-за сильного землетрясения в осадочном слое возникла высокоскоростная аномалия, контрастирующая с низкоскоростной в месте локализации гипоцентра сильного землетрясения.

Ключевые слова: локальные сейсмические события, томография глубоких слоев, новый метод лучевого трассирования, месторождения нефти и газа, Оксафьердур, Гренландское море

В Северной Атлантике линия многочисленных землетрясений проходит вдоль хребта Рейкьянес. Он пересекает центральную часть Исландии, а затем продолжает своё развитие вдоль хребта Кольбейнсей на севере Исландии в Гренландском море. Сейсмическая активность определяет геометрию Североамериканской и Евразийской плит, первая из которых движется на восток, а вторая – на запад со смещением 1–3 см/год [Lawver and Muller, 1994]. Плиты движутся вдоль зоны разломов Тьёрнес [De Mets et al., 2010], которая расположена в Гренландском море между северо-восточной частью Исландии и хребтом Кольбейнсей. Зона Тьёрнес, значимая для направления перемещения плит, включает два основных линеамента: разлом Хусавик-Флатей, частично выходящий на сушу, и линеамент Гrimsey, определяемый морскими землетрясениями. Разлом Хусавик-Флатей пересекает залив Скьяльфанди в центральной части зоны Тьёрнес, в то время как соседний расположенный восточнее линеамент Гrimsey, врезается в побережье залива Оксафьердур, сохраняя некоторую симметрию между его берегами. Батиметрическая съемка морского дна обеих заливов выявила рельефные неровности в виде вытянутых и круглых впадин, которые по исследованию авторов работы [Richter et al., 2005], связаны с тектоникой в виде линеаментов, внедряющихся в дно океана. Фотосъемка и данные акустики показали просачивание газа через отложения линеаментов, которые периодически меняют цвет и плотность. Собранные немногочисленные керны подтвердили газонасыщенность отложений. Образцы содержали метан биогенного происхождения. Обнаружены полициклические ароматические углеводороды, которые часто связывают с месторождениями нефти и газа. Моделирование пластов обычного и бурого угля показало, что с большой вероятностью эти залежи могут быть нефтематеринской породой.

Ранее мы анализировали выявленные в прибрежной части залива Скьяльфанди аномалии сейсмической скорости в диапазоне глубин 5-10 км, проектируя их на рельеф [Смагличенко и др., 2024]. В данной работе мы исследуем двухслойное томографическое изображение скорости, полученное в пределах 0-5 и 5-10 км инновационным вариантом метода координатного спуска, геофизическая оригинальная идея которого была предложена член-корр. РАН А.В. Николаевым. Отметим, что в другой работе [Смагличенко, 2019] детально изучена сейсмическая модель вдоль разлома Гrimsey, оцененная методом Модификации Гауссовского исключения, созданного первым автором данной статьи.

Известно, что томография это результат решения системы алгебраических уравнений, правая часть которой определяется вектором разницы между реальными наблюдениями времени пробега сейсмической волны и значениями, рассчитанными в соответствии с теоретическими моделями, которые, как правило, описывают вертикально неоднородные среды, имеющими постоянный градиент линейного изменения скорости с глубиной. Однако на практике отклонения экспериментальных данных от модельных значений бывают колоссальными, и тогда построенная система не может быть адекватно решена. Причиной подобных ситуаций может быть несколько. Основная – это сложность геологического строения при прохождении сейсмического луча от источника к приемнику. Так, для томографического просвечивания района Оксрафтердур использовались события, гипоцентры которых были распределены вокруг и вдоль хребта Кольбейнсей, а также выстраивались вдоль разлома Гrimsey. Согласно исследованию [Brandsdottir et al., 2004] батиметрия вдоль хребта неравномерна, становится мельче по направлению к морю, и распределение впадин субпаралельно линеаменту Гrimsey. Это означает, что на пути к станциям, расположенным на берегу, луч мог пересечь горизонтальную границу впадины и попасть в среду с другими геологическими свойствами. Если этого не происходило, то распространение луча укладывалось в рамки более простой модели поверхностного слоя. Так как для всего множества используемых данных разница между экспериментальными значениями времен пробега и теоретическими модельными значениями не была в пределах требуемой точности, то понадобилось разрабатывать лучевую трассировку для более сложной двух градиентной модели, которая имела два слоя. Первый характеризовался постоянным градиентом линейного изменения скорости с определенными числовыми значениями, а второй имел другие характеристики градиента. Горизонтальная граница между двумя базовыми слоями предполагалась известной. Следующая секция дает краткое описание нового метода лучевого трассирования, который обеспечивает точные формулы для центральных углов, определяющих точную траекторию луча от источника к приемнику.

Новый метод трассировки лучей в сложно построенной двух градиентной среде. Точное определение кривой пути сейсмического луча при заданном положении источника и приемника, предполагает вычисление угла падения под станцию-приемник. Рисунок 1 демонстрирует схему распространения луча для двух градиентной модели в плоскости луча (w, z). Источник и приемник показаны как окружность и треугольник, соответственно (рис.1). Граница перехода луча из среды, имеющей свои параметры линейной зависимости скорости с глубиной, в среду с другими параметрами представлена горизонтальной прямой z_{bd} . Точка пересечения двух окружностей, соответствующих системе кривых распространения волн в двух средах обозначена как (w^*, z^*).

Отметим следующие исторические сведения. В 60-е годы угол рассчитывался по показаниям сейсмографов и гальванометров, настроенных на разные длины волн. Инструментальные данные хранились на экспедиционной станции «Арктическая» (НИИГА) и станции «Хейс» (полярная станция Кренкеля, о. Хейса), расположенных на острове Земля Александры. Для определения зависимости «кажущейся» скорости от глубины по показаниям приборов, советский геофизик Е.Ф. Саваренский разработал дифференцированный метод на основе двух формул Бенндорфа и Вихерта-Чибисова

[Саваренский, 1952]. В настоящее время на архипелагах Новой Земли функционирует только одна постоянно действующая станция, которая включена в автоматическую систему мониторинга Единой Геофизической Службы Российской Академии Наук. Станция была установлена в 2023 г.

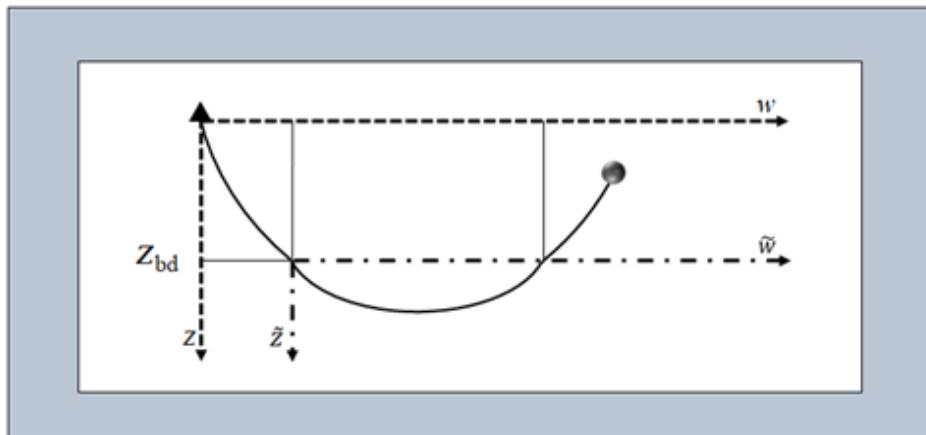


Рис.1. Иллюстрация поведения луча в двух градиентной среде при заданных начальных условиях.

В более ранних публикациях авторов настоящей статьи, например в [Smaglichenko et al., 2016, 2018] использовалось решение системы дифференциальных уравнений Эйлера, описанное авторами [Антонова и Матвеева, 1975] для случая одно градиентной модели. Апробация формул, определяющих координаты точек сейсмического луча в такой среде, для системы двух окружностей, показала, что возникает ошибка при соединении точек станции приемника и источника. Поэтому было получено новое математическое решение, учитывающие физику распространения волн в сложной двух градиентной среде.

Следующие шаги составили основу алгоритма. Для среды первого градиента была выведена формула, связывающая угол падения на приемник и угол падения на границу двух градиентов. Чтобы это осуществить использовалось свойство обратимости хода лучей. Для каждого из названных углов определялась функция их тангенсов через параметры, описывающие рост скорости с глубиной в первой одно градиентной среде. Связь между тангенсами углов устанавливалась путем деления одного уравнения на другое.

Согласно закону Снеллиуса, была получена формула для известного тригонометрического соотношения между синусом угла падения на граничную глубину и синусом угла преломления через параметры первого и второго градиентов. Тангенс угла преломления определялся через параметры среды второго градиента по алгоритму, который уже использовался для углов в среде первого градиента. Применяя известное тригонометрическое уравнение, связывающее синус и функцию арктангенса, была получена формула для вычисления квадрата синуса угла преломления в среде второго градиента. Таким образом, квадрат синуса угла преломления определялся дважды через закон Снеллиуса и с использованием известного тригонометрического тождества. Приравнивая соответствующие части, была определена формула для вычисления синуса угла падения на границу двух градиентов. В эту формулу входят параметры, как первого, так и второго градиентов. Снова применяя тригонометрическое уравнение, связывающее функцию синуса и функцию арктангенса для угла падения на граничную глубину, была выведена искомая формула для определения угла падения луча на приемник через квадрат его тангенса.

Таким образом, стратегия метода заключается в следующем. Необходимо найти «перекрестный» угол, который будет определяться дважды. С одной стороны он будет связан с углом падения на приемник для хода луча в среде первого градиента, а с другой стороны он будет выражаться через параметры, описывающие среду второго градиента.

Простая подстановка формулы для «перекрестного» угла, полученной для направления, определяемого средой второго градиента в выражение для направления, определяемого средой первого градиента, даст в последующей манипуляции искомую формулу для ключевого угла падения на приемник.

Итак, если ранее в 60-е годы арктическим экспедициям необходимо было устанавливать сейсмографы и гальванометры, чтобы рассчитать по показаниям угол падения луча на станцию, то современное математическое моделирование выполняет эту задачу с помощью инструментов прикладной математики. Соответственно, скорость волны в поверхностной части геологического разреза может быть уточнена по невязкам – отклонениям модельных значений от наблюденных для множества сейсмических лучей, приходящих под станцию с различных направлений.

Результат томографического разреза для первого слоя в диапазоне глубин 0-5 км. Метод, описанный выше, использовался для вычисления невязок времен пробега, то есть для нахождения разницы между экспериментальными наблюдениями времен пробега сейсмических волн от землетрясений, произошедших в Гренландском море в пределах залива Оксфьордур и зафиксированных временными приемниками на берегу в 1987-1989 годах (решение прямой задачи). Зарегистрированные данные собраны благодаря работе экспедиции под руководством проф. Вольфганга Якоби (университет Йоханнеса Гутенберга в г. Майнц). Затем, невязки были входной информацией для решения системы алгебраических уравнений (обратная задача) разработанным авторами вариантом метода координатного спуска. Полученные низкоскоростные и высокоскоростные аномалии отмечены на рисунке 2 оттенками оранжевого и синего цвета. Точками обозначены гипоцентры событий, которые относятся к данному слою. Сплошная линия показывает положение разлома Гrimsey.

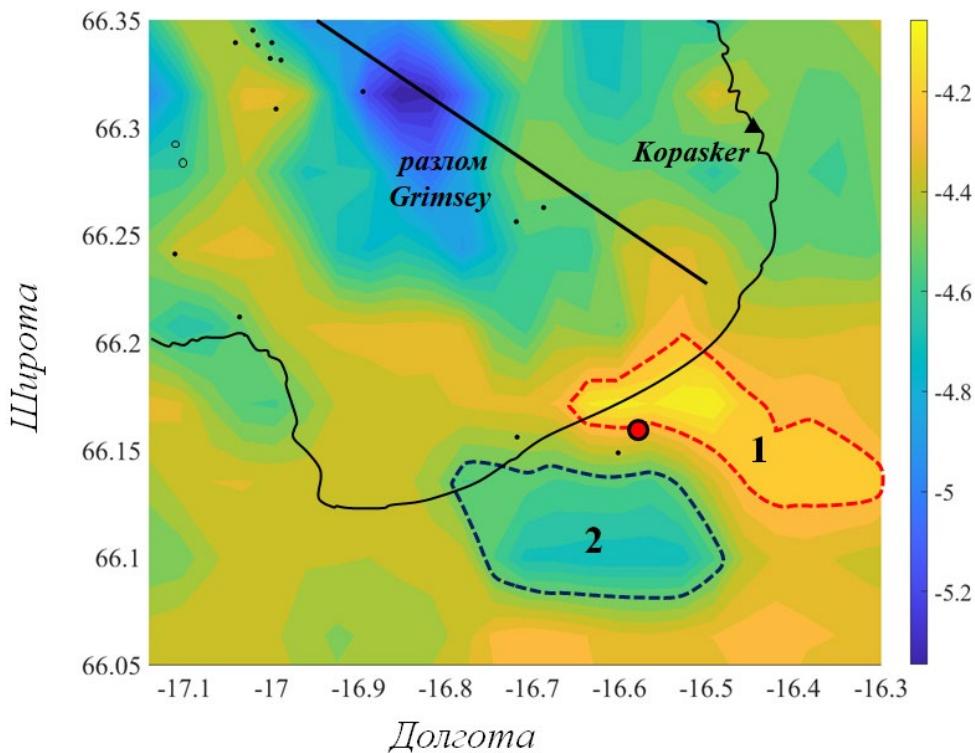


Рис.2. Томография первого слоя 0-5 км. Основные сейсмические аномалии (1-2) выделены пунктирной линией.

Сделаем важное замечание. В изучаемом районе в 1976 г. произошло одно из самых ощущимых сейсмических событий в Исландии, получившее название землетрясение Копаскер ($M = 6.3$). Гипоцентр обозначен красным кругом на рисунке 2. Сейсмическая станция Копаскер показана с помощью треугольника. Наши результаты выявляют, что

гипоцентр землетрясения расположен на границе низкой и высокой скорости (аномалии 1-2 на рис. 2). Полученные оценки полностью согласуются с выводами японских коллег о том, что разрыв среды происходит на границе скоростных контрастов (см, например, [Murai et al., 2019]).

Трактовка результата с точки зрения геологической и геохимической информации. Рисунок 3 представляет подробную геологическую карту района Оксафьордур [Geological map of Iceland, 1998]. Центральное место занимают голоценовые осадки, расположенные на побережье.



Рис.3. Район Оксафьордур. Геологическая карта и легенда. Сейсмические аномалии (1-2), выделены пунктиром в соответствии с их локацией на рис.2.

Бассейн зоны Тьёрнес, включающий три грабена, в том числе Оксафьордур, образовался в миоцене (7-9 млн. лет назад). С тех пор бассейн накопил осадочную толщу мощностью 0,5-4 км [Richter et al., 2002]. Прибрежные морские отложения обнажаются на полуострове. В 1989 году газовые выбросы термогенных углеводородов были

обнаружены во время колонкового бурения в восточном бассейне Оксрафтердур. Анализ выбросов природного газа выявил наличие углеводородов (метан-гексан) в высоких концентрациях. По мнению авторов [Richter et al., 2002], слои Тьёрнес термически незрелы с точки зрения генерации нефти. Однако, судя по тектонической истории, это, вероятно, признак минимальной зрелости, поскольку органический геохимический анализ и моделирование созревания показывают, что высокий геотермический градиент усиливает образование сухих и влажных газов и парафинистой нефти. Итак, геологические и геохимические исследования показывают, что район потенциально нефтегазоносен до глубины 4 км, где сосредоточены осадки. Наши геофизические результаты подтверждают, что приблизительно на этой глубине происходит скачок градиента сейсмической скорости. Проведенное нами математическое моделирование предполагает, что мощность осадочного слоя может быть местами больше на 1 км. Известно, что слой осадков часто связывают с занижением сейсмической скорости. А в нашем случае мы имеем высокоскоростную аномалию, которая соседствует с низкоскоростной в осадочной толще.

Это может быть объяснено следующим образом. Землетрясение Копаскер произошло в 1976 г. Мы обработали данные локальных сейсмических событий, которые произошли всего на 11-13 лет позже в 1987-1989 гг. Возможно, что после землетрясения геологическая среда претерпела внутреннее движение пород под воздействием тектоники в более глубокой толще вблизи гипоцентра. Перемещение высокоскоростных масс произошло из слоя 5-10 км в приповерхностный слой осадков, что и показала томография в виде аномалии 2 (рис.2, рис. 3).

Результат томографического разреза для второго слоя в диапазоне глубин 5-10 км. Рисунок 4 иллюстрирует сейсмические аномалии во втором слое предполагаемого скачка градиента. Точки соответствуют положению гипоцентров событий, которые относятся к данному слою. Сплошная линия показывает разлом Гимсей. Красным кругом обозначена проекция гипоцентра землетрясения Копаскер, произошедшего в верхнем слое.

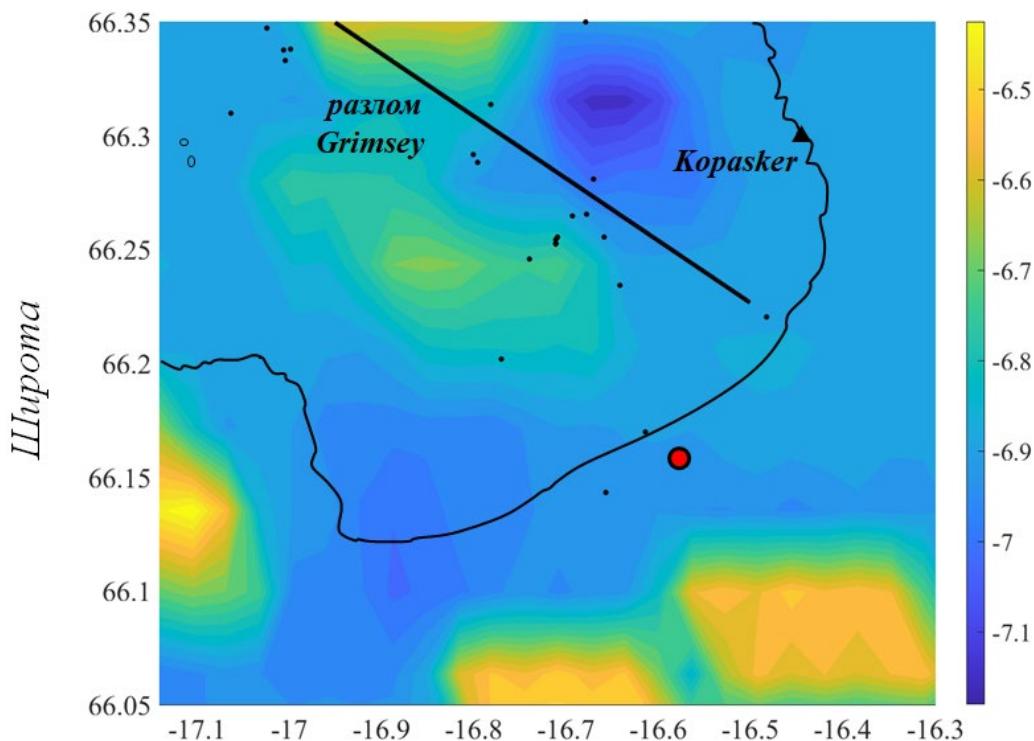


Рис.4. Томография второго слоя 5-10 км.

Анализ показал тенденцию распределения гипоцентров локальных сейсмических событий, имеющих малые магнитуды. В основном, они находятся на границе низкоскоростных и высокоскоростных аномалий. Такая же закономерность наблюдается для верхнего слоя.

Выводы. Мы установили, что гипоцентр сильного землетрясения, произошедшего в осадочной толще голоцен, находится на границе низкой и высокой сейсмической скорости. Объяснением этого факта является предположение о том, что в результате землетрясения произошло тектоническое перемещение высокоскоростной породы, расположенной в более глубоком слое 5-10 км, на поверхность. Локальные события малых магнитуд также имеют тенденцию для локализации гипоцентров на границах контрастов, как показало глубинное сейсмическое просвечивание. Карттирования батиметрии, геохимический анализ газов, присутствие полициклических ароматических углеводородов, изучение пластов обычного и бурого угля (см, например, [Richter et al., 2002, 2005; Brandsdottir et al., 2004]) с большой вероятностью указывают на нефтегазоносность района. Следовательно, планирование процесса добычи должно сопровождаться предварительной томографией резервуаров до глубин бурения с целью предотвращения опасности возникновения разрушительного землетрясения, которое приведет к экономическим затратам.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № FZEG-2024-0016 и в рамках темы «Фундаментальный базис инновационных, цифровых технологий прогноза, поиска, разведки и освоения нефтегазовых ресурсов (фундаментальные, поисковые, прикладные, экономические и междисциплинарные исследования до 2030 года)» № 125021302095-2).

ЛИТЕРАТУРА

Антонова Л.Н., Матвеева Н.Н. Кинематика волн в трёхмерных блоково-градиентных средах // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. 1975. С. 78-89.

Саваренский Е.Ф. Об углах выхода сейсмической радиации и некоторых смежных вопросах // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. 1952. №15 (142). С. 1-109.

Смагличенко Т.А. Природный барьер для удержания высоких концентраций газов: метана и углекислого газа, метана и водорода при гидротермальных выбросах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Выпуск 4 (27). doi:10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art11

Смагличенко Т.А., Саянкина М.К., Смагличенко А.В. Связь между видимым рельефом и невидимой глубинной сейсмической структурой в субарктическом районе побережья залива Гренландского моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Выпуск 11. С. 346-351. doi:10.24412/2687-1092-2024-11-346-351

Brandsdottir B., Richter B., Riedel C., Dahn T., Helgadottir G., Kjartansson E., Detrick R., Magnusson A., Asgrimsson A.L., Palsson B.H., Karson J., Saemundsson K., Mayer L., Calder B., Driscoll N. Tectonic details of the Tjornes Fracture Zone, an onshore-offshore ridge-transform in N-Iceland // Eos Trans AGU. 2004. Vol. 85(47). F1071.

De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // Geophysical Journal International. 2010. Vol. 181. Is. 1. P. 1-80. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x

Geological map of Iceland. Reykjavik: Icelandic Institute of Natural History. 1998.

Lawver L., Muller R. Iceland hotspot track // Geology. 1994. Vol. 22. Is. 4. P. 311-314. doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0311:IHT>2.3.CO;2

Murai Y., Katsumata K., Takanami T., Watanabe T., Yamashina T., Cho I., Tanaka M., Azuma R. Seismic velocity structure in southern Hokkaido deduced from ocean-bottom seismographic and land observations // Japan Geoscience Union Meeting. 2019. SSS12-02.

Richter B., Brandsdottir B., Detrick R., Helgadottir G., Kjartansson E., Gunnarsson K., Driscoll N., Kent G. Indications of Hydrocarbons in the Tjornes Basin North Iceland // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2002. Id. OS71C-0306.

Richter B., Brandsdottir B., Geptner A., Driscoll N., Boejesen-Koefoed J. Hydrocarbon prospect of the Tjornes Fracture Zone, north of Iceland // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2005. Id. OS33C-1487.

Smaglichenko T., Bjarnason I., Smaglichenko A., Jacoby W.R. Method to find the minimum 1D linear gradient model for seismic tomography // Fundamenta Informaticae. 2016. Vol. 146. Is. 2. P. 211-217. doi: 10.3233/FI-2016-1382

Smaglichenko T.A., Smaglichenko A.V., Zelinka I., Chigarev B. Seismic attractor can assist in finding of geothermal area? // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. 2018. Vol. 33(5). P. 503-512. doi: 10.1080/17445760.2017.1419349

THE OKSAFJORDUR AREA, GREENLAND SEA: MATERIAL MOVEMENT IN THE HOLOCENE SEDIMENTARY LAYER EARTHQUAKE-INDUCED

Smaglichenko T.A.¹, Sayankina M.K.¹, Smaglichenko A.V.²

¹Research Oil and Gas Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Consistency between seismic ray tracing and experimental observations enables an accurate assessment of the properties of geological structures, including surface forms that correspond to the relief. In this paper, we present a brief description of a newly developed ray tracing method that combines the Euler method and classical trigonometric manipulations to improve the accuracy of modeling a complex two-gradient medium. Ray tracing modeling in a two-layer medium with constant gradients within each layer and a horizontal boundary at a depth of 5 km was applied to the Arctic region, including the Oxafjordur area, a potential oil and gas field in northeastern Iceland. Tomographic images (to a depth of 10 km) were obtained using ray tracing and an innovative inverse problem solution. The upper layer (0-5 km) is compared for the first time with a geological map of the coast. The second layer (5-10 km) is demonstrated for the first time. We suggest that the sedimentary layer in the area is locally 1 km thicker than the estimations based on drilling data by other researchers. The most important result is that the strong earthquake created a high-velocity anomaly in the sedimentary layer, which contrasts with the low-velocity anomaly at the location of the strong earthquake's hypocenter.

Keywords: local seismic events, deep tomography, new ray tracing method, oil and gas fields, Oxafjordur, Greenland Sea

REFERENCES:

- Antonova L.N., Matveeva N.N. Kinematics of waves in three-dimensional block-gradient media // Issues of the dynamic theory of seismic wave propagation. 1975. P. 78-89. (in Russian).
- Savarensky E.F. On the angles of seismic radiation emission and some related issues // Proceedings of the Geophysical Institute of the USSR Academy of Sciences. 1952. N. 15 (142). P. 1-109. (in Russian).
- Smaglichenko T.A. The natural barrier to retention of the high concentration of gases: methane and carbon dioxide, methane and hydrogen under hydrothermal vents // Current issues in oil and gas. 2019. Vol. 4 (27). doi: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art11
- Smaglichenko T.A., Sayankina M.K., Smaglichenko A.V. Relationship between visible relief and invisible deep seismic structure in the subarctic coastal area of Bay in the Greenland Sea // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2024. Vol. 11. P. 346-351. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-346-351
- Brandsdottir B., Richter B., Riedel C., Dahn T., Helgadottir G., Kjartansson E., Detrick R., Magnusson A., Asgrimsson A.L., Palsson B.H., Karson J., Saemundsson K., Mayer L., Calder B., Driscoll N. Tectonic details of the Tjornes Fracture Zone, an onshore-offshore ridge-transform in N-Iceland // Eos Trans AGU. 2004. Vol. 85(47). F1071.

- De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // Geophysical Journal International. 2010. Vol. 181. Is. 1. P. 1-80. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x*
- Geological map of Iceland. Reykjavik: Icelandic Institute of Natural History. 1998.*
- Lawver L., Muller R. Iceland hotspot track // Geology. 1994. Vol. 22. Is. 4. P. 311-314. doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0311:IHT>2.3.CO;2*
- Murai Y., Katsumata K., Takanami T., Watanabe T., Yamashina T., Cho I., Tanaka M., Azuma R. Seismic velocity structure in southern Hokkaido deduced from ocean-bottom seismographic and land observations // Japan Geoscience Union Meeting. 2019. SSS12-02.*
- Richter B., Brandsdottir B., Detrick R., Helgadottir G., Kjartansson E., Gunnarsson K., Driscoll N., Kent G. Indications of Hydrocarbons in the Tjornes Basin North Iceland // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2002. Id. OS71C-0306.*
- Richter B., Brandsdottir B., Geptner A., Driscoll N., Boejesen-Koefoed J. Hydrocarbon prospect of the Tjornes Fracture Zone, north of Iceland // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2005. Id. OS33C-1487.*
- Smaglichenko T., Bjarnason I., Smaglichenko A., Jacoby W.R. Method to find the minimum 1D linear gradient model for seismic tomography // Fundamenta Informaticae. 2016. Vol. 146. Is. 2. P. 211-217. doi: 10.3233/FI-2016-1382*
- Smaglichenko T.A., Smaglichenko A.V., Zelinka I., Chigarev B. Seismic attractor can assist in finding of geothermal area? // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. 2018. Vol. 33(5). P. 503-512. doi: 10.1080/17445760.2017.1419349*