

в мировой литературе применительно к задачам физики Земли.

Сейсмологические проблемы представлены в работах Чубарова Д.Л. «Расчет и анализ роли приливных сил в процессе подготовки землетрясения», Васильевой М. А. «Сейсмичность и глубинное строение тектоносферы дальневосточного региона», Шабалина В.А. «Сейсмомикрорайонирование особой экономической зоны Советская Гавань», Ислямовой А.А. «Прогноз оползнеопасных участков склона на основе моделирования поля напряжений». В последней работе численное решение прямой задачи сочетается с применением известного пакета расчета амплитудных характеристик колебаний грунта.

Настоящий обзор не может претендовать на полноту представления всей информации о докладах секции. Все работы опубликованы в трудах симпозиума, значительная часть работ будет опубликована и в других изданиях. Надеемся, что в будущем нам удастся использовать возможности социальных сетей в сочетании с веб-трансляцией для информирования широкого круга специалистов о ходе работы конференции.

УСТОЙЧИВОСТЬ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМА СЕЙСМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА К ОШИБКАМ В СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

А.В. Азаров

Научный руководитель, заведующий лабораторией С.В. Сердюков
Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия

На практике, зачастую, используемые скоростные модели геологических сред содержат ошибки, которые влияют на результаты обработки сейсмических данных. Поэтому разработка алгоритмов, устойчивых к ошибкам в скоростных моделях является важной задачей.

В данной работе исследуется влияние ошибок в скоростной модели среды на результаты восстановления механизмов очагов при использовании методики, предложенной в [5]. В рамках данной методики рассматриваются источники с известной локацией, расположенные в горизонтально слоистой изотропной среде. Считается, что источники являются точечными, поэтому их описание производится с помощью тензора сейсмического момента M [1]. Методика состоит из двух основных этапов.

Первый этап заключается в вычислении шести полей от источников с тензором сейсмического момента, имеющим одну ненулевую компоненту (т.е. поля $u_{M_{11}}$, $u_{M_{22}}$, $u_{M_{33}}$, $u_{M_{12}}$, $u_{M_{13}}$, $u_{M_{23}}$).

Второй этап заключается в поиске комбинации шести рассчитанных полей, дающих зарегистрированное поле. Нужная комбинация ищется путем построения и минимизации функционала

$$\|u_{registr} - u_{sum}\|_2^2,$$

где $u_{registr}$ – зарегистрированное поле, $u_{sum} = \sum_{M_{ij}} w_{M_{ij}} u_{M_{ij}}$ – комбинация рассчитанных полей,

$w_{M_{ij}}$ – вес, с которым $u_{M_{ij}}$ входит в u_{sum} .

С целью получения синтетических данных, которые требуются для проведения анализа представленного алгоритма, выполнялось прямое моделирование волновых полей от точечных источников с различными механизмами очагов. Так как в рамках данной работы рассматриваются горизонтально слоистые среды, то моделирование полей целесообразно проводить с использованием методики «wavenumber integration» [3,4]. При использовании данной методики считается, что каждый слой является однородным и изотропным. Введение цилиндрической системы координат $\{z, r, \theta\}$ и рассмотрение сейсмических источников, распределенных на оси цилиндра, позволяет понизить размерность задачи, так как решение в таком случае становится независимым от координаты θ , что приводит к снижению вычислительных затрат и повышению скорости расчета синтетических сейсмограмм. Несмотря на то, что в рамках методики «wavenumber integration» вычисляются решения, не зависящие от угла ϕ , с помощью неё можно рассчитывать поля от источников с любыми механизмами [2].

Для исследования устойчивости алгоритма к ошибкам в модели среды рассматривались модели с измененными другими параметрами. В качестве примера рассматривались только случаи, когда имеются ошибки в верхних, близких к поверхности слоях. В таблице 1 приведены точная горизонтально-слоистая модель среды и модель с измененными параметрами двух верхних слоев (модель с ошибками), которые выделены полужирным шрифтом.

В точной модели выполнялось моделирование зарегистрированных полей $u_{registr}$, в модели с ошибками рассчитывались $u_{M_{ij}}$. В качестве восстанавливаемого механизма источника рассматривался источник сдвиговой дислокации с тензором сейсмического момента, имеющим одну ненулевую компоненту M_{12} .

Данный источник устанавливался на глубину 195 метров, форма сигнала бралась в виде импульса Рикера, с центральной частотой 100 герц. Система приемников располагалась на поверхности.

Таблица 1

Скоростные модели сред

Точная модель				Модель с ошибками			
Мощность (км)	Vp (км/с)	Vs (км/с)	ρ (кг/м ³)	Мощность (км)	Vp(км/с)	Vs(км/с)	ρ (кг/м ³)
0.0050	0.6000	0.3000	1600	0.0050	0.5000	0.2600	1500
0.0050	1.0000	0.5000	1750	0.0050	0.9000	0.4500	1750
0.0100	1.6000	0.9000	1800	0.0100	1.6000	0.9000	1800
0.1400	2.3000	1.3500	2000	0.1400	2.3000	1.3500	2000
0.0300	2.7000	1.6000	2200	0.0300	2.7000	1.6000	2200
0.0010	1.7000	1.0000	1360	0.0010	1.7000	1.0000	1360
0.0000	2.3000	1.3500	2000	0.0000	2.3000	1.3500	2000

Использование моделей с ошибками может приводить к изменению времен прихода волн на приемники,

из-за чего минимизация функционала $\|u_{registr} - u_{sum}\|_2^2$ не даст корректного результата. Это демонстрируется данными, приведенными в столбце 4 таблицы 2. Как показано в таблице, незначительное изменение скоростных параметров привело к тому, что источник сдвиговой дислокации не смог восстановиться. Чтобы решить данную проблему, необходимо проведение сдвига сеймотрасс по времени. С этой целью сеймотрассы, рассчитанные в различных моделях, сдвигаются друг относительно друга для нахождения максимума корреляции сигналов. Коэффициент корреляции двух трасс находится как

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N b_i^2}}$$

Таблица 2

Результаты восстановления компонент тензора сейсмического момента

Компоненты тензора	Значения компонент для сдвига	Восстановленные компоненты в точной модели	Восстановленные компоненты в модели с ошибками. Без учета изменения времени прихода волны	Восстановленные компоненты в модели с ошибками. С учетом изменения времени прихода волны	Восстановленные компоненты в модели с восстановленными верхними слоями. С учетом изменения времени прихода волны
M11	0,00	0,00	-0.0223	0.0021	0.0113
M12	1,00	1,00	-0.1808	0.6753	0.6783
M13	0,00	0,00	0.0000	0.0000	0.0000
M22	0,00	0,00	0.0223	0.0021	-0.0113
M23	0,00	0,00	0.0000	0.0000	0.0000
M33	0,00	0,00	0.0000	0.0000	0.0000

В качестве другого примера рассматривалась модель, где верхние двадцать метров среды были восстановлены методами поверхностной сейсмологии. Для этого проводилось моделирование поверхностных волн от ударного источника, расположенного на поверхности. Используя полученные данные, строились дисперсионные кривые, по которым находились скоростные параметры верхних слоев. В результате получалась отличная от точной модели среда, где первые двадцать метров представляли собой 6 тонких слоев (таблица с упругими параметрами не приводится). Скоростные параметры нижележащих слоев соответствовали точной модели. В данном случае механизм очага, как и в первой задаче, был восстановлен (Таблица 2, столбец 6), причем сдвиг сеймотрасс не потребовался.

Таким образом, в работе исследована устойчивость алгоритма к наличию ошибок в скоростной модели среды. Показана необходимость учитывать изменение времени прихода волн на приемники, которое может также возникать при наличии ошибок в локации источников. Показана возможность использования методов поверхностной сейсмологии при проведении микросейсмического мониторинга с целью уточнения скоростной модели среды, близкой к поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект № 16-35-00513 мол_а.

Литература

1. Aki K., Richards P. Quantitative Seismology: Theory and Methods, V.1, 1980. – 520 с.
2. Jost M. L., Herrmann R. B. A student’s guide to and review of moment tensors//Seismological Research Letters.–1989, 2–P. 37-57.
3. Lucifredi I., Ishii M. A coupled wavenumber integration approach for calculating the wavefield in large-scale laterally varying structures // Geophysical Journal International. – 2012. – Т. 188. – №. 1. – P. 195-210.
4. Schmidt H., Glattetre J. A fast field model for three dimensional wave propagation in stratified environments based on the global matrix method // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1985. – Т. 78. – №. 6. – P. 2105-2114
5. Азаров А.В., Сердюков А.С., Яблоков А.В. Методика определения механизмов очагов микросейсмических событий на основе моделирования полных волновых полей в горизонтально-слоистых средах /А.В. Азаров, // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 10. – С. 131–143