

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. – СПб. ВНИГИ, 2013. – Текст электронный. – URL: <https://vsegei.ru/ru/info/seismic/>. (Дата обращения 15.11.2023).
2. Блинова Т.С., Удоратин В.В., Дягилев Р.А., Баранов Ю.В., Носкова Н.Н., Конанова Н.В. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2015. – 178 с.
3. Блинова Т.С. Формирование единой базы данных для прогноза геодинамически неустойчивых зон слабосейсмичных регионов // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22, № 2. – С. 5-30. – DOI: <https://doi.org/10.21455/gr2021.2-13>.
4. Блинова Т.С. Анализ связи геодинамически неустойчивых зон с глубинным строением Западно-Сибирской плиты // Горное эхо. – 2023. – № 3 (92). – С. 73-81. – DOI: 10.7242/echo.2023.3.10.
5. Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.
6. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 409 с.: ил.
7. Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона / Ин-т геофизики УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. – 225 с.: ил.
8. Крылов С.В. Сейсмические исследования литосферы Сибири. Избранные труды. – Новосибирск: Гео, 2006. – 345 с.
9. Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий [Карты] / Е.Е. Милановский, О.А. Мазарович, С.Л. Костюченко, Д.И. Жив. – 1:4000000. – М: ПКО «Картография», 2007.
10. Удоратин В.В., Конанова Н.В. Глубинное строение литосферы по профилю MEZTIMPECH // Отечественная геология. – 2000. – № 1. – С. 44-50.
11. Blinova T. Generalization of the features of the geodynamically unstable zones and their connection with the deep structure low seismic activity regions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM: 19<sup>th</sup> SGEM 2019, Bulgaria, 30 June-6 July. – Albena, 2019. – V. 19, № 1.1. – P. 813-820. – DOI: 10.5593/sgem2019/1.1.

УДК 550.834, 519.688

DOI:10.7242/echo.2024.3.7

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МИГРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОРОДНОГО МАССИВА

М.В. Тарантин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** На моделях геологических сред и реальных волновых данных рассмотрены результаты миграционных преобразований. Результаты позволяют получить изображение геологической среды в практически любой ее точке. По этой причине подобные работы представляются целесообразными для разведки сейсмическими методами при проходке выработок в процессе ведения горных работ. Представлены примеры обнаружения некоторых геологических неоднородностей, способных влиять на безопасность работ на руднике. По результатам исследований метод представляется информативным.

**Ключевые слова:** сейсмические исследования, миграция, неоднородность, горные породы, Верхнекамское месторождение калийных солей.

Миграция, или дифракционное преобразование, или Д-преобразование направлено на построение сейсмического изображения геологической (или другой изучаемой) среды по имеющимся сигналам от набора источников и набора приемников. Частный случай миграции – обработка сейсмотрасс по методике общей глубинной точки (сейсмограмм ОГТ), широко используемый на практике, предполагает существование фраг-

мента поверхности, для которой можно определить угол падения и равный ему угол отражения сейсмических волн. Для общего случая такого условия не требуется; достаточно существования точки среды, которая может принять излученный источником сигнал и, в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля, переизлучить его до приемника. Математическим выражением этого принципа можно считать интеграл Кирхгофа (1), который часто используется при миграционных преобразованиях [1].

$$u\left(r_0, t - \frac{r}{v}\right) = \frac{1}{4\pi} \oint_Q \left\{ u(t) \frac{d}{dn} \frac{1}{r} + \frac{1}{r} \frac{d}{dn} u(t) + \frac{1}{vr} \frac{dr}{dn} \frac{d}{dt} u(t) \right\} dq \quad (1)$$

Как видно, запаздывание колебаний среды в точках наблюдения  $r$  на поверхности  $Q$  относительно колебаний элементарных источников в точках  $r_0$  изображения среды определяется величиной скорости распространения колебаний и формой этой поверхности. Выражение (1) предполагает интегрирование по некоторой замкнутой поверхности; на практике это условие не соблюдается и интегрирование редуцируется до поверхности, содержащей систему приемников.

Точки среды, образующие неоднородность пространства и рассеивающие сейсмические сигналы не так, как окружающие, формируют искомое изображение среды. Построение каждой отдельной точки  $I(P)$  этого изображения производится по всем имеющимся сигналам  $f$ , излученным  $i$ -м источником колебаний и зарегистрированным  $k$ -м приемником на поверхности наблюдений, согласно (2); при необходимости используются весовые коэффициенты  $\varphi$ .

$$I(P) = \sum_i \sum_k f(i, k, t(P, i, k)) \cdot \varphi(P, i, k) \quad (2)$$

В случае линейных профильных наблюдений, широко применяемых в сейсморазведке, существует неопределенность пространственного положения отражающих / рассеивающих элементов относительно используемой системы измерений. Для устранения неоднозначности удобно использовать несколько линий наблюдений либо площадные измерения. Наличие подходящей системы измерений теоретически позволяет получать изображение геологической среды в любом недоступном для прямого наблюдения месте, что может быть актуальным для проходческих горных работ.

Использование такого подхода в шахтных условиях месторождения рудного типа описано в работе [2], где представлены попытки обнаружения разрывных нарушений угольных пластов. Авторы работы [4] предлагают использовать в качестве источника колебаний проходческую машину, что в совокупности с трехкомпонентными приемниками позволит оперативно получать информацию о расположенных впереди особенностях строения породы. Применение опережающих исследований на руднике способствует решению ряда технологических задач и вопросов безопасности ведения работ. Однако прежде необходимо оценить чувствительность и избирательность метода в реальных условиях.

Тестовым материалом для миграционных преобразований явились записи, полученные в пределах одного из рудников ВКМКС в непосредственной близости от нетронутой части панели (рис. 1). В предположительно однородном пространстве имеется небольшое количество значимых рассеивающих объектов – выработок; их форма носит линейный характер, большинство углов в местах сочленения не округлы.

Была развернута измерительная сеть с регулярным шагом вдоль и поперек выработки; каждый из приемников пространственно совпадал с одной из точек излучения сейсмического сигнала. Результатом стала совокупность из 96 96-канальных сейсмограмм ОПВ. Удар источника колебаний в почву выработки приводит к образованию упругих поперечных волн, идущих в стороны вдоль «подошвы» выработки [3]. Именно они были использованы в качестве информативных.

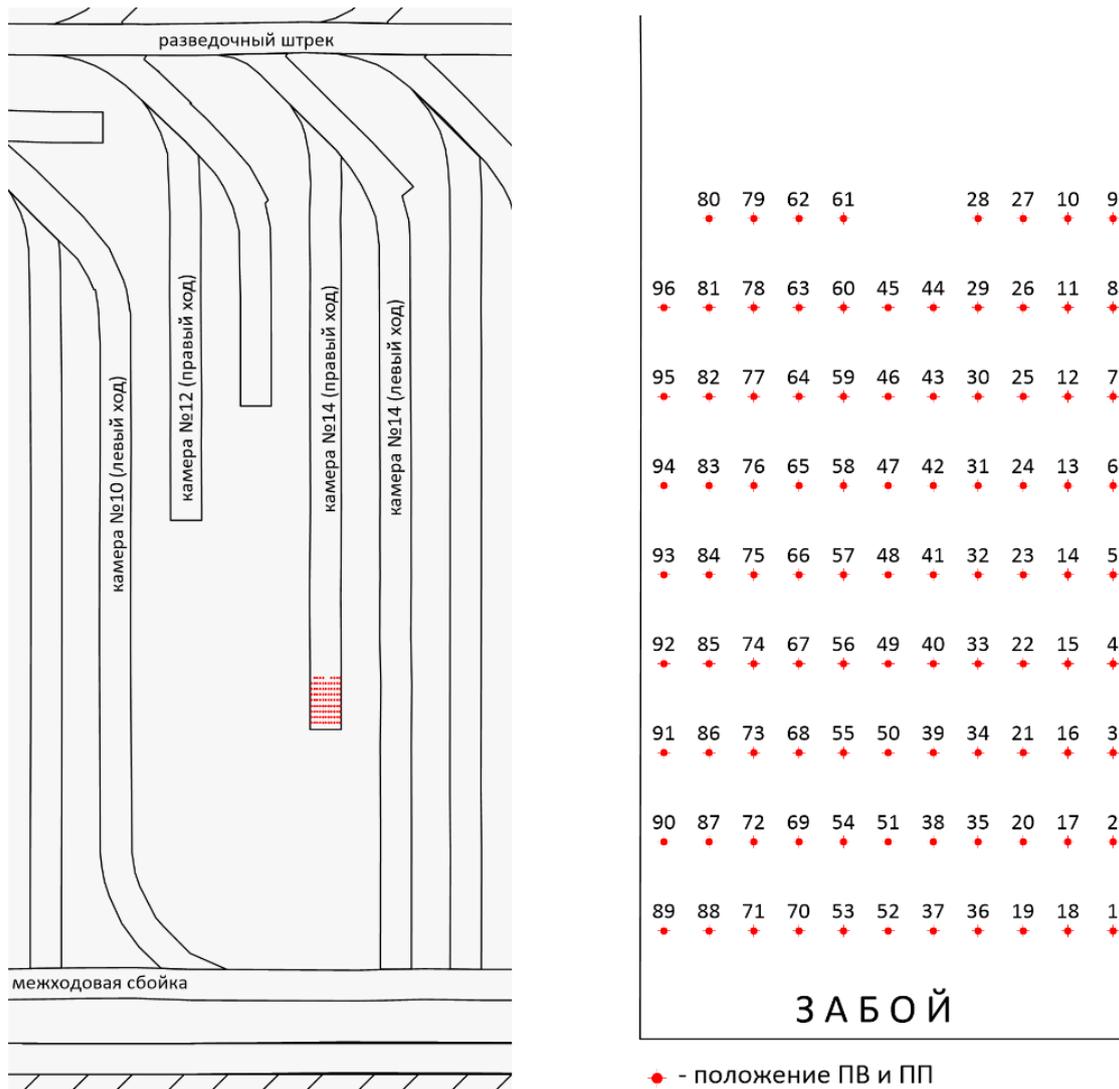


Рис. 1. Обзорная схема района исследований и схема расстановки сейсмоприемников

В соответствии с правилом преобразования каждая точка окружающего пространства, представляющая интерес для поиска элементов дифракции, должна быть охарактеризована амплитудой отраженного сигнала. Этот сигнал зарегистрирован набором приемников от набора излучателей и содержится в записанных сейсмотрассах на времени  $t = (r - r_0)/v$ . Проведение соответствующих вычислений приводит к карте амплитуд рассеянных волн. Линейный размер карты, таким образом, определяется длиной имеющихся волновых записей.

Для обработки материалов разработан программный модуль, позволяющий строить изображения среды по известной геометрии измерительной системы и скоростных параметров изучаемой части пространства (рис. 2). Ввиду существенной зависимости результатов построений от точности определений времен пробега сигналов, предлагается несколько вариантов их вычислений: для однородной среды, для кусочно-однородной в приближении линейного хода сейсмических лучей и конечно-элементного аналога среды с соблюдением законов геометрической сейсмики.

Имеется возможность построения изображения среды в выделенном направлении или вокруг системы наблюдения; коррекция амплитуд из-за геометрического расхождения; построение покомпонентных изображений (раздельно для горизонтальных и вертикальных направлений); введения зоны «тишины», устраняющей повышенные ам-

плитуды первых вступлений сигналов и некоторые другие опции. Алгоритм может быть распараллелен по нескольким вычислительным ядрам.

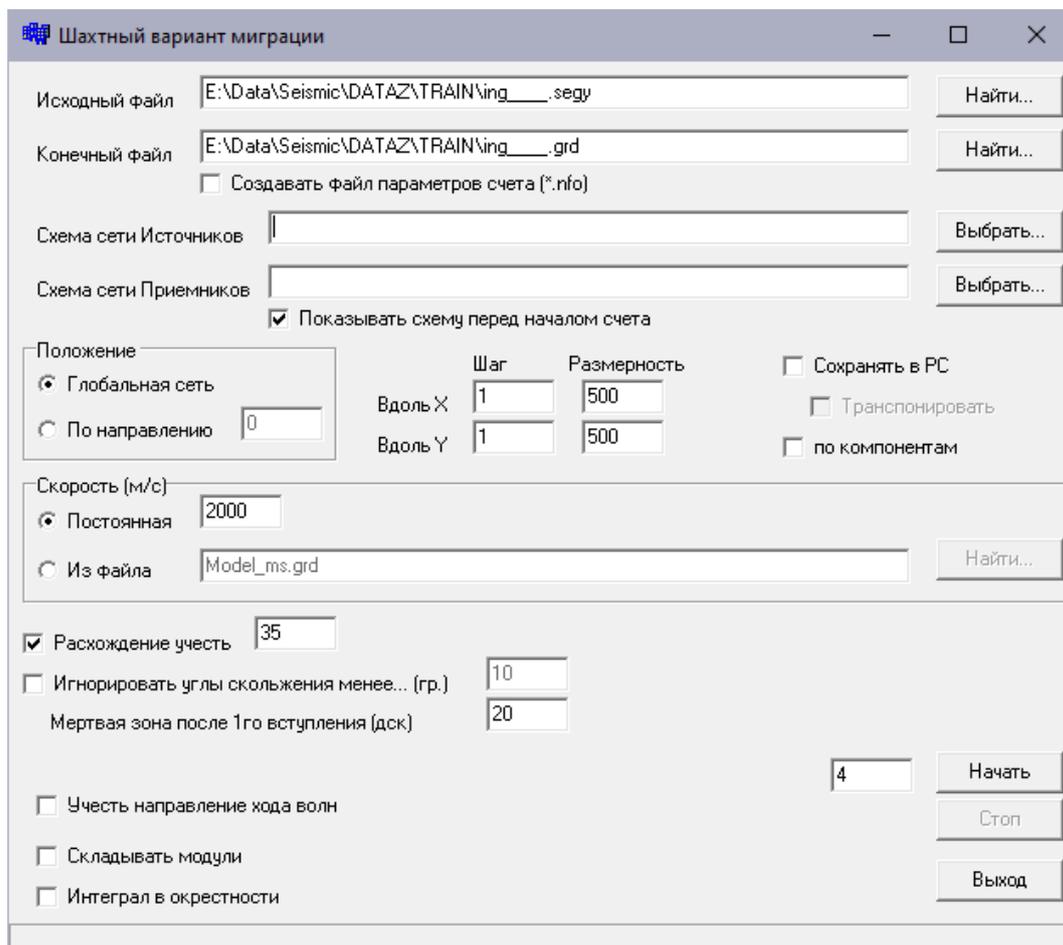
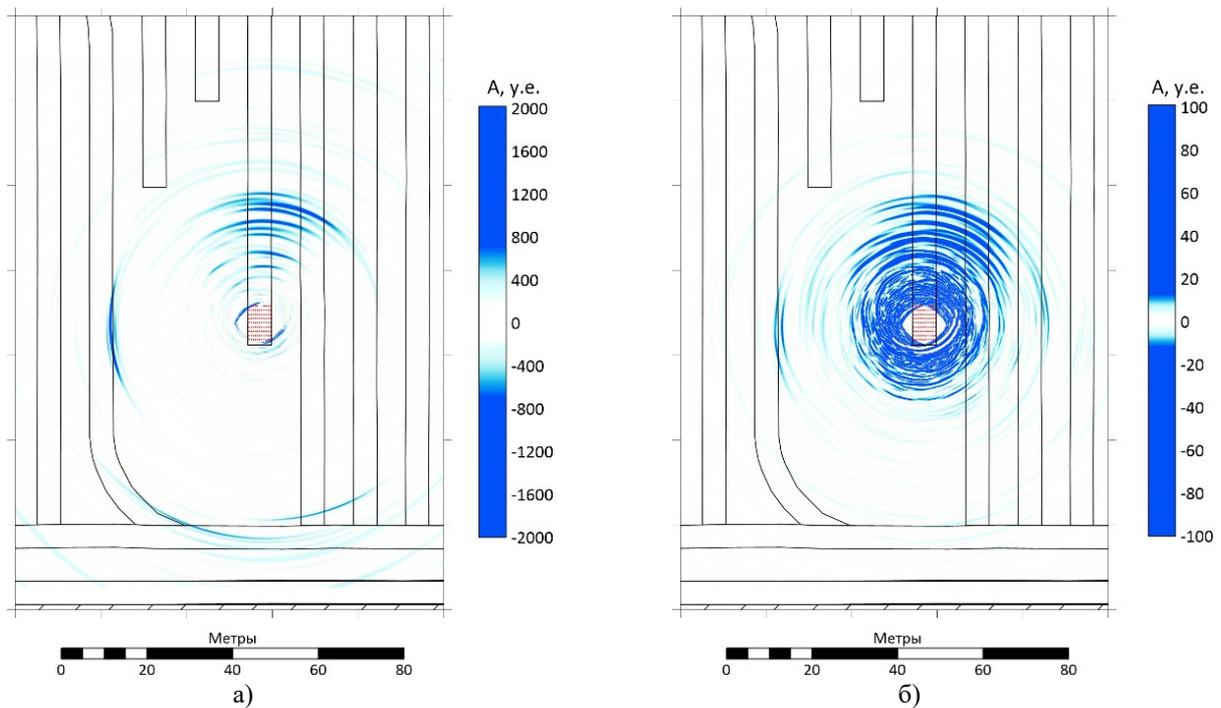


Рис. 2. Внешний вид вычислительного модуля

Входными параметрами являются собственно волновой файл одного из применяемых форматов, описание геометрии системы измерений, описанная таблично, и скорости распространения информативных волн. Скоростная модель среды может быть загружена из сеточного файла формата Golden Software GRID (\*.grid), либо задана постоянным значением, выраженным в м/с. Результатом работы модуля является волновой файл одного из используемых форматов либо сеточный файл, задающий интенсивность рассеяния волновых сигналов, в координатах модели (рис. 3).

Ввиду совокупного задания волнового файла и геометрии системы наблюдений, алгоритм может работать как к «площадными» материалами, так и со скважинными. Во втором случае результатом будет глубинный разрез, характеризующий «вертикальную» неоднородность изучаемой толщи и дополняющий результаты межскважинного просвечивания вне контура скважин. Кроме того, строгая линейность профиля наблюдений, предполагаемая обычно при обработке и интерпретации материалов, в данном случае не обязательна, так как алгоритм учитывает все геометрические особенности системы.

Как видно, максимальные амплитуды рассеянных сигналов сосредоточены вблизи нескольких объектов: соседних выработок и места их сочленения. Отсутствие иных областей повышенных амплитуд на изображении изучаемой области среды подразумевает ее однородность, что согласуется с априорными данными об исследуемом участке рудника.



**Рис. 3.** Карты амплитуд сигналов отраженных поперечных волн с предварительной обработкой (а) и без нее (б)

Следует отметить, что поскольку дифракционное преобразование лишь перераспределяет во времени полную энергию сигнала, сохраняя ее полное значение, его применение не исключает подготовительной фильтрации волновых материалов, необходимой при стандартной обработке: удаления регулярных и случайных помех, экстремальных частотных компонент, выравнивания уровня амплитуд. Без подготовительного этапа дальнейшие преобразования дают неправдоподобный результат (рис. 3 б).

Для оценки чувствительности и точности примененного алгоритма были составлены и обработаны модели некоторых геологических объектов. В качестве примеров рассмотрим зону трещиноватости (рис. 4а) и зону замещения (рис. 4б), как представляющие наибольший интерес с точки зрения безопасности и продуктивности горных работ.

Основным поисковым свойством объектов являются рассеивающие способности, именно поэтому область трещиноватости выделяется более уверенно, чем зона замещения пород; размытые и линейные границы области, не формирующие широкоугольного рассеяния, способны остаться незаметными на фоне возможных шумов.

Наличие сети наблюдений из нескольких линейных профилей предположительно позволяет получать изображение геологической среды в плоскости этой сети. Как показывают эксперименты, это не всегда верно; важное значение приобретает точность применяемой скоростной модели. На рис. 5 приведен пример изображения среды в вертикальной плоскости, полученного от системы из четырех параллельных профилей наблюдений, расположенных в понижающей выработке. Для верхней части изображения актуальна скорость упругих волн 3200 м/с, для нижней – 2800 м/с. Как видно, неопределенность скоростного строения изучаемой толщи существенно снижает контрастность и информативность изображения, маскируя часть информации.

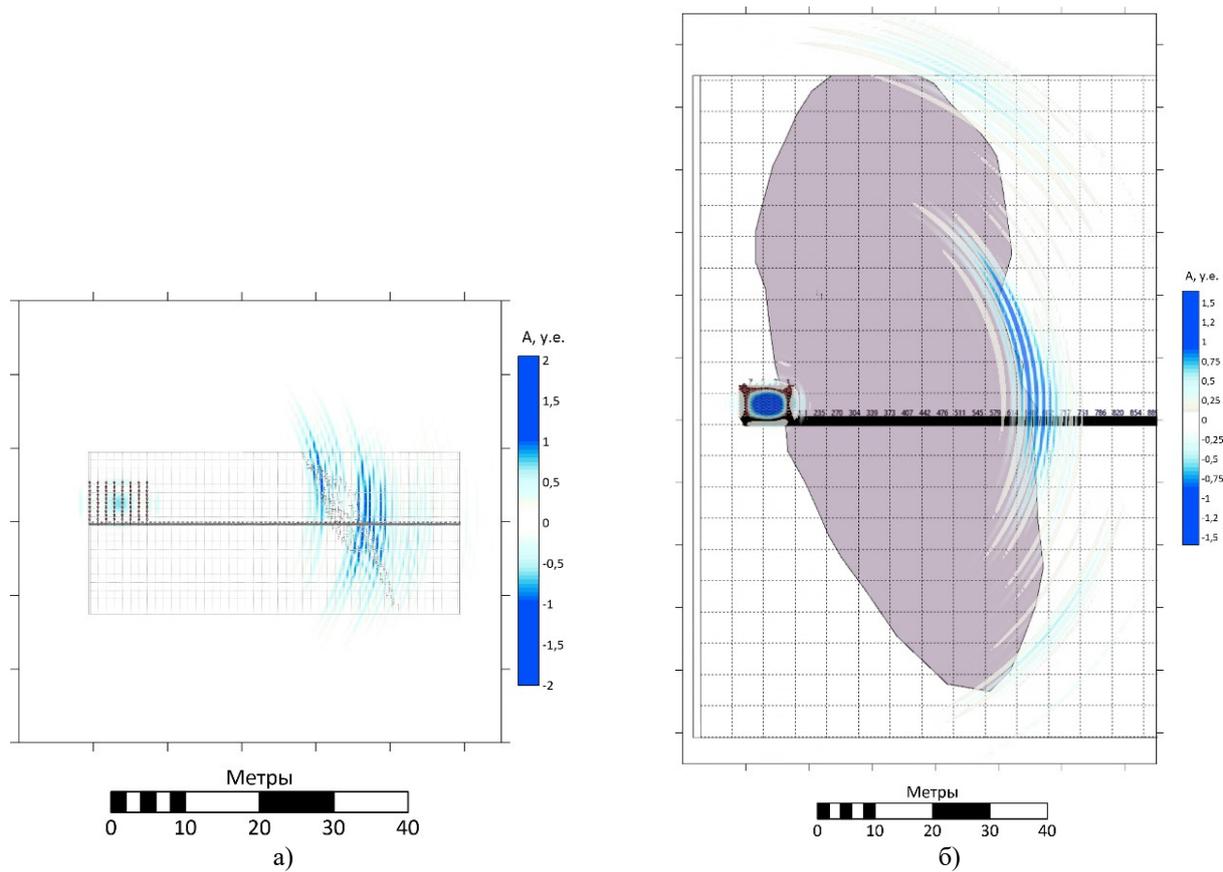


Рис. 4. Изображения модельной среды, осложненной зоной трещиноватости (а) и зоной замещения (б)

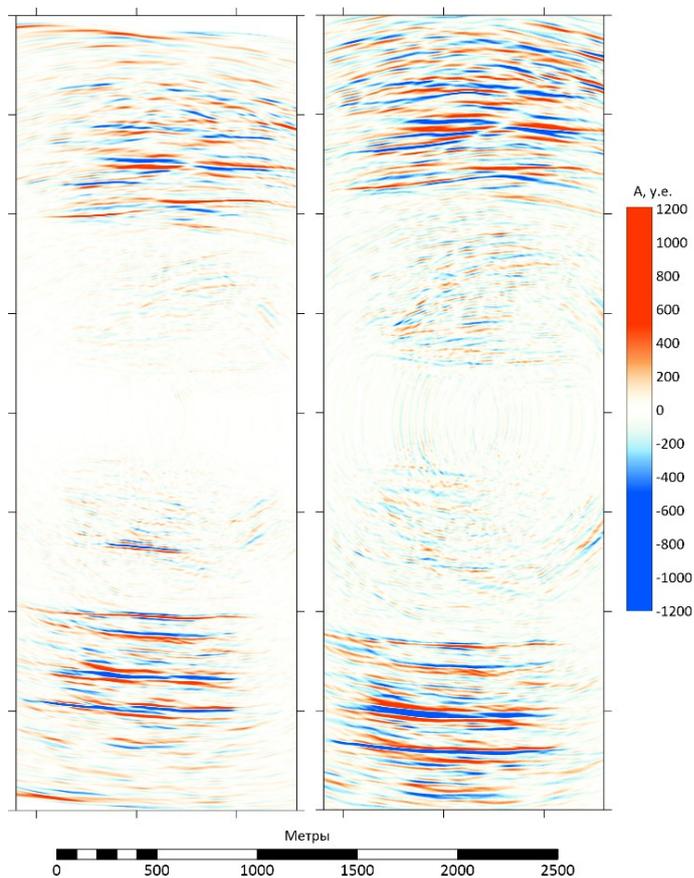


Рис. 5. Варианты сейсмического изображения одного интервала разреза при значениях скорости волн 2800 м/с (слева) и 3200 м/с (справа)

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500029-1).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сейморазведка: Справ. геофизика / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981 – 464 с.: ил.
2. Глухов А.А. Алгоритм метода дифрагированных волн по прогнозу дизъюнктивов угольных пластов // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2021. – №1. – С. 73-82.
3. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В. Исследование характеристик направленности точечных источников колебаний с помощью полноволнового моделирования // Горное эхо. – 2023. – № 2 (91). – С. 76-81. – DOI: 10.7242/echo.2023.2.14.
4. Poletto F., Petronio L. Seismic interferometry with a TBM source of transmitted and reflected waves // Geophysics. – 2006. – V. 71, № 4. – P. SI85-SI93. – DOI: 10.1190/1.2213947.

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2024.3.8

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИИ (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей)

Г.П. Щербина

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Гравиметрические исследования подработанного горного массива выявили необычную форму сдвижения пород над пустотами шахтных выработок. На вертикальных срезах трехмерной трансформанты гравитационного поля обнаружены отрицательные аномалии линейной формы, расходящиеся веером от центральной части выработанного пространства вверх. Данные аномалии можно объяснить наличием в подработанной толще плоских наклонных разуплотнений, создающих на трансформантах характерный рисунок. Плоские наклонные разуплотнения, очевидно, представляют техногенные зоны локализованной трещиноватости. Ширина трещиноватых зон 190-200 м, угол наклона изменяется от 40° до 90°.

**Ключевые слова:** горные выработки, подработанная толща, сдвижение пород, формы сдвижения.

Характер деформирования подработанного массива над горными выработками за счет собственного веса подробно описывается в работе [1] и других, где рассмотрены формы сдвижения горных пород под влиянием разработки. Под сдвижением понимается деформирование и перемещение подработанных толщ под действием силы тяжести над пустотным пространством шахтного поля. В работе [1] указывается, что процесс сдвижения происходит в виде сдвигов пород по плоскостям напластования, появления секущих трещин и трещин расслоения.

Характер нарушенности пород подработанного массива зависит от многих факторов: от площади выработанного участка, глубины расположения пустотного пространства, соотношения площади выработки и толщины подработанной толщи, от физических и механических свойств пород, от тектоники и условий залегания геологических слоев. Разные участки толщи, подвергшейся влиянию горных работ, имеют различия по степени нарушенности. Наиболее разрушенные деформированные породы располагаются у кровли горных выработок. Вверх степень нарушенности породного массива уменьшается. В работе [1] по этому критерию выделяется снизу вверх несколько зон: область разрушения, зона разломов, зона активных трещин, зона локальных трещин, зона прогиба. В случае горизонтального напластования зоны плавно переходят одна в другую.