doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-346-351

## СВЯЗЬ МЕЖДУ ВИДИМЫМ РЕЛЬЕФОМ И НЕВИДИМОЙ ГЛУБИННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ В СУБАРКТИЧЕСКОМ РАЙОНЕ ПОБЕРЕЖЬЯ ЗАЛИВА ГРЕНЛАНДСКОГО МОРЯ

⊠ Смагличенко Т.А.<sup>1</sup>, Саянкина М.К.<sup>1</sup>, Смагличенко А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), Москва, Россия <sup>2</sup>Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Россия *istasmaglichr@gmail.com* 

Впервые томографические изображения сейсмической скорости с высоким разрешением для слоя 5-10 км были детально сопоставлены с рельефом побережья залива Скьяльфанди (северная Исландия). Глубокозалегающие аномалии с одинаковыми значениями скорости были выявлены на западном и восточном побережьях. Анализ числовых значений показал, что неоднородные структуры представляют собой платобазальты, которые образовались на глубине 10 км и в основном проявились в виде возвышенностей рельефа на поверхности.

Ключевые слова: Субарктика, нефтегазоносность, сейсмические скорости, инновационный метод томографии, рельеф, глубинная структура

В данной работе мы исследуем результаты визуализации значений скорости продольных волн, распространяющихся от локальных землетрясений, расположенных в Гренландском море, через побережье залива Скьяльфанди. Со стороны моря на побережье врезается широкая зона океанического трансформного разлома Хусавик-Флатей, включающая ряд разломных сегментов. Рисунок 1 демонстрирует проекцию основной плоскости разлома, который распространяется с северо-запада на юго-восток и проходит в непосредственной близости к известному туристическому городу Хусавик. Согласно геодезическим измерениям [Merzger et al., 2014] разлом имеет расчетную скорость скольжения (сдвигового движения) 6–9 мм/год. Большинство деформаций вдоль разлома обусловлено роями сейсмической активности [Roland, McGuire, 2009]. На горе, имеющей ледниковые отложения, у подножия которой, находится г. Хусавик, были обнаружены смещения, способствующие скольжению разлома [Harrington, 2015]. Недалеко от г. Хусавик были вырыты две траншеи для изучения палеосейсмичности. По данным наблюдений выявлены свидетельства двух землетрясений, произошедших в четвертичном периоде (в голоцене) [Samundsson, Karson, 2006]. Координаты этих землетрясений не совпадают с имеющейся исторической информацией о шести землетрясениях, произошедших в прошлых веках, среди которых значимыми являются события 1755 и 1872 гг., вызвавших разрушительные цунами [Magnusdottir et al. 2015]. Интерпретации раскопок, данные дистанционного зондирования, геоморфологические маркеры позволили автору Джону Харрингтону [Harrington, 2015] сделать вывод о проявлении ледниковых смещений четвертичного периода на склоне горы вблизи г. Хусавик.

В настоящей статье мы фокусируем внимание на глубинной сейсмической структуре, полученной в пределах побережья залива, в том числе под горной местностью района г. Хусавик. Аномальные сейсмические контрасты вычислены, используя инновационный метод томографии, разработанный в Институте Проблем Нефти и Газа РАН (ИПНГ РАН) авторами данной статьи [*Smaglichenko T., Smaglichenko A., 2023*]. Для анализа отобраны результаты только высокого разрешения, которое характеризует глубины 5-10 км. Полученная информация о сейсмической структуре в верхнем слое 0-5 км не демонстрируется в виду того, что параметры разрешения для этого слоя имеют малые значения. В то же время следует отметить актуальность результата для более

глубокого слоя 5-10 км. Известно, что основная доля запасов нефти и газа Западной Сибири залегает на глубинах более 4 км [*Новатэк*, 2024], соответствуя ачимовским и очень древним юрским отложениям, имеющим сложную конфигурацию.

Важно заметить, что залив Скьяльфанди является территорией потенциальной нефтегазоносности. На это указывают выбросы метана в осадочном слое, которые происходят в морской части залива до глубины 4 км [Richter et al., 2005], а также локализация полициклических ароматических углеводородов в поверхностных отложениях [Geptner et al., 2006]. В нашем исследовании мы пытаемся ответить на вопрос, есть ли некоторая корреляция между глубоко залегающими неоднородностями и породами рельефа, который виден на поверхности?

Кратко опишем использованные данные инструментальных наблюдений и сейсмической томографии. С помощью временной сети применяемый метод сейсмоприемников, которая была установлена на побережье залива Скьяльфанди в 1987 г. группой исследователей под руководством проф. Вольфганга Якоби (университет Йоханнеса Гутенберга в г. Майнц), были зарегистрированы времена прихода Р-волн от местных микроземлетрясений, произошедших в 1987-1989 годах в Гренландском море, на севере Исландии. База данных, содержащая информацию о координатах гипоцентров, приемниках сейсмического сигнала, времени начала сейсмических событий, была использована для формирования известного вектора линейной алгебраической системы, которая решалась новым вариантом алгебраического метода координатного спуска [Smaglichenko et al., 2021, Smaglichenko T., Smaglichenko A., 2023].Значения параметров разрешения были вычислены, используя разработанное аналитическое решение [Smaglichenko T., Smaglichenko A., 2021].



Рис. 1. Карта рельефа побережья залива Скьяльфанди. Проекция основной плоскости трансформного разлома Хусавик-Флатей обозначена сплошной прямой линией.

Исходная идея применяемого метода принадлежит геофизику, член-корр. РАН А.В. Николаеву. А именно, значения вариаций (аномалий) сейсмической скорости относительно средней скорости в слое, вычислялись по приближенной формуле для каждого блока геологической среды, через которую прошли сейсмические лучи. Далее

выбиралось максимальное значение, которое затем вычиталось из общего численного поля. После вычитания можно было снова определить максимальное значение, но уже для обработанного поля. Процесс повторялся до «вычищения» всех максимумов. На «алгебраический язык метод был переведен» первым автором статьи.

Карта рельефа побережья залива Скьяльфанди (рис.1) показывает низменности (желтый и зеленый цвет), возвышенности (коричневый цвет) и ледовые покрытия (белый цвет). Изображение построено с использованием программы GMT и данных глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2. ASTER GDEM является продуктом METI и NASA. На карте крестик обозначает г. Хусавик, который расположен у подножия горы Хусавикурфьялл (66°02'46" с.ш. 17°18'06"з.д.) на восточном берегу залива Скьяльфанди. Как отмечено выше, в данной статье мы анализируем только аномалии высокого разрешения, которые проектируются на рельеф побережья (суши). Найденные на глубине 5-10 км три неоднородности (аномалии) выделены пунктирной линией (рис.2), из них две высокоскоростные аномалии имеют синий цвет, низкоскоростная аномалия в центре содержит оттенки желтого и красного. Низкие и высокие аномалии это отклонения от средней скорости в слое (зеленый цвет на шкале). Шкала соответствует значениям Vp, скорости прохождения продольной Р-волны. Для каждой неоднородности в соответствии с их географическими координатами были определены фрагменты рельефа (рис.2). Далее мы проанализировали сейсмические скорости, которые характеризуют видимые породы на поверхности, и сравнили их со значениями полученной скорости Vp на глубине 5-10 КМ.



Рис. 2. В центре – полученный результат сейсмической томографии для диапазона глубин 5-10 км. Неоднородности, изучаемые в настоящей статье, обведены пунктирной линией. Каждой неоднородности соответствует фрагмент видимого на поверхности рельефа.

Отметим, что высокоскоростные аномалии расположены в западной и восточной части побережья залива Скьяльфанди на одной и той же широте. Вычисления показали, что скорость продольной волны имеет одинаковое значение и равно 6.97 км/с для обеих неоднородностей. Данное значение скорости не превышает пороговое значение для базальтов (7.2 км/с), которое может характеризовать нижний слой земной коры. Мы

полагаем, что найденное значение скорости *Vp*=6.97 км/с относится к базальтовой породе на глубине 5-10 км.

Рассмотрим изученные в работе [Гептнер, 2014] обнажившиеся породы, которые относятся к фрагменту рельефа с восточной стороны побережья (справа на рис.2) и включают территорию низменности вблизи порта Хусавик. Порода сложена из морены, которая на 70-80% состоит из базальтового стекла. Считается, что скорость в стеклобазальте соответствует скорости в базальте (нижняя граница 6.5 км/с). Так как морена включает также обломки тонкораздробленного материала, ледниковые валуны, то это занижает в целом скорость базальтовой породы. Считается, что скорость породы в горном массиве всегда выше. Вполне возможно, что эта скорость приближена к Vp=6.97 км/с, найденной томографией для диапазона глубин 5-10 км, но не превышает ее в связи с присутствием ледниковых покрытий. Так как аномалия с западной стороны побережья залива тоже имеет Vp=6.97 км/с на глубине 5-10 км, и ее рельеф представлен только горной местностью, то вполне вероятно, что горная местность на поверхности с восточной стороны залива тоже сложена базальтовыми породами с похожими характеристиками.

Таким образом, на основании полученных результатов сейсмической томографии на суше можно заключить следующее. Выявленные глубинные неоднородности, как с западной, так и с восточной стороны побережья с большой вероятностью являются платобазальтами, которые имеют сходную сейсмическую структуру от глубины 10 км до поверхности, проявляясь там, в основном в виде возвышенностей рельефа и частично в виде низменности. На севере Исландии толща платобазальтов может быть более 10 км [*Гептнер, 2014*].

Выявленная в слое 5-10 км низкоскоростная аномалия в прибрежной части залива может быть продолжением сильной низкоскоростной неоднородности в море (центральная часть рис. 2). Аномалия проецируется на рельефную форму, представленную песком согласно геологической карте Исландии [Geological map of Iceland, 1998]. Такая связь между глубинной неоднородностью и рельефом не исключает гипотезы о формировании залежей углеводородов [Richter et al., 2005, Geptner et al., 2006], но уже ближе к суше.

Работа выполнена в Институте Проблем Нефти и Газа РАН (ИПНГ РАН) в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122022800270-0).

## ЛИТЕРАТУРА

*Гептнер А.Р.* Вулканогенно-осадочный литогенез в наземной рифтовой зоне Исландии // Труды ГИН РАН. 2014. Вып. 586. М.: ГЕОС, 236 с.

Новатэк. Геологоразведочные работы и разработка: сайт. 2024. URL: https://www.novatek.ru/ru/about/operational-activities/exploration/

Geological map of Iceland. Reykjavik: Icelandic Institute of Natural Histrory, 1998.

*Geptner A.R., Richter B., Pikovskii Y., Chernyansky S.S., Alexeva T.A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons as evidence of hydrocarbon migration in marine and lagoon sediments of a recent rift zone (Skjalfandi and Oxarfjordur), Iceland // Geochemistry. 2006. Vol. 66. Is. 3. P. 213-225. doi: 10.1016/j.chemer.2006.01.008

*Harrington J.A.* Paleoseismological investigations on the Husavik-Flatey Fault, North Iceland: Geologic slip-rates and trenching studies. Doctoral Thesis Proposal, Earth Science and Engineering Program King Abdullah University of Science and Technology. 2015. 17 pp.

*Magnusdottir S., Brandsdottir B., Driscoll N., Detrick R.* Postglacial tectonic activity within the Skjalfandadjup Basin, Tjornes Fracture Zone, offshore Northern Iceland, based on high resolution seismic stratigraphy // Marine Geology. 2015. Vol. 367. P. 159-170. doi: 10.1016/j.margeo.2015.06.004

*Metzger S., Jonsson S.* Plate boundary deformation in North Iceland during 1992-2009 revealed by InSAR time-series analysis and GPS // Tectonophysics. 2014. Vol. 634. P. 127-138. doi: 10.1016/j.tecto.2014.07.027

*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.

*Roland E., McGuire J.J.* Earthquake swarms on transform faults // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 178. Is. 3. P. 1677-1690. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04214.x

Samundsson K., Karson J.A. Stratigraphy and Tectonics of the Husavik–Western Tjornes Area. Technical report #ISOR-2006/032. 2006. 35 pp.

*Smaglichenko T., Smaglichenko A., Sayankina M., Chigarev B.* Seismic Anomalies in the Geothermal District Revealed by the Relaxation Algorithm of Selected Coordinate Descent // Proceedings of 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow (September 2021). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2021. Paper id: 9600169. doi:10.1109/MLSD52249.2021.9600169

*Smaglichenko T.A., Smaglichenko A.V.* Resolution Estimates for Selected Coordinate Descent: Identification of Seismic Structure in the Area of Geothermal Plants. Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology / Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds). Switzerland: Springer, 2021. 630, pp. 580-588. doi: 10.1007/978-3-030-85874-2\_62.

*Smaglichenko T., Smaglichenko A.* Identification of Inhomogeneities: The Selected Coordinate Descent Method Applied in the Drilling Area // Mathematics. 2023. Vol. 11, id 4297. doi: 10.3390/math11204297

## RELATIONSHIP BETWEEN VISIBLE RELIEF AND INVISIBLE DEEP SEISMIC STRUCTURE IN THE SUBARCTIC COASTAL AREA IN THE GREENLAND SEA BAY

Smaglichenko T.A.<sup>1</sup>, Sayankina M.K.<sup>1</sup>, Smaglichenko A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Oil and Gas Institute of the Russian Academy of Sciences (ROGI RAS), Moscow, Russia <sup>2</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

For the first time, seismic velocity tomographic images highly resolved for the layer 5-10 km have been compared in detail with the Skjalfandi Bay coast (northern Iceland) land relief. Deep anomalies with the same velocity values have been identified on the western and eastern sides of the coast. Analysis of the numerical values showed that the heterogeneous structures are plateau basalts, which were formed at a depth of 10 km and mainly manifested as relief elevations on the surface.

Keywords: Subarctic, oil and gas potential, seismic velocities, innovative tomography method, relief, deep structures

## **REFERENCES:**

Geological map of Iceland. Reykjavik: Icelandic Institute of Natural Histrory, 1998.

Geptner A.R. Volcanogenic-sedimentary lithogenesis in the terrestrial rift zone of Iceland. Moscow: GEOS, 2014. 236 pp.

*Geptner A.R., Richter B., Pikovskii Y., Chernyansky S.S., Alexeeva T.A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons as evidence of hydrocarbon migration in marine and lagoon sediments of a recent rift zone (Skjalfandi and Oxarfjordur), Iceland // Geochemistry. 2006. Vol. 66. Is. 3. P. 213-225. doi: 10.1016/j.chemer.2006.01.008

Geological map of Iceland. Reykjavik: Icelandic Institute of Natural Histrory, 1998.

*Harrington J.A.* Paleoseismological investigations on the Husavik-Flatey Fault, North Iceland: Geologic slip-rates and trenching studies. Doctoral Thesis Proposal, Earth Science and Engineering Program King Abdullah University of Science and Technology. 2015. 17 pp.

*Magnusdottir S., Brandsdottir B., Driscoll N., Detrick R.* Postglacial tectonic activity within the Skjalfandadjup Basin, Tjornes Fracture Zone, offshore Northern Iceland, based on high resolution seismic stratigraphy // Marine Geology. 2015. Vol. 367. P. 159-170. doi: 10.1016/j.margeo.2015.06.004

*Metzger S., Jonsson S.* Plate boundary deformation in North Iceland during 1992-2009 revealed by InSAR time-series analysis and GPS // Tectonophysics. 2014. Vol. 634. P. 127-138. doi: 10.1016/j.tecto.2014.07.027

Novatek. Geological exploration and development: website. 2024. URL: https://www.novatek.ru/ru/about/operational-activities/exploration/

*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.

*Roland E., McGuire J.J.* Earthquake swarms on transform faults // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 178. Is. 3. P. 1677-1690. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04214.x

Samundsson K., Karson J.A. Stratigraphy and Tectonics of the Husavik–Western Tjornes Area. Technical report #ISOR-2006/032. 2006. 35 pp.

Smaglichenko T., Smaglichenko A., Sayankina M., Chigarev B. Seismic Anomalies in the Geothermal District Revealed by the Relaxation Algorithm of Selected Coordinate Descent // Proceedings of 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow (September 2021). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2021. Paper id: 9600169. doi:10.1109/MLSD52249.2021.9600169

*Smaglichenko T.A., Smaglichenko A.V.* Resolution Estimates for Selected Coordinate Descent: Identification of Seismic Structure in the Area of Geothermal Plants. Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology / Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds). Switzerland: Springer, 2021. 630, pp. 580-588. doi: 10.1007/978-3-030-85874-2\_62

Smaglichenko T., Smaglichenko A. Identification of Inhomogeneities: The Selected Coordinate Descent Method Applied in the Drilling Area // Mathematics. 2023. Vol. 11, id 4297. doi: 10.3390/math11204297