

# ЧИСЛЕННЫЙ И РЕАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СРЕД И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

М.К. Саянкина<sup>1</sup>, А.В. Смагличенко<sup>2</sup>, И.А. Володин<sup>1</sup>, Т.А. Смагличенко<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИПНГ РАН, <sup>2</sup>ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта

## Введение

В работе представлены результаты исследования возможностей методов трансмиссионной сейсмической томографии восстанавливать поле скорости продольных волн (Р-волн), характерное для местоположения газовой залежи.

Объектами исследования были выбраны:

- 1) численная модель залежи газа мощностью 70 м, расположенная близко к поверхности и имеющая в своем составе два слоя (водный и газовый);
- 2) реальная модель зоны разрывных нарушений, представленная зоной разлома Гримсей на северо-востоке Исландии, включающего гидротермальное поле с преобладающими газами  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$

В качестве методов исследования выбраны инновационные технологии, разработанные Смагличенко Т.А. в ИПНГ РАН в последнее десятилетие.

## 1. Численный эксперимент

Тестируемой численной моделью (1) взята простая модель залежи УВ, которая соответствует классической схеме расположения УВ и использована в работе [H. Ren, G. Goloshubin, F. Hilterman, 2007]. Модель состоит из водо- и газонасыщенного слоев породы (Рис. 1).

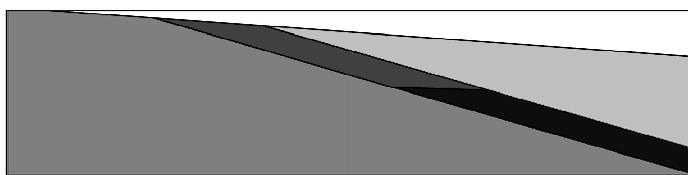


Рис.1. Модель залежи в соответствии с [H. Ren, G. Goloshubin, F. Hilterman, 2007]. Покрышка обозначена белым цветом; породы, расположенные над и под газовым и водным слоями обозначены светло-серым и серым цветами соответственно; газовый слой обозначен темно-серым цветом; водный слой обозначен черным цветом

Сейсмические скорости  $V_p$  (км/сек), которые соответствуют скоростям прохождения Р-волн через составляющие части тестируемой модели, приведены в табл. 1.

**Скорости Р-волн (км/сек), рассмотренные в качестве сейсмических характеристик слоев, составляющих углеводородную залежь**

Водонасыщенный слой	3.049
Газовый слой	2.789
Поверхностная порода	2.53
Порода-коллектор над пластом	2.643
Порода-коллектор под пластом	2.695

Для аппроксимации газового и водонасыщенного слоев была использована сетка, размер которой определялся условиями применимости методов трансмиссионной томографии. Смагличенко А.В. было показано, что для оценки распределения сейсмической скорости Р-волны, характеризующей данную залежь УВ, в реальных условиях, нужны данные о событиях, произошедших на глубине менее 1 км с магнитудами ( $M < 3$ ) и имеющих частоты сейсмического сигнала в диапазоне 15-30 Гц.

#### 1.1. Прямая задача

Был проведен сейсмический эксперимент, согласно которому лучи Р-волн распространялись от предполагаемых очагов за пределами исследуемой площадки к сейсмическим станциям, расположенным на поверхности, как это показано на рис. 2.

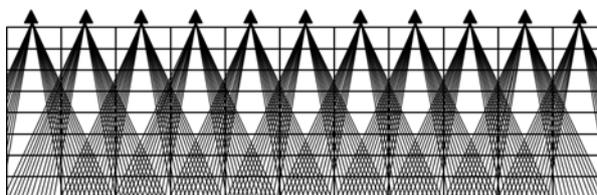


Рис. 2. Геометрия эксперимента. Расстояние между сейсмоприемниками, обозначенными треугольниками, равно 112 м. Прямоугольная сетка задает конфигурацию блоков модели. Прямые линии соответствуют сейсмическим лучам

В этой модели для каждого отдельно взятого луча, проходящего через блоки, Смагличенко А.В. решил прямую задачу, были рассчитаны процентные составляющие долей луча в каждом из блоков, впоследствии использованные для построения матрицы  $A$ . Длины сейсмических лучей в блоках задают прямоугольную матрицу  $A$  размерностью  $264 \times 88$ . Предполагалось, что блоки имеют сейсмические характеристики, заданные в табл.1. Эти характеристики определяют вектор скоростных вариаций  $x^{\text{мод.}}$ . Тестовые данные, представляющие вектор  $b^{\text{синт.}}$ , рассчитывались в результате умножения матрицы  $A$  на вектор  $x^{\text{мод.}}$ , компоненты которого – скоростные вариации, полученные для каждого

блока, и в данном случае являющиеся "истинными" значениями сейсмической модели залежи газа. Таким образом, обратная задача заключалась в решении системы:

$$Ax = -b^{\text{СИНТ.}}, \quad (1)$$

нахождения неизвестного вектора  $x$  и в сравнении найденных компонент вектора  $x$  со значениями компонент вектора  $x^{\text{МОД.}}$ , которые представляют "истинную" модель газа [Smaglichenko et al., 2012b].

## 1.2. Решение обратной задачи

Обратная задача для уравнения (1) была решена Саянкиной М.К. сначала с помощью метода инверсии, наиболее часто используемого в трансмиссионной сейсмической томографии. Это не дало успешного результата для восстановления заложенных скоростных свойств модели. Поэтому был разработан алгоритм, состоящий из новых методов численного анализа и методов сейсмической томографии [Smaglichenko, 2011; Smaglichenko et.al, 2012a,b; Smaglichenko et.al., 2013]. Следуя алгоритму, основанному на Модификации метода исключения Гаусса (которая была предложена Т.А. Смагличенко в 2011г. [Smaglichenko, 2011]), исходные данные были разделены на подмножества. Каждое подмножество формировалось с помощью лучей, исходящих от кластера сейсмических событий к одному и тому же приемнику. Соответственно, 22 подсистемы были решены, и их решения сопоставлены, чтобы получить стабильное значение для одной и той же неизвестной компоненты. При этом каждая подсистема являлась слабо разреженной и не отвечала критериям, используемым при реализации модификации метода Гаусса.

Для того, чтобы преодолеть проблему слабой разреженности данных, синтетические геофизические поля исследовались с точки зрения различных структур, их составляющих. Значения вектора правой части каждой подсистемы были проанализированы с учетом их статистических характеристик, которые можно объяснить реакцией на вариации свойств среды [Smaglichenko et al, 2012b; 2013]. Для исследования были выбраны несколько однородных векторов, компоненты которых являлись примерно одинаковыми. Это означало, что время прохождения сейсмических волн через среду оказалось примерно одинаковым для соответствующих им сейсмических лучей. Следовательно, можно предположить, что среда имела однородную структуру. Для проверки этого предположения был применен один из вариантов метода вычитания выбранных аномалий [Smaglichenko et al., 2003].

В табл. 2 даны численные значения, полученные при применении варианта метода вычитания выбранных аномалий (новой технологии) и общепринятого метода томографии, известного как метод сингулярного разложения. В верхней строке таблицы показаны численные значения, которые исходно задавались породе, расположенной под залежью газа. Видно, что значения, полученные в результате применения новой разработанной технологии, более близки к «истинным», изначально заложенным.

Таблица 2

**Численные значения, восстановленные для породы под залежью**

Результат	«Истинные»	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
	По методу сингулярного разложения	0.087	0.052	0.046	0.041	0.046	0.042	0.042	0.042	0.042	0.084	0.087	0.087
	При применении новой технологии	0.063	0.062	0.061	0.065	0.062	0.066	0.064	0.068	0.066	0.065	0.068	0.068

Найденные значения скорости Р-волны, проходящей через пласт под залежью, были подставлены в левую часть системы (1). После вычитания соответствующих значений из правой части процесс вычисления продолжался в соответствии с модификацией метода исключения Гаусса. Отметим, что стабильное значение присваивалось блоку на основании сопоставления решений двух подсистем. На практике при наличии тысяч сейсмических лучей число подсистем, для которых сравниваются решения, достигает 10. В работе Т.А. Смагличенко [Смагличенко, 2011] доказано, что такая процедура сравнения решений и выбора приближенно равных значений скоростных вариаций для нескольких подсистем (лучи которых пересекают исследуемый блок с различных азимутальных направлений) позволяет значительно уменьшить влияние непредсказуемой ошибки каждого сейсмического луча на результат инверсии. Эта ошибка имеет сложную структуру, включая погрешности в определении положения очагов

землетрясений, в регистрации данных, а также моделирования, лучевого приближения. Проведенные исследования показывали, что, чем больше сейсмических лучей участвует в процессе инверсии, тем меньше влияние суммарной ошибки на результат.

### 1.3. Результат применения разработанного алгоритма

Применение новой технологии показало, что блоки среды, соответствующие газовым месторождениям, могут быть найдены в пределах заданной точности. Однако, из-за ошибки округления, которая накапливается, становится затруднительным восстановить параметры водоносного горизонта. Рис. 3 демонстрирует, что применяемая технология при данных ограниченных условиях эксперимента позволяет восстановить только часть модели.

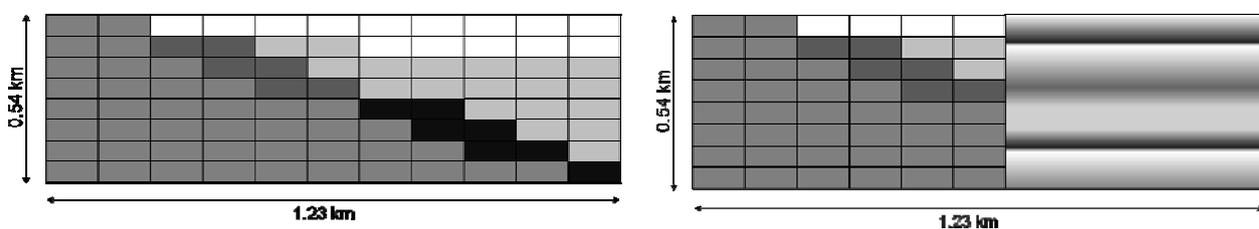


Рис. 3. Иллюстрация исходной (слева) и наполовину восстановленной до границы газ–вода модели (справа). Блоки, окрашенные в белый и светло-серый цвет, соответствуют породам над залежью газа; темно-серым цветом обозначен газовый слой, а черным – водоносный слой; серый цвет использован для блоков, пород под слоями газа и воды

Необходимо отметить следующее. В полученной модели водоносный горизонт не восстановлен, сейсмические свойства пород, вмещающих газоносный пласт, восстановлены, как и газоносный пласт. С другой стороны, согласно работе [H. Ren, G. Goloshubin, F. Hiltebrand, 2007], методы дифракционной томографии, использующие частотно-амплитудные спектры, способны восстановить только слой газа, в то время как свойства пород, окружающих этот слой, не могут быть определены. Таким образом, продемонстрированная возможность методов трансмиссионной томографии восстанавливать среду, окружающую залежь, подтверждает целесообразность их практического использования вместе с другими сейсмическими методами, такими, как ГСЗ, МОВ и т.д.

## 2. Анализ результатов применения дифференцированного подхода к реальным сейсмическим данным (зона разрывных смещений на северо-востоке Исландии)

Дифференцированный подход [Smaglichenko et al., 2009 г.; 2012a] был применен для построения томографических изображений по данным землетрясений малых магнитуд, записанных переносными сейсмическими станциями университета Майнц (Германия) в течение 1986-1989 гг. Землетрясения распределялись в море небольшими кластерами вдоль разломов Хьюсавик и Гримсей, а станции были расположены на береговой линии вдоль полуостровов Тьернес. Всего было записано около 600 событий.

Результаты, полученные по реальным данным слабой сейсмичности на северо-востоке Исландии (рис. 4), показали, что область со скоростью Р-волны, равной 4.89 км/с, соответствует расположению гидротермального поля. В составе его газовой фазы преобладают углеводородные газы. Это хорошо согласуется с данными геохимии [Kuhn et al., 2003]. Независимо подобные результаты были получены для подобного гидротермального поля в Калифорнии [Lou, 1995]. В геотермальной области скорость Р-волны резко возрастает. А именно, низкоскоростная аномалия (белый цвет) на севере Гримсей переходит в высокоскоростную аномалию (черный цвет). Такой скачок в скорости, характеризует увеличение упругости среды, связанной в данном случае с присутствием гидротерм [Sayankina et al., 2013].

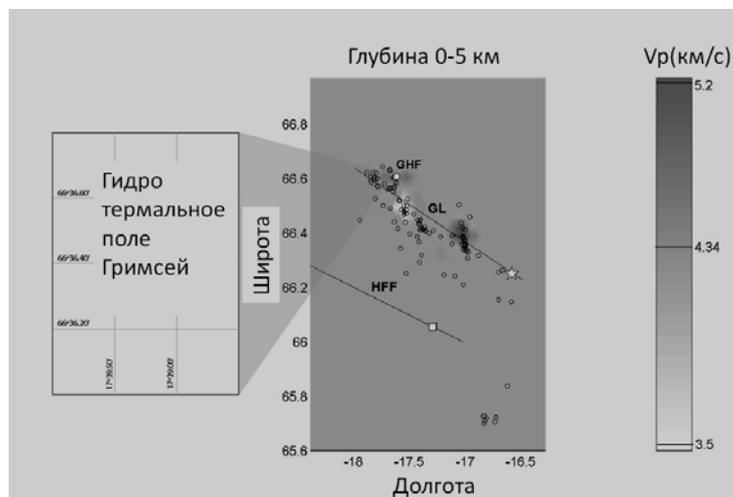


Рис. 4. Результаты применения нового подхода при обработке данных слабой сейсмичности на северо-востоке Исландии. Гидротермальное поле Гримсей (GHF), характеризующееся содержанием УВ, обозначено белым квадратом. Области высоких и низких скоростей продольных волн окрашены, соответственно, в черный и белый цвет

Следует отметить, что присутствие углеводородных газов в гидротермальном поле Гримсей, расположенном в зоне одноименного разлома, рядом с океаническим хребтом Колбенсей, подтверждает гипотезу об образовании газогидратных залежей на

мелководных склонах срединно-океанических хребтов, впервые сформулированную в работе [Дмитриевский и др., 1997]. Позднее, в 2001 г., эта гипотеза нашла подтверждение в первых наблюдениях гидротермального поля Гримсей. [Hannington et al., 2001]. Было установлено, что преобладающими в составе газами являются метан и углекислый газ [Atkins, 2013].

### **Заключение**

Результаты проведенных численных и реальных экспериментов по определению местоположения УВ с использованием методов трансмиссионной сейсмической томографии показывают следующее.

1 При восстановлении распределения скорости Р-волны для залежи газа мощностью 70 метров необходимо зарегистрировать как можно больше сейсмических событий на глубине менее 1 км, имеющих частоту сигнала 15-30 Гц.

2 Методы трансмиссионной сейсмической томографии целесообразно использовать для уточнения расположения залежей газа.

3 Распределение скорости Р-волн в гидротермальных областях достаточно точно могут быть определены с помощью дифференцированного подхода.

### **ЛИТЕРАТУРА**

*Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланюк И.Е., Матвеевков В.В.* Гидротермальный механизм образования углеводородов в срединно-океанических хребтах (на примере Баренцева и Норвежских морей) // Геология нефти и газа. 1997. № 8. С. 4-16.

*Смагличенко Т.А., Николаев А.В., Якоби В.* Раздельное определение скоростной структуры и параметров гипоцентров землетрясений на основе дифференцированного подхода // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 433, № 4. С. 1-5.

*Atkins D.* Exploration Techniques for Locating Offshore Geothermal Re-sources. // Thesis Master of Science in Sustainable Energy. Reykjavik University. 2013. 125 p.

*Hannington M., Herzig P., Stoffers P., Scholten J., Botz R., Garbe-Schonberg D., Jonasson I.R., Roest W.* Shipboard Scientific Party: First Observations of High Temperature Submarine Hydrothermal Vent and Massive Anhydrite Deposits off the North Coast of Iceland // Marine Geology. 2001. Vol. 177. P. 199-220.

*Kuhn T., Herzig P.M., Hannington M.D., Garbe-Schönberg D., Stoffers P.* Origin of Fluids and Anhydrite Precipitation in the Sediment-Hosted Grimsey Hydrothermal Field North of Iceland // *Chemical Geology*. 2003. Vol. 202. Issues 1–2. P. 5-21.

*Lou M., Malin P.E., Rial J.A.* Locating an Active Fault Zone in Coso Geo-Thermal Field by Analyzing Seismic Guided Waves from Microearthquake Data. // *Proceedings of Twentieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, California, 1995. P. 115-121.

*Ren H., Goloshubin G., Hilterman F.* Spectra Crossplot // *The Leading Edge*. Vol. 26, № 12.S. 2007. P. 1562-1566.

*Sayankina, M.K., Smaglichenko T.A., Jacoby W.R.* Tomography Application to Complex Seismic Data of the Tjornes Fracture Zone (Iceland) // *Book of abstracts. ISCS'2013*. Czech Technical University Publisher. Prague. 2013. P. 29.

*Smaglichenko, T.A., Nikolaev A.V., Horiuchi S. and Hasegawa A.* The method for consecutive subtraction of selected anomalies: the estimated crustal velocity structure in the 1996 Onikobe (M=5.9) earthquake area (1996), northeastern Japan. // *Geophysical Journal International*. Blackwell Publisher. 2003. Vol. 153. P. 627-644.

*Smaglichenko T. A.* Modification of the Gauss elimination to the complex seismic data // *Proc. AIP Conf.* 2011. Vol. 1389. P. 1003-1006.

*Smaglichenko T. A., Horiuchi S., Takai K.* A differentiated approach to the seismic tomography problem: Method, testing and application to the Western Nagano fault area (Japan) // *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* Elsevier Publisher. 2012a. Vol. 16. P. 27-41.

*Smaglichenko T.A., Volodin I.A., Lukianitsa A.A., Smaglichenko A.V., Sayankina M.K.* Structural algorithm to reservoir reconstruction using passive seismic data (synthetic example) // *Proc. AIP Conf.* 2012b. Vol. 1479. P. 682-685.

*Smaglichenko T.A., Sayankina M.K., Smaglichenko A.V.* Computational structure to retrieve a complex seismic structure of hydrocarbon model. // *Emergence, complexity and computations* Springer Publisher. 2013. Vol. 5. P. 215-237.