

МОНИТОРИНГ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Антон Витальевич Азаров

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

Александр Викторович Яблоков

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, e-mail: sasha.yablokov@mail.ru

В работе рассматривается проблема мониторинга низкочастотных событий при разработке твердых полезных ископаемых. Исследуются влияние конечно-частотных явлений распространения сейсмических волн на результаты сейсмоэмиссионной томографии. Для этого рассматриваются тонкослоистые модели сред. Приводятся результаты сравнения времен пробега от низкочастотных источников, рассчитанных с помощью решения уравнений упругости и уравнения эйконала. Делаются выводы о применении различных типов систем наблюдения при мониторинге низкочастотных событий в горизонтально-слоистых средах имеющие тонкие слои.

Ключевые слова: упругие волны, сейсмический источник, микросейсмический мониторинг, сейсмоэмиссионная томография, времена пробега, численное моделирование.

MONITORING OF LOW-FREQUENCY MANIFESTATIONS IN HARD MINERAL MINING

Anton V. Azarov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Postgraduate, Junior Researcher, tel. (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

Aleksander V. Yablokov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., undergraduate student, e-mail: sasha.yablokov@mail.ru

Under consideration is monitoring of low-frequency manifestations in hard mineral mining. The effect of finite-frequency phenomena in seismic wave propagation on seismo-emission tomography results is studied. Thereto, thinly laminated models of study media are considered. The comparative results are reported for transit time from low-frequency sources calculated by solving elasticity equations and eikonal equations. The authors review different-type monitoring systems designed to control low-frequency manifestations.

Key words: elastic waves, seismic source, microseismic monitoring, seismo-emission tomography, transit time, numerical modeling.

Введение. При мониторинге большой области массива горных пород используются алгоритмы микросейсмического мониторинга, получившие название эмиссионной сейсмической томографии (СЭТ) [1]. Они основаны на суммировании сейсмограмм, и дают объемную плотность интенсивности излучения во всей контролируе-

мой области породного массива и предназначены для обработки данных от множества микросейсмических событий различной интенсивности.

Для реализации алгоритмов СЭТ необходимо вычислять времена пробега от каждой точки среды до всех приемников. Часто, для решения этой задачи используют уравнение эйконала, которое является основой геометрической оптики. Применение уравнения эйконала дает высокую точность при моделировании распространения высокочастотных волн в средах с неоднородностями, характерные размеры которых много больше по сравнению с длинами волн. Когда характерные размеры неоднородностей близки к длинам сейсмических волн, данный подход может давать ошибки, поэтому использование СЭТ для мониторинга низкочастотных событий в неоднородных средах может давать неверные результаты. В этом случае, для расчета времен пробега можно использовать другой подход, основанный на решении системы уравнений упругости.

Данная работа направлена на исследование конечно-частотных явлений распространения сейсмических волн. Для этого рассматриваются тонкослоистые модели сред. Приводятся результаты сравнения времен пробега от низкочастотных источников, рассчитанных с помощью решения уравнений упругости и уравнения эйконала. Делаются выводы о применении различных типов систем наблюдения при мониторинге низкочастотных событий в горизонтально-слоистых средах имеющие тонкие слои.

Расчет времен пробега. В работе, для расчета времен пробега от каждой точки пространства до каждого приемника использовались два подхода. Первый основан на решении уравнения эйконала, которое является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных и записывается следующем виде:

$$\begin{aligned} |\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x})| &= f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega \setminus \Gamma \subset \mathbb{R}^n, \quad f(\mathbf{x}) > 0, \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}) &= g(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Gamma \subset \Omega, \end{aligned} \quad (0)$$

где $u(\mathbf{x})$ – время первого прибытия волны в точку пространства \mathbf{x} , $f(\mathbf{x})$ – величина, обратная к полю скоростей среды, $g(\mathbf{x})$ – начальное значение $u(\mathbf{x})$. Для решения этого уравнения использовалась схема, предложенная в работе [2].

Второй подход заключается в расчете времени пробега сейсмических волн на основе решения системы уравнений упругости:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma} &= \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} + [(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T], \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{u} – скорости смещения среды, $\boldsymbol{\sigma}$ – напряжения.

В рамках данной работы рассматриваются трехмерные горизонтально-слоистые модели сред, поэтому решение системы (2) проводилось с использованием методики «wave number integration» [3, 4]. При использовании данной методики считается, что каждый слой является однородным и изотропным. Введение цилиндрической системы $\{z, r, \theta\}$ координат и рассмотрение сейсмических источников распределенных на оси цилиндра, позволяет понизить размерность задачи, так как решение в таком случае становится независимо от координаты θ , что приводит к снижению вычислительных затрат и повышению скорости расчета синтетических сейсмограмм. Решение в каждом слое представляется в виде суперпозиции поля генерируемого источником внутри слоя при отсутствии границ и неизвестных полей, которые необходимы, что-

бы удовлетворить граничным условиям на поверхностях раздела сред. В каждом слое решается задача упругости, решение которой можно выразить в терминах скалярных потенциалов ϕ , Λ , Ψ удовлетворяющие волновым уравнениям:

$$\begin{aligned}(\nabla^2 + h^2)\phi &= 0, \\(\nabla^2 + h^2)(\Lambda, \Psi) &= 0,\end{aligned}\tag{3}$$

где h и k волновые числа для продольных и поперечных волн соответственно. Скалярный потенциал ϕ характеризует поле продольных волн, скалярные потенциалы Λ и Ψ характеризуют поле поперечных волн. Альтернативным способом решения системы (2) является метод конечных разностей, который хорошо подходит для моделирования сейсмических волн в неоднородных сложно построенных средах [5, 6]. Этот метод позволяет проводить достаточно точное моделирование в широком частотном диапазоне, универсален и прост в реализации, но для трехмерных сред требует больших вычислительных мощностей.

Сравнение времен пробега. Для исследования конечно-частотных эффектов рассматривались горизонтально слоистые модели сред, имеющие тонкие слои, то есть слои, мощность которых много меньше длины волны. В качестве примера рассматривалась модель среды, содержащая высокоскоростной слой мощностью 10 метров (табл. 1). Источник располагался на глубине 700 метров.

Таблица 1

Скоростная модель среды

Номер слоя	Мощность (м)	Vp (м/с)	Vs (м/с)	ρ (кг/м ³)
1	650	2000	1200	1700
2	10	3000	1800	2200
3	600	2000	1200	1700

На первом этапе времена пробега рассчитывались на основе решения уравнения эйконала. На втором этапе времена пробега рассчитывались на основе решения системы уравнений упругости. В этом случае для моделирования использовался низкочастотный импульсный источник с частотой 15 Гц. Далее вычислялась разница между временами пробега, которые были рассчитаны различными способами.

На рис. 1 приведен график разницы времен пробега рассчитанных на основе решения уравнения упругости и уравнения эйконала. Разница вычислялась на вертикальной прямой в 450 метрах от источника.

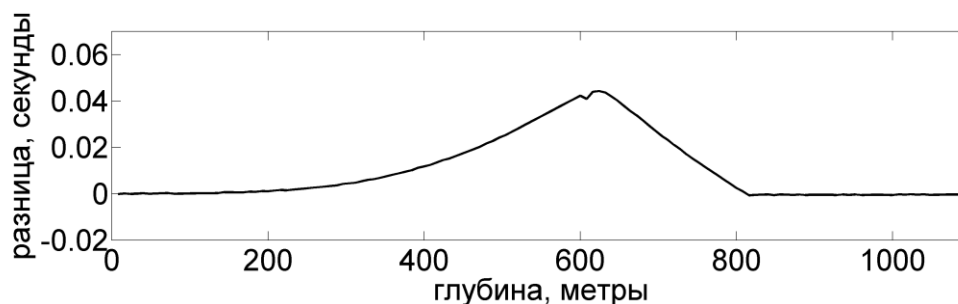


Рис. 1. Разница между временами пробега рассчитанных различными способами на прямой, расположенной в 450 метрах от источника

Как видно из рис. 1, уравнение эйконала предсказывает более раннее первое вступление сейсмических волн в области, содержащей высокоскоростной слой номер 2 (табл. 1), причем внутри слоя первое вступление регистрируется на 0.045 секунды раньше. При удалении от слоя, его влияние уменьшается. На расстояние нескольких длин волн, разница становится близкой к нулю. На рис. 2 показана разница времен пробега на прямой расположенной в 136 метрах от источника. На графике видны незначительные отличия между временами пробега. Таким образом, разница между временами пробега увеличивается при удалении от источника в области содержащей высокоскоростной слой.

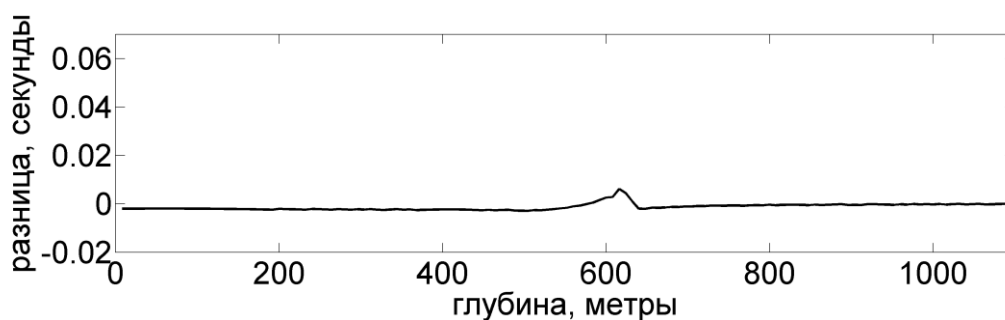


Рис. 2. Разница между временами пробега рассчитанных различными способами на прямой, расположенной в 136 метрах от источника

Выводы

При сейсмическом мониторинге низкочастотных событий, в горизонтально-слоистых средах, содержащих тонкие слои, расчет времен пробега на основе уравнения эйконала может давать ошибки. Наибольшие ошибки наблюдаются в областях содержащие тонкие слои и по мере удаление от этих областей ошибки уменьшаются. Данный эффект важно учитывать при использовании скважинных систем наблюдения пересекающие тонкие слои. В этом случае расчет времен пробега необходимо проводить на основе решения системы уравнений упругости, иначе применение методов СЭТ может давать некорректные результаты. В случае использовании методов СЭТ для наземных систем наблюдения, расчёт времен пробега на основе уравнения эйконала можно проводить, если тонкие слои расположены достаточно глубоко от поверхности.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хогоев Е. А., Колесников Ю. И. Применение сейсмозмиссионной томографии для изучения геодинамически активных зон // *SeismicTechnology*. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 59-65
2. Nikitin A. A., Serdyukov A. S., Duchkov A. A., Azarov A. V., Yablokov A. V. Parallel implementation of seismic traveltime computations for 3d tomography // *15th SGEM GeoConference on Science and Technologies In Geology, Applied and Environmental Geophysics, SGEM2015 Conference Proceedings, Bulgaria, Albena, June 16–25, 2015*.
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
Аки К., Ричардсон П. Количественная сейсмология. Теория и методы: в 2-х томах. – М., 1983.

5. Курленя М. В., Сердюков А. С., Азаров А. В., Никитин А. А. Численное моделирование волновых полей от микросейсмических событий при подземной добыче полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых–2015. – №4. – С. 61-69

6. Азаров А. В., Сердюков А. С. Моделирование точечных источников микросейсмического излучения в анизотропных горных породах пластов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 3. – С. 9–14.

© А. В. Азаров, А. В. Яблоков, 2017