

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ  
В МЕТОДЕ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Цуканов А.А.<sup>1</sup>, Горбатиков А.В.<sup>1</sup>, Степанова М.Ю.<sup>1</sup>, Кугаенко Ю.А.<sup>2</sup>, Салтыков В.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, [microseismic@yandex.ru](mailto:microseismic@yandex.ru)*

<sup>2</sup>*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский*

**Введение**

Последнее десятилетие группой исследователей Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН развивается метод микросейсмического зондирования (ММЗ) [2,3,6]. Метод относится к группе пассивных методов сейсморазведки и хорошо зарекомендовал себя при решении широкого круга геолого-физических и структурных задач для различных классов геологических объектов в различных географических и климатических условиях. Метод применяется как на территории России и стран СНГ так и за рубежом (Болгария, Греция, Индия, Испания, Румыния и др.) [2-7,9,12].

В основе технологии микросейсмического зондирования лежит измерение фонового микросейсмического поля. В роли основного параметра сигнала, несущего в себе полезную информацию, в ММЗ используется амплитуда (интенсивность). Полученные записи интерпретируются в рамках обоснованного предположения, что вертикальная компонента колебаний в микросейсмическом поле формируется преимущественно вкладом основной моды поверхностной волны Рэлея [13]. Неоднородности геологической среды устойчиво проявляются в микросейсмическом поле, внося локальные (на поверхности в своей окрестности) вариации в пространственное распределение спектральных (амплитудно-частотных) характеристик микросейсмического поля. При этом неоднородность со значением  $V_S$  ниже, чем в окружающей породе, проявляется увеличением амплитуды на поверхности на некоторой частоте, а при повышенном  $V_S$  – уменьшением, кроме того указанная частота связана с глубиной залегания неоднородности [3,6]. В подавляющем большинстве случаев можно говорить об однозначности такой связи, при этом выполняется следующее соотношение:

$$H = k_G C_R(f)/f,$$

где  $H$  – глубина залегания неоднородности,  $f$  – соответствующая ей «чувствительная» частота,  $C_R(f)$  – оценка средней локальной дисперсионной кривой волн Рэлея,  $k_G$  – коэффициент глубинной привязки, имеющий близкое к 0.4 значение [3,6].

В зависимости от поставленной задачи возможно проведение как профильной, так и площадной съемки. Наблюдения в различных точках сети могут проводиться последовательно одним переносным прибором. При этом временные вариации статистических параметров микросейсмического сигнала снимаются при использовании второго прибора – стационарно установленной «базовой станции», который проводит регистрацию одновременно в течение всего периода наблюдений. Подробное описание технологии ММЗ можно найти в основополагающих работах по данной теме [2,3,6], в настоящей работе оно приводиться не будет.

**Разрешающая способность метода микросейсмического зондирования**

Согласно исследованиям [6], разрешающая способность метода оценивается в диапазоне  $0.25-0.3 \lambda$  по горизонтали и  $0.3-0.5 \lambda$  – по вертикали, где  $\lambda$  – эффективная длина волны для глубины залегания исследуемых неоднородностей. В рамках указанной работы рассматривались задачи с включениями различной формы, размерами, глубины залегания и скоростного контраста по отношению к вмещающей среде, но при этом рассмотрение ограничивалось только случаями с одинаковым значением коэффициента Пуассона  $\nu = 0.25$  в неоднородности и вмещающей среде. Было показано, что амплитудная реакция не чувствительна к форме скоростного включения, если его размеры менее  $\lambda/4$ . При этом возможно обнаружить присутствие самого включения и определить знак его скоростного контраста. В терминах глубин, используя коэффициент глубинной привязки, можно утверждать, что изображения двух неоднородностей со скоростными контрастами одного знака должны сливаться, если расстояние между ними не превышает половину глубины их залегания.

Основные закономерности формирования сигнала в ММЗ, полученные на численной модели, находятся в хорошем соответствии с теорией и с результатами полевых экспериментов. Тем не менее, некоторые эффекты, наблюдаемые на реальных геологических объектах, не могут быть описаны в

рамках проведенной в [6] серии численных расчетов. В частности это относится к наблюдению двух субвертикальных структур отдельно на тех глубинах, для которых, в соответствии с расчетами, их изображения должны слиться. Наблюдается эффект кажущегося «сверхразрешения». Такое явление может возникать при исследованиях с помощью ММЗ особенно в зонах активной вулканической деятельности. Обнаруженное несогласие инициировало проведение дополнительного исследования, результаты которого частично представлены в настоящем докладе.

### **Методика исследований**

На основе описанной в [6] разностной схемы был создан модифицированный параллельный программный комплекс с использованием параллельной технологии Message Passing Interface (MPI) [11]. Различие с базовой модификацией заключалось в использовании полностью явной схемы, что позволило существенно сократить время счета.

Использование преимуществ параллельных вычислений состояло в разделении независимых расчетов с различными длинами волн на разные вычислительные узлы кластера, а "медленный" обмен данными между узлами производился единожды в конце расчетов для совместной обработки результатов. Представленные в настоящей работе результаты расчетов производились для 8 азимутов облучения исследуемой области (с шагом  $45^\circ$ ) независимо для 42 частот зондирующей волны, что позволяло достигать 42-ух кратного ускорения счета благодаря распараллеливанию. Сетка частот выбиралась таким образом, чтобы равномерно покрыть диапазон 6–99 км длин волн фундаментальной моды волны Рэлея во вмещающей среде. Размер рабочей расчетной области  $200 \times 108 \times 160$ , всего 3 456 000 ячеек.

### **Эффект наблюдаемого сверхвысокого разрешения в микросейсмическом поле**

Опыт применения микросейсмического зондирования в различных геолого-геофизических условиях показал, что в некоторых случаях можно наблюдать субвертикальные структуры, которые остаются разрешенными на построенном разрезе даже при достижении критического расстояния между ними – менее  $\lambda/4$ .

Примером таких структур являются низкоскоростные субвертикальные тела, наблюдаемые в глубинной структуре земной коры в зонах вулканической деятельности, например, на острове Эль Иерро Канарского архипелага [12] и в районе вулкана Плоский Толбачик (см. рис.1) [7].

Как видно из рис.1, низкоскоростные субвертикальные тела III и IV, залегающие в диапазоне глубин 15-20 км отчетливо разделяются, хотя расстояние между ними по латерали порядка 6 км, что меньше критического расстояния разрешения 8-10 км согласно сделанным ранее оценкам. Для адекватной интерпретации результатов микросейсмического зондирования приходится ставить вопрос о природе такого кажущегося "сверхразрешения".

Известны работы, в которых по анализу данных сейсморазведки для некоторых зон получаются аномально низкие и даже отрицательные значения коэффициента; зоны разуплотнения и разрывных нарушений могут характеризоваться повышенной трещиноватостью и высокой газонасыщенностью среды, что, по мнению авторов [8], может приводить к низким ( $\nu \approx 0$ ) и даже отрицательным значениям эффективного коэффициента Пуассона среды. Известен, например, результат лабораторных исследований механических свойств горных пород в экстремальных условиях [10]. По утверждению авторов гранит с искусственной трещиноватостью при температуре 450-600 °С имеет аномально низкое значение отношения скорости Р-волны к скорости S-волны  $\gamma_{\text{гранит}} = V_P/V_S = 0.74$ , а известняк –  $\gamma_{\text{известняк}} = 0.70$ . Это соответствует, во-первых, отрицательным эффективным значениям первого упругого модуля Ламэ, во-вторых, аномальным значениям коэффициента Пуассона  $\nu_{\text{гранит}} = 1.61$ ,  $\nu_{\text{известняк}} = 1.48$ .

В связи с тем, что зондирующий сигнал – естественное микросейсмическое поле – имеет характерную амплитуду смещений на поверхности порядка  $10^{-9} \div 10^{-6}$  м, трещиноватые породы с раскрытостью трещин порядка указанной величины будут проявлять аномальные (по меркам сплошной среды) механические свойства. Мы вправе полагать по этой причине, что наблюдаемые субвертикальные тела в глубинной структуре зон вулканической деятельности характеризуются аномальными механическими свойствами и могут иметь, например, близкое к нулю эффективное значение коэффициента Пуассона  $\nu$ .

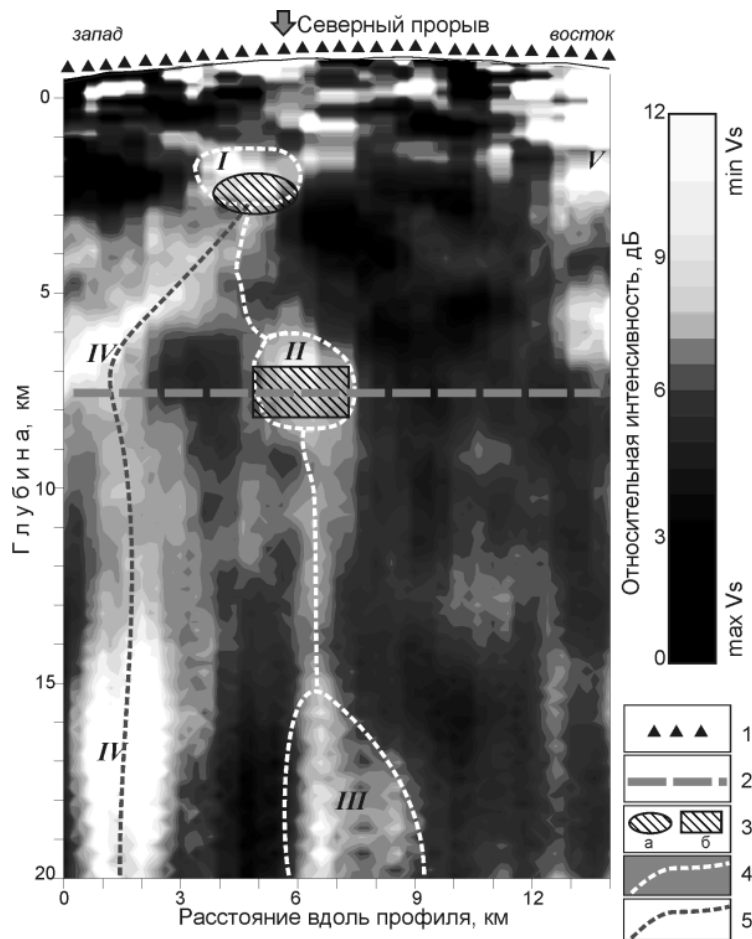


Рис.1 Вертикальный разрез по ММЗ в районе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. (БТТИ), отражающий глубинное распределение относительных скоростей S-волн (из работы [7]). I–V – выделенные низкоскоростные области; 1 – пункты регистрации микросейсмического поля; 2 – граница кристаллического фундамента под Толбачинским Долом; 3 – магматические очаги, выявленные под Северным прорывом БТТИ на глубине 2–3 км (а) и на границе кристаллического фундамента на глубине 7–8 км (б) (приведено по [1]); 4 – субверикальный дифференцированный магмовод под Северным прорывом БТТИ – питающий канал извержения; 5 – возможный альтернативный путь поступления магмы в периферический очаг на глубине 2–3 км.

### Задача с двумя параллельными штоками

Результаты численных экспериментов для трех случаев вертикальных штоков приведены на рис.2. В таблице 1 приведены заданные параметры среды неоднородности и соответствующие им значения коэффициента Пуассона  $\nu$ . Свойства вмещающей среды полупространства в модели  $V_p^0 = 5\,196$  м/с;  $V_s^0 = 3\,000$  м/с;  $\rho_0 = 2\,700$  кг/м<sup>3</sup>, при этом  $\nu_0 = 0.25$ ;  $\lambda_0 = \mu_0 = 24.3 \times 10^9$  Па;  $V_R^0 = 2\,758$  м/с. В качестве неоднородности задавалась пара параллельных вертикальных штоков. Глубина залегания верхних границ каждого из штоков 6 км, нижняя граница устанавливалась на "бесконечную" глубину и совпадала с нижней границей расчетной области (162 км). Диаметр каждого из штоков 1.8 км, расстояние между их осями 15 км.

Таблица.1. Заданные параметры среды неоднородности использованные в численной модели.

Вариант	$R_p$ , д.ед.	$R_s$ , д.ед.	$\nu$ , д.ед.
(а)	0.90	0.734848	$1.466 \times 10^{-6}$
(б)	0.95	0.775673	$1.610 \times 10^{-6}$
(в)	0.80	1.00	-0.0434783

где  $R_p = V_p/V_p^0, R_s = V_s/V_s^0$

В отличие от расчетов, проводившихся ранее в рамках работы [6], скорости во включениях  $V_p$  и  $V_s$  варьировались независимо друг от друга. Ранее  $V_p$  и  $V_s$  менялись согласовано для обеспечения постоянного значения коэффициента Пуассона во всем объеме, включая неоднородности.

Для исследования влияния коэффициента Пуассона на восстановление структуры с двумя вертикальными штоками было проведено более 20 различных расчетов с разной геометрией и свойствами породы тел.

Анализируя результаты (а)-(в) рис.2., можно прийти к заключению, что кажущееся «сверхразрешение» в ММЗ наблюдается, если эффективное значение коэффициента Пуассона среды неоднородности близко к нулю. Кроме того, если величина модуля  $(1-R_S)$  увеличивается, то глубина разрешения снижается. Близость коэффициента Пуассона к нулю означает, что среда во включениях должна быть сильно трещиноватой.

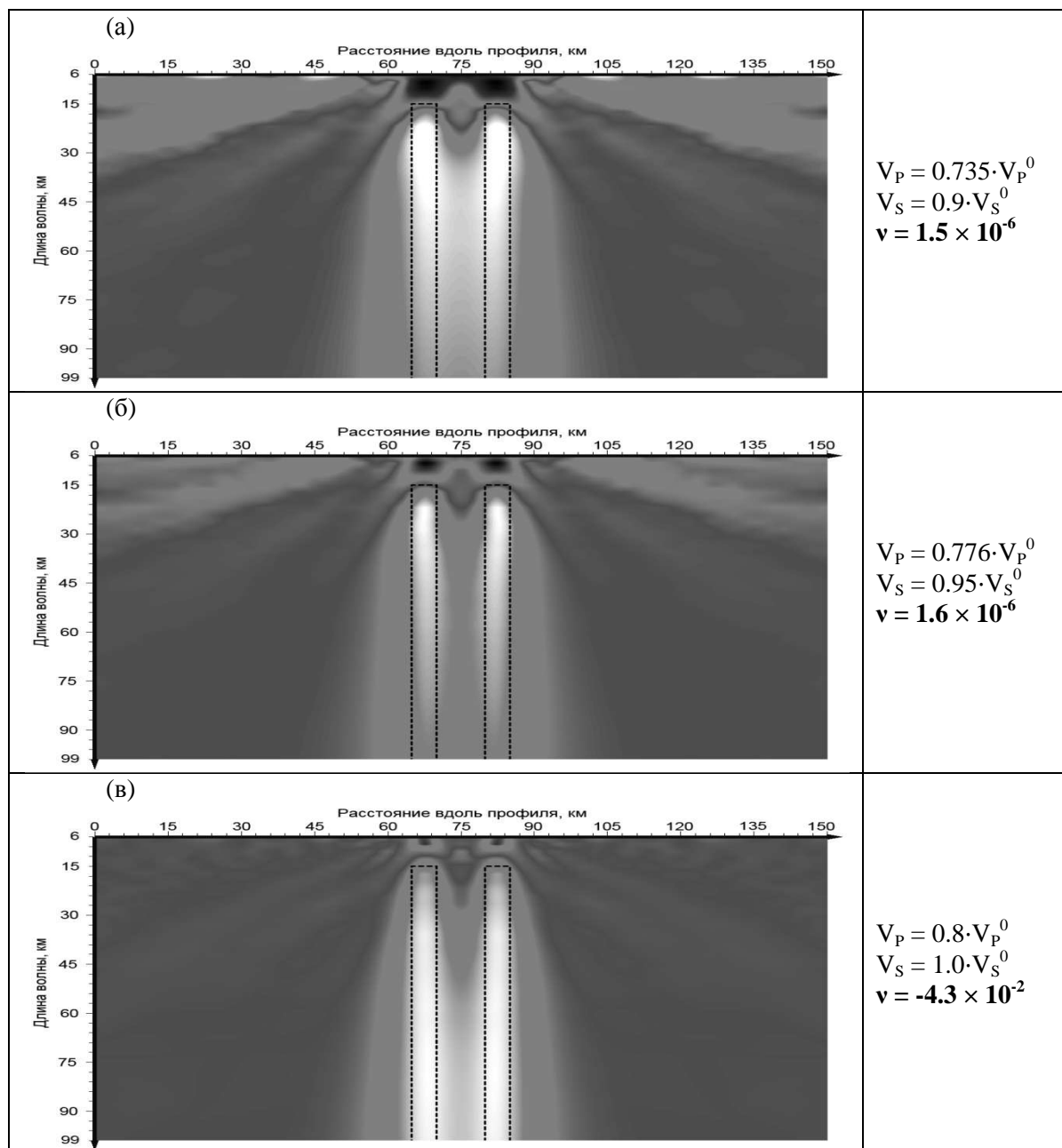


Рис.2. Пара субвертикальных штоков с низким значением коэффициента Пуассона – результат численного моделирования. Варианты (а)-(в) различаются величиной скоростного контраста (см. подписи справа). Светлый тон – относительное повышение спектральной амплитуды поверхностно волнового микросейсмического поля. Граница заданных тел указана в соответствии со значением коэффициента глубинной привязки  $k_C = 0.4$ .

Интересно отметить, что для малых деформаций, характерных для микросейсмической волны, раскрытость трещин даже в несколько сотых долей микрона уже обеспечивает взаимодействие волн с включениями как с объектами с аномальным значением  $\nu$ .

## Заключение

Проведенные на численных моделях расчеты показывают, что наблюдаемый в экспериментах эффект кажущегося сверхразрешения в методе микросейсмического зондирования, заключающийся в раздельном наблюдении двух глубинных вертикальных объектов в поле длинных сейсмических волн, может проявляться, если эффективное значение коэффициента Пуассона среды (для низкоамплитудной микросейсмической волны) в этих включениях принимает аномальные значения – близкие к нулю. Физически это может означать наличие обширных зон микротрещиноватости, что характерно для тектонически активных районов, в том числе вулканических областей.

Выполненные работы поддержаны за счет гранта РФФИ № 13-05-00117 А «Развитие моделей глубинного строения земной коры в районах современной вулканической и гидротермальной активности по результатам зондирования с использованием естественного поля микросейсм».

Все параллельные расчеты выполнены в 2012-2013 гг. на высокопроизводительном кластере СКИФ "Чебышев" Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова.

## Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 683 с.
2. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов. // Физика Земли. 2008. № 1. С. 57-67.
3. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66-84.
4. Горбатилов А.В., Ларин Н.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В. Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубки взрыва // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 428. № 4. С. 526–530.
5. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Цуканов А.А., Тинакин О.В., Комаров А.Ю., Одинцов С.Л., Токман А.К. Новая технология микросейсмического зондирования в задачах изучения глубинного строения месторождений нефти и газа. // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 15-17.
6. Горбатилов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования. // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.
7. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Абкадыров И.Ф. Новые данные о глубинном строении северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 539–543.
8. Кузин А.М. О возможной природе относительно низких значений параметра  $V_p/V_s$  в рудных залежах флюидного генезиса. // Геофизика. 2012. №2. С. 7-15.
9. Рогожин Е.А., Харазова Ю.В., Горбатилов А.В., Шанов С.А., Степанова М.Ю., Митев А.А. Строение и современная активность Интрамизийского разлома в Северо-Восточной Болгарии по комплексу новых геолого-геофизических методов // Физика Земли. 2009. № 9. С. 66-74.
10. Туранк К., Фурментро Д., Дени А. Распространение волн и границы раздела в породах: Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. М.: Мир, 1994.
11. Электронный ресурс Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова <http://parallel.ru/cluster>. 2013.
12. Gorbatilov A.V., Montesinos F.G., Arnoso J., Stepanova M.Yu., Benavent M., Tsukanov A.A. New features in the subsurface structure model of El Hierro Island (Canaries) from low-frequency microseismic sounding. An insight into the 2011 seismo-volcanic crisis // Journal Surveys in Geophysics. 2013. V. 34. Issue 4. Pp. 463-489.
13. Matsushima T., Okada H. Determination of deep geological structures under urban areas using long-period microtremors // Butsuri-Tansa. 1990. V.43. № 1. pp. 21-33.