

НЕСМЕЩЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Т.А. Смагличенко*¹, Б.Н. Чигарев**¹, А.В. Смагличенко***²

1 – Институт проблем нефти и газа РАН, 2 – Институт сейсмологии и геодинамики (структурное подразделение Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского), * e-mail: tasmaglichr@gmail.com, **chigarev.ipng@gmail.com, ***losaeylin@gmail.com

Введение

Гребень Срединно-Атлантического хребта словно разрезает округлую форму острова Исландии, выходя на поверхность по двум основным хордам. Первая берет свое начало в Атлантическом океане и обозначена на суше сегментом западной вулканической зоны, вторая же как бы продолжает ее, проходя через центральную часть острова и включая восточную и северную вулканические зоны. Параллельные разломы, образованные афтершоками разрушительных землетрясений, произошедших в течение 1706–2008 годов, формируют на юге переходную зону между этими хордами, которая была названа сейсмически активной зоной Южной Исландии (South Iceland Seismic Zone, SISZ). Вдоль хорд гребня на участках вулканической деятельности располагаются высокотемпературные геотермальные системы [1].

Геотермальные ресурсы являются важнейшей частью экономики Исландии, позволяя обеспечивать отопление домов (57.4%), производить дешевую электроэнергию (15.9%), использовать их в рыболовстве (10.4%), применять в системах снеготаяния (5.4%), в промышленности (4.7%), для подогрева воды в бассейнах (3.7%), выращивания овощей и ягод в теплицах (2.6%) [2]. Применение геотермального тепла позволило Исландии значительно сократить долю импорта природной нефти. В то же время опыт освоения исландских глубокозалегающих месторождений показывает, что бурение скважин в геотермальных областях средних и высоких температур позволяет добывать чистый углекислый газ, который используется в коммерческих целях. Таким образом, необходимо детальное изучение районов геотермальных источников как объектов газодобычи.

С другой стороны, известно, что некоторые геотермальные поля – гидротермальные проявления подземных процессов. Это означает, что источником появления поля является большое количество воды. Изменения различных пород на

поверхности Исландии под воздействием гидротермальных растворов были детально изучены А.Р. Гептнером [3]. Наглядным примером гидротермального источника является Голубая Лагуна (г. Хверагерди, юг Исландии), отделённая от Атлантического океана небольшим участком суши – барьером. Недавние исследования образцов на полигонах гидротермальных полей показали, что из активной гидротермальной трубки может образовываться гидротермальная нефть. При определённых условиях (окислительная среда и высокая температура флюидов) такая нефть соответствует природной нефти [4, 5]. Подтверждением данного лабораторного заключения являются обнаруженные нефтяные проявления в районе гидротермального поля вулкана Узон, Камчатка [6].

Геотермальную основу природной нефти (температуры до 40 °С на 1 км) подтверждают недавние исследования температурных полей для 892 образцов из 68 скважин добычи нефти и газа в южном бассейне Бохайского залива в Северном Китае [7]. Таким образом, районы температурных полей, в том числе и в Исландии, можно рассматривать как потенциальные места сосредоточения как природной, так и гидротермальной нефти.

В данном исследовании метод поиска 1D минимальной градиентной модели [8] был применён для оценки сейсмической скорости в районе геотермального поля Хайдаренди (юг Исландии). Метод основывается на определении параметров линейного изменения сейсмической скорости с глубиной – таких, чтобы математическое ожидание соответствующих наблюдаемых значений невязок времён пробега было близким к нулю. При выполнении данного условия найденная оценка скорости является несмещённой линейной оценкой. Петрофизические исследования показывают, что температура, плотность и давление в районе гидротермальных скважин и вокруг них оказывают непосредственное влияние на сейсмические скорости [9, 10].

Так как метод определения 1D *минимальной* модели является недавно разработанной инновационной технологией, авторы настоящей статьи тестируют результаты его применения, сопоставляя найденные скоростные модели для геотермальных площадей с различными температурными режимами.

В то же время формируются основы методики поиска геотермальных площадей с помощью нахождения несмещённых линейных оценок сейсмической скорости для соседствующих районов.

Температурная обстановка в исследуемой области Хайдаренди и соседних геотермальных полях

Геотермальное поле Хайдаренди располагается в Южной Исландии в непосредственной близости к вулкану Гримснес, находящемуся в низменности SISZ, граничащей с горной частью, западной вулканической зоной. С 1986 года в зоне функционирует завод Хайдаренди, который производит диоксид углерода из геотермальной жидкости при температуре поля около 160 °С. Скважины используются для извлечения геотермальной жидкости на поверхность. Содержание газа в жидкости достаточно велико. Завод производит до 550 т жидкого диоксида углерода в год.

К северо-западу от Гримснес, в гористой части, которая ассоциируется с гребнем Средино-Атлантического хребта, находится центральный вулкан западной вулканической зоны Хенгиль. Геологическая история вулканической системы Хенгиль как одной из высокотемпературных геотермальных зон Исландии описана в работе Францсона и др. [11]. Горячие источники, нагретые воды в зонах трещин подтверждают существование глубинных температурных аномалий. Самое большое количество скважин пробурено здесь. Изучение образцов пород и исследование изменения температурного режима в скважинах дают основания полагать, что своего максимума температуры достигали в течение последнего ледникового периода, а затем происходило охлаждение сверху в связи с тектоническими подвижками при образовании гребня. Дополнительное охлаждение вызывалось тектоническим движением в направлении зоны SISZ. Однако процесс занижения температуры мог быть прерван из-за извержения вулкана Хенгиль, которое способствовало образованию горного массива и многочисленных трещин-каналов, по которым могли подниматься нагретые магмой воды. Корневая система каналов вулкана Хенгиль является основой для функционирования электростанций в Несяветлире и Хеллискейди, которые снабжают энергией Рейкьявик. На южной окраине вулканической системы Хенгиль располагаются следующие высокотемпературные геотермальные поля: Битра, Хверагерди, Хеллискейди, Хверахлид. Температура воды достигает 250–300 °С на глубинах немногим меньше 1 км. В области же центрального вулкана Хенгиль температура может достигать 380 °С на глубине более 2 км. Для низменности, ближайшей к вулкану Хенгиль, в области скважин Хайдаренди, температура понижается до 160 °С в месте добычи жидких углеводородов. Низкотемпературные геотермальные поля с

температурой около 50 °С располагаются в пределах 10 и 70 км от вулкана Гримснес в юго-восточном направлении [1, 12, 3].

Для построения сейсмических моделей, исследуемых в настоящей работе, использовались данные локальных землетрясений, зарегистрированных к югу от вулкана Гримснес, близко к тектоническому узлу, определённом пересечением линий западной вулканической зоны и SISZ. События были записаны в 1991 году двумя постоянными станциями «gug» и «hei», принадлежащими сети сейсмических приёмников, расставленных преимущественно в низменности. Северное расположение станций определило район изучения. Рис. 1 иллюстрирует положение этого района по отношению к описанным выше высокотемпературным полям.

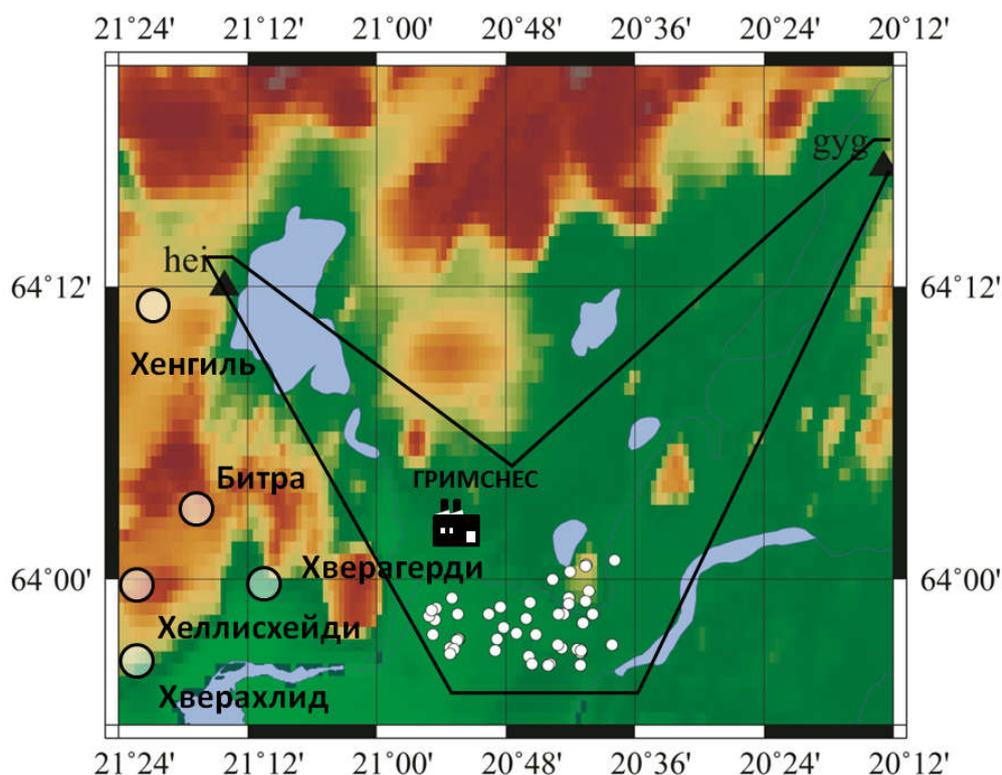


Рис. 1. Южная Исландия. Изучаемый район окрестности гидротермальных скважин завода Хайдаренди в непосредственной близости к вулкану Гримснес выделен сплошными линиями. Окружностями обозначены геотермальные высокотемпературные поля, расположенные в западной вулканической зоне. Сейсмические станции обозначены треугольниками, точки белого цвета соответствуют гипоцентрам землетрясений. Зелёный и оттенки коричневого цвета соответствуют низменности и нагорьям

Влияние температурного режима на сейсмические скорости в районе скважин Хайдаренди

Метод поиска 1D минимальной градиентной модели, предложенный и разработанный Т.А. Смагличенко [8], применялся для оценки сейсмической скорости не только в районе гидротермальных скважин Хайдаренди, но и в других районах SISZ, расположенных к востоку от геотермального поля Гримснес. Линейная модель называется минимальной градиентной, так как параметры градиента определяются из условия минимизации среднеквадратической разности наблюдаемых невязок времён и теоретических, соответствующих этим параметрам. Дополнительным условием является близость к нулю математического ожидания и дисперсии наблюдаемых невязок (несмещённая оценка). Построенная минимальная модель сейсмической скорости распространения продольной волны $V(z)$, где z – глубина, соответствует в районе Хайдаренди линейной функции $V(z)=4.9+0.2z$. Такая зависимость означает, что скорости выше на поверхности и достаточно быстро растут до глубины 2 км, по сравнению с используемой для юга Исландии SIL-моделью (South Iceland Lowland Model), полученной по профильным данным [13]. SIL-модель описывает линейное изменение скорости с глубиной по следующему закону: $V(z) = 3.926 + 0.479z$.

Известно, что данная скорость обычно увеличивается с глубиной за счет увеличения уплотнения пород, и это связано с их возрастом [14]. С другой стороны, экспериментальные исследования скважин [15] показывают, что сейсмические скорости в алканах (ациклические углеводороды) падают от 1.3 до 0.9 км/с при увеличении температуры от 20 °С до 120 °С. Авторами настоящей статьи получен противоположный эффект, однако, при этом был найден завышенный градиент скорости не в скважинах, а в их окрестностях. Общая площадь изученного района Хайдаренди вокруг скважин составляет около 150 км². Помимо гидротермальных скважин, где можно предполагать занижение скоростей, площадь включает расположенные к юго-востоку низкотемпературные геотермальные поля. И если малая площадь скважин вблизи вулкана Гримснес (около 1 км²) расположена в пределах плейстоценовых лавовых толщ, возраст которых менее 0.8 млн лет, то более обширные площади низкотемпературных полей соответствуют плейстоценовым отложениям, возраст которых около 0.8–3 млн лет [16]. Отсюда следует, что высокие сейсмические скорости для всего района Хайдаренди могут быть объяснены присутствием нескольких низкотемпературных полей, приуроченных к

более древним плейстоценовым породам. Такая геологическая характеристика зон низких температур согласуется с оценками гидротермального изменения пород, данными в работе [3]. По нашему мнению, области повышенных скоростей вокруг гидротермальных скважин Хайдаренди могут означать, что корни геотермальной системы Гримснес, имеющей достаточно высокие температуры, окружают древние породы высокой плотности, которые являются своеобразной подземной защитой функционирующих геотермальных систем.

Заключение

Анализируя несмещенную линейную оценку сейсмической скорости, найденную методом построения минимальной одномерной градиентной модели для района вокруг гидротермальных скважин Хайдаренди, можно утверждать, что средние сейсмические скорости превышают скорости общеизвестной SIL-модели до глубины 2 км. Этот результат подтверждается сопоставлением полученных сейсмических скоростей на поверхности с геологической структурой региона, а также с температурными режимами, существующими в районе. Соседство скважин (со средней для Исландии температурой добычи 160 °С) с низкотемпературными полями (до 50 °С) приводит к увеличению сейсмических скоростей в районе в целом. Следовательно, существует некоторое подтверждение вывода, сделанного в работе [15], о том, что в скважинах с ростом температуры сейсмические скорости понижаются. В нашем случае эффект такой же, занижение температуры на этой территории способствует увеличению плотности пород и сейсмических скоростей.

Для будущих исследований в других российских регионах, включая, например, районы гидротермальной системы Камчатки, важно отметить, что несмещенная оценка была получена при наличии в изучаемом исландском районе всего двух постоянно действующих станций, зарегистрировавших локальные землетрясения в 1991 году. Тестируемый в настоящей статье метод определения несмещенной линейной оценки может быть широко применен. Так, учет локального изменения сейсмических скоростей является важной составляющей выбора мест бурения скважин для обеспечения притока углеводородов к ней. В открытой трещине, которая может быть заполнена водой, нефтью, газом [17], происходит взаимодействие сейсмических волн с содержимым, что приводит к усилению изменения кинетической энергии и, соответственно, к изменению скорости. Поэтому при надлежащих сейсмических наблюдениях могут быть использованы

результаты данного метода по нахождению адекватных 1D скоростных моделей. Известно, что при гидроразрыве пласта активизируется микросейсмическая эмиссия, по данным наблюдений которой можно определить зоны эмиссии энергии, связанной с трещиноватостью вследствие гидроразрыва [18]. При таких исследованиях применение закона изменения сейсмической скорости с глубиной необходимо при соответствующих вычислениях

Статья написана в рамках выполнения Государственного задания в сфере научной деятельности на 2017 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кононов В.И.* Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М.: Наука, 1983. 216 с.
2. Развитие геотермальной энергетики и исследования в Исландии: Пер. с исланд. Рейкьявик: Национальный Энергетический Комитет и Министерство промышленности и торговли Исландии, 2007. 39 с.
3. *Гептнер А.Р.* Вулканогенно-осадочный литогенез в наземной рифтовой зоне Исландии. М.: ГЕОС, 2014. 236 с.
4. *Симонейт Б.Р.Т.* Органическая геохимия водных систем при высоких температурах и повышенных давлениях: гидротермальная нефть // Основные направления геохимии. К 100-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова. М.: Наука, 1995. С. 236–260.
5. *Пересыпкин В.И.* Молекулярный состав алкано-нафтеновых углеводородов в гидротермальных отложениях Восточно-Тихоокеанского поднятия // Геология морей и океанов: Материалы XVII международной научной конференции по морской геологии М., 2007. Т. 2. С. 62–64.
6. *Варфоломеев С.Д., Карпов Г.А., Синал Х.А., Ломакин С.М., Николаев Е.Н.* Самая молодая природная нефть Земли [Электронный ресурс] // Банк рефератов. Электронное издательство. – Режим доступа: <http://www.bestreferat.ru/referat-407870.html> (Дата обращения 08.09.2017)
7. *Zuo Y., Ye B., Wu W., Zhang Y. Ma W., Tang S., Zhou Y.* Present temperature field and Cenozoic thermal history in the Dongpu depression, Bohai Bay Basin, North China // Marine and Petroleum Geology. 2017. Vol. 88. P. 696–711.

8. *Smaglichenko T.A., Bjarnason I.Th., Smaglichenko A.V., Jacoby W.R.* Method to find the minimum 1D linear gradient model for seismic tomography // *Fundamenta Informaticae*. 2016. Vol. 146(2). P. 211–217.
9. *Christensen N.I.*, Seismic velocities // In: *CRC Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*. CRC Press. Boca Raton, 1989. P.429-546.
10. *Schoun J.H.* Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics // *Handbook of Geophysical Exploration*. Pergamon, Tarrytown. NY. 1996. Vol. 18.
11. *Franzson H., Gunnlaugsson K., Arnason K., Sæmundsson K., Steingrímsson B., Hardarson B.S.* The Hengill Geothermal System, Conceptual Model and Thermal Evolution // *Proceedings World Geothermal Congress –2010*. Bali, Indonesia. 25–29 April 2010. P.1–9.
12. *Einarsson Th.* Geology of Iceland. Rocks and landscape. Reykjavik: Mal og Menningm, 1994. 309 p.
13. *Bjarnason I., Menke W, Flovenz O., Caress D.* Tomographic image of the Mid-Atlantic Plate Boundary in Southwestern Iceland // *Journal of Geophysical Research*. 1993. Vol. 98(B4). P. 6607–6622.
14. *Hayward N., Calvert A.J.* Seismic reflection and tomographic velocity model constraints on the evolution of the Tofino forearc basin, British Columbia // *Geophys. J. Intern.* 2007. Vol.168(2). P. 634–646.
15. *Wang Z., Nur A.* Wave velocities in hydrocarbon-saturated rocks; experimental results // *Geophysics*. 1990. N. 55/6. P. 723–733.
16. *Geological map of Iceland*. Reykjavik: Icelandic Institute of Natural History.1998.
17. *Багринцева К.И.* Трещиноватость осадочных пород. М.: Недра, 1982. 256 с.
18. *Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О.* Мониторинг микросейсмической эмиссии – новое направление развития сейсморазведки // *Приборы и системы разведочной геофизики*. 2014. № 3. Т. 49. С. 6–15.