

формулам (5-7) вычисляются значения полиномов пятой и седьмой степени в выбранных точках. Если значения полиномов в узловых точках совпадают с заданной точностью, то значения интеграла вычисляются по формуле (8). Если значения не совпадают, то деление на кубы повторяется. Экспериментально определенная скорость вычислений для представленного алгоритма составляет примерно 0.0003 сек для расчета поля от 1 тела в 1 точке [5].

Таким образом, разработан экономичный высокоточный алгоритм решения прямой задачи для сферического параллелепипеда, который является универсальной аппроксимационной ячейкой для решения широкого круга практических задач на сферической Земле.

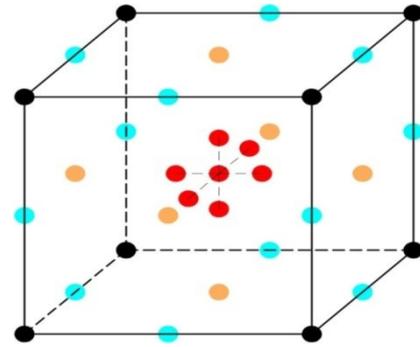


Рис. 2. Схема узловых точек функции $g(t)$ в элементарном кубе, на которые разбивается область G

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18–35–00299 мол_а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учеб. Пособие. – 2-е изд. – М.: Наука, 2002. – 6302 с.
2. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках / ГИ УрО РАН. – Пермь: УрО РАН, 2015. – 142 с.
3. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. – Апатиты: КаЭМ, 2003. – 252 с.: ил.
4. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности / А.С. Долгаль. – Абакан: Фирма «Март», 2000. – 188 с.
5. Долгаль А.С., Симанов А.А., Хохлова В.В. Учет сферичности Земли при вычислении поправки за влияние рельефа местности // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 42-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2015. – С. 76-78.
6. Лукавченко П.И. Таблицы и номограммы для вычисления поправок силы тяжести за рельеф местности при съемке с гравиметрами. – М.; Л.: Гостоптехиздат. 1951. – 41 с.: черт.
7. Пятаков Ю.В, Исаев В.И. Методы решения прямых задач гравиметрии // Известия Томского политехнич. ун-та. – 2012. – Т. 320, № 1. – С. 105-110.
8. Старостенко В.И., Манукян А.Г. Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1983. – №12. – С. 34-50.
9. Jonson Lane R., Litehiser Joe J. A method for computing the gravitational attraction of three-dimensional bodied in a spherical or ellipsoidal Earth // Geophysical Research. – 1972. – V. 77, № 35. – P. 6999-7009.
10. Takin M., Talwani M. Rapid computation of the gravitation attraction of topography on a spherical Earth // Geophysical Prospecting. – 1966. – V.2. – P. 119-142.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2019.3.13

РАЗВИТИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И.А. САНФИРОВ, А.В. НЕЖДАНОВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассматриваются комплексные сейсморазведочные исследования, включающие скважинные, наземные и шахтные технологии. Совместная интерпретация всех видов сейсморазведочных наблюдений применяется для построения детальных многоуровневых моделей водозащитной толщи. Отмечается важность скважинных исследований в решении подобных задач. Рассматриваются: вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), межскважинное просвечивание (МСП), сейсмокаротаж (СК) и сейсмическое скважинное профилирование по методике многократных перекрытий (ММП). Приведен пример формирования подобной интерпретационной модели на основе комплексирования наземных и скважинных сейсморазведочных исследований в районе аварийного участка в пределах шахтного поля СКРУ-2.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, комплексные сейсморазведочные исследования, сейсмическое скважинное профилирование, интерпретационные модели, пространственные построения.

Начиная с 90-х годов прошлого века основу сейсморазведочных исследований на территории Верхнекамского месторождения составляет комплекс наземной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения и шахтной сейсмоакустики. За прошедшие годы аппаратно-методическое обеспечение развивалось в соответствии с требованиями и возможностями времени. На смену габаритной малоканальной аналоговой регистрирующей аппаратуре, типа ИСН-01-24 и ее шахтным аналогам, пришли компьютеризованные компактные сейсмостанции модульного типа «IM 2416 SESMO DAS» с возможностью набора неограниченного числа каналов. Для наземных наблюдений источники возбуждения упругих колебаний ударного типа переведены на механизированную основу, применяется новый импульсный источник погружного типа с использованием энергии пороховых зарядов [1]. В соответствии с аппаратными существенно расширились и методические возможности от двумерных систем наблюдений до пространственных с кратностью, определяемой решаемыми задачами, а не ограничениями регистрирующей аппаратуры. Очевидно, что с ростом качества и количества сейсморазведочного информационного потока меняются и требования к содержанию цифровой обработки и интерпретации. Применяются инновационные алгоритмы спектрального разложения, анализа рассеянных волн, выполняются пространственные построения, как в рамках ГИС-технологий, так и на основе специализированного сейсморазведочного программного обеспечения [2]. В этап обработки внедряются элементы машинного обучения.

В рамках разработанной системы интерактивной сейсморазведки [3] осуществляется полномасштабное комплексирование основных направлений сейсморазведочных исследований с учетом их возможностей и ограничений. На пространственно согласованных с наземными наблюдениями участках результаты интерпретации шахтной сейсмоакустики применяются для построения детальных многоуровневых моделей водозащитной толщи [4].

При этом существуют ограничения в более широком применении высоко разрешающих результатов шахтной сейсмоакустики из-за конфигурации горных выработок и отсутствия горно-технических возможностей их проведения. Компромисс между детальностью результатов и возможностью их получения достигается за счет применения скважинных сейсмических исследований. Данный вид сейсмических исследований обладает большей мобильностью в сравнении с наблюдениями в горных выработках, при этом обеспечивает уровень детальности результатов, сопоставимый с результатами шахтной сейсмоакустики [5].

В качестве базовых методов скважинных исследований из традиционных применяются: вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) в прямой и обращенной версиях, сейсмокаротаж (СК) и межскважинное просвечивание (МСП). Кроме того, разработана и опробована на практике новая технология скважинной сейсморазведки - сейсмическое скважинное профилирование по методике многократных перекрытий (ММП). Технология основана на теоретических положениях систем интерференционной регистрации отраженных волн в рамках ММП.

Основная цель скважинных сейсмических исследований - локализация в пространстве контрастных вертикально-ориентированных тонких скоростных неоднородностей, обусловленных техногенной и природной нарушенностью породного массива. Аппаратурное обеспечение включает специализированный скважинный источник с частотой импульса 2000Гц и 24-канальную гидрофонную косу с пьезокерамическими приемниками, регистрирующими объемное сжатие.

Скважинные технологии применяются в комплексе с наземными и по возможности шахтными сейсморазведочными исследованиями. Совместная интерпретация всех видов сейсморазведочных наблюдений позволяет уточнить направленность регистрируемых пакетов отраженных волн.

Интервал исследований скважинной сейсморазведки в основном ограничивается глубиной бурения, которая обусловлена спецификой объектов исследований. К такого рода объектам могут относиться: участки ускоренных оседаний земной поверхности над отработанными площадями шахтных полей, районы действующих и строящихся шахтных стволов, зоны развития аварийных ситуаций. В связи с этим в комплексе сейсморазведочных исследований скважинные могут сочетаться с различными версиями малоглубинной сейсморазведки, предназначенными в том числе и для изучения надсоляных отложений. Подобное сочетание является дальнейшим развитием концепции построения интерпретационных моделей, на основе разноуровневых наблюдений. Стандартный источник информации о строе-

нии и свойствах надсоляной толщи - результаты инженерной сейсморазведки, анализируемые в комплексе с изучением преломленных и поверхностных волн, регистрируемых при выполнении малоглубинных сейсморазведочных исследований. За счет включения в интерпретационную модель результатов скважинных исследований появляется возможность детализации особенностей скоростного строения породного массива до уровня частот в 500-700 гц. Кроме того, в интерпретационной модели появляется дополнительная информация составляющая о наличии и конфигурации вертикально-ориентированных отражающих элементов, обусловленных дезинтеграционными процессами.

Формирование подобной интерпретационной модели на основе комплексирования наземных и скважинных сейсморазведочных исследований реализовано при проведении мониторинговых наблюдений в районе аварийного участка в пределах шахтного поля СКРУ-2.

На аварийном участке выполнены специализированные сейсмические исследования для СМТ в четырех скважинах. Применялась методика скважинного профилирования ММП. По результатам обработки (рис.1) спрогнозированы внешние границы дезинтегрированного породного массива.

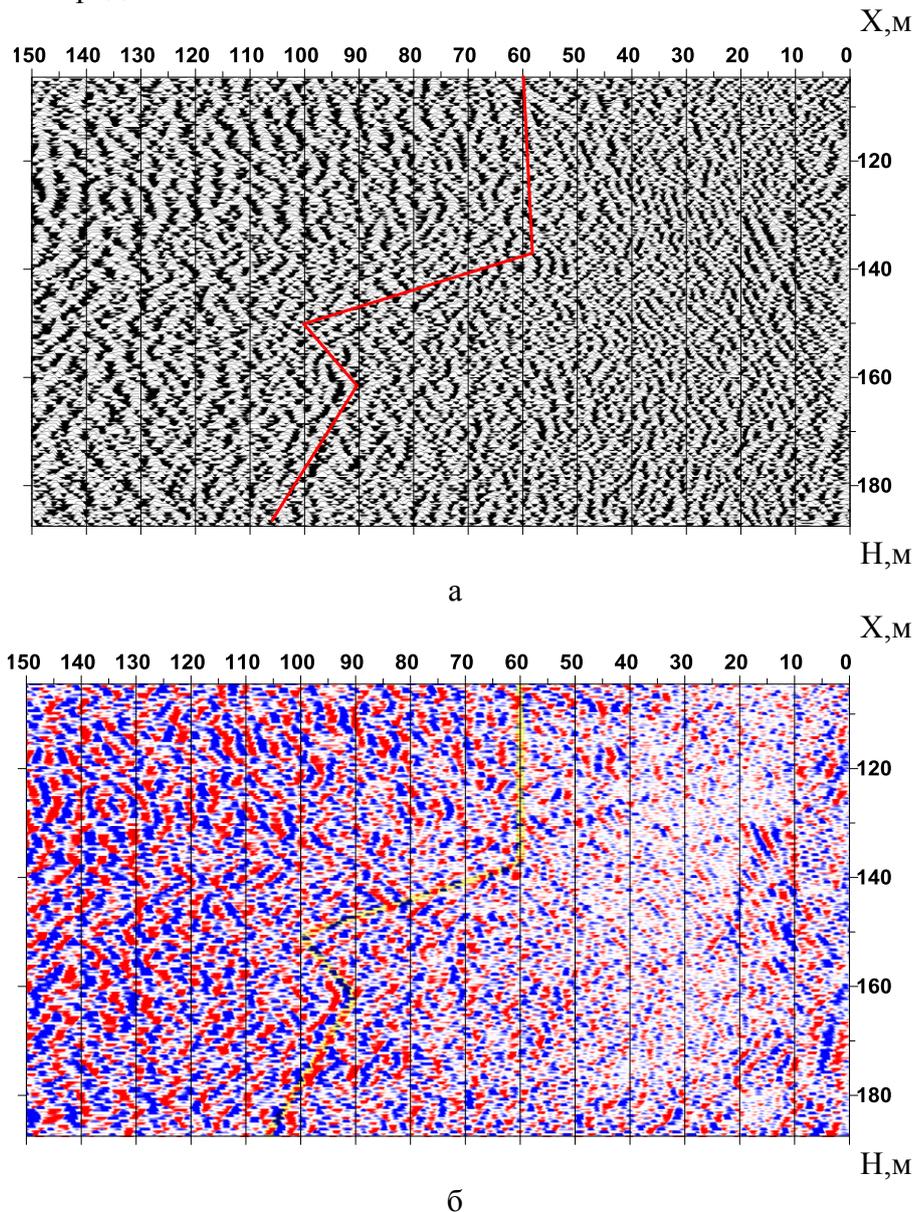


Рис.1. Временной разрез (а) скважинного профилирования ММП и его динамический аналог (б)

В осредненном виде (рис.2,а) его форма имеет вид перевернутого конуса. В проекции на горизонтальную плоскость на уровне ТКТ (рис.2.б) его границы согласуются с границами максимальных негативных изменений по данным наземной сейсморазведки. Наибольшее раз-

витие разрушения массива по скважинным сейсмическим данным прогнозируется в северном направлении, а наименьшее в южном. В северо-западном направлении отмечается промежуточное состояние и возможно влияние северо-западного потенциально-опасного участка.

Данные элементы строения породного массива контролируемого участка дополняют его пространственную скоростную модель (рис.3). Модель построена по результатам наземных мониторинговых сейсморазведочных наблюдений в версии малоглубинной сейсморазведки, предназначенной для изучения калийной залежи и перекрывающих ее отложений

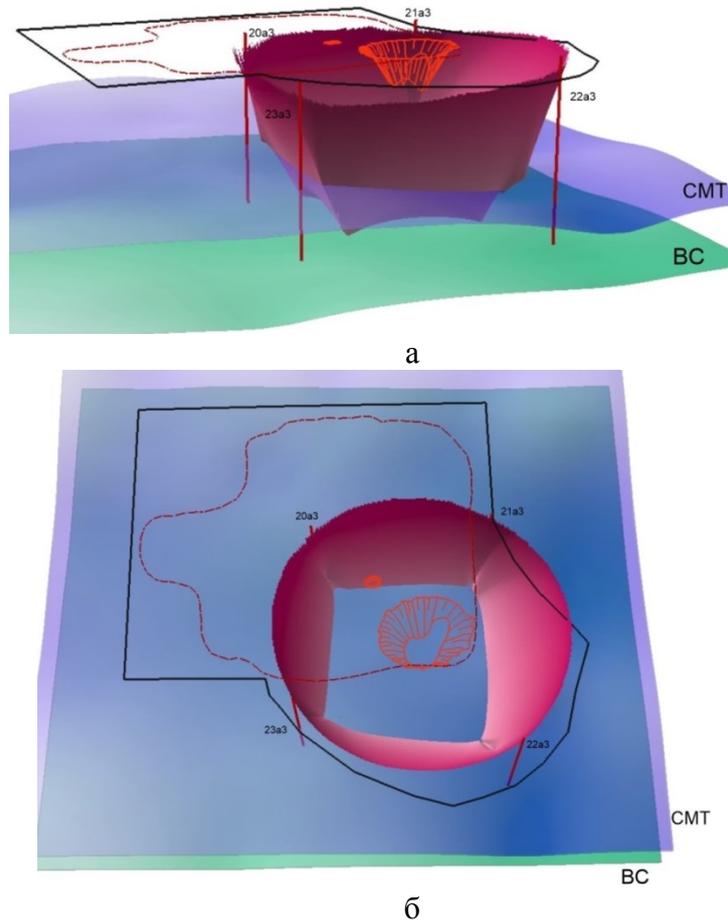


Рис. 2. Пространственная (а) и площадная (б) модели зоны дезинтегрированного массива

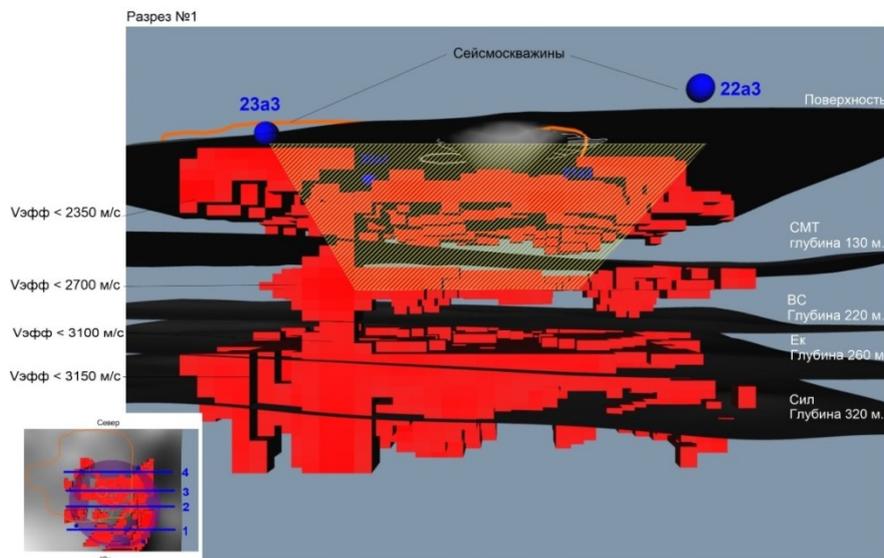


Рис. 3. Этапная пространственная модель скоростного строения контролируемого участка

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Импульсный пороховой источник упругих колебаний: пат. 2439620 Рос. Федерация: МПК G 01 V 1/116 (2006.01) / Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Ахматов А.Е., Бабкин А.И., Голдобин А.А., Миньков С.И.; патентообладатель ГИ УрО РАН. – № 2010124548/28. заявл. 15.06.2010; опубл. 10.01.2012. – Бюл. № 1.
2. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Жикин А.А., Фатькин К.Б., Байбакова Т.В. Выделение малоглубинных природно-техногенных неоднородностей породного массива в различных реализациях интерференционного поля отраженных волн // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 56-63.
3. Санфиоров И.А., Прийма Г.Ю. Интерактивная сейсморазведка на геомеханически проблемных участках соляных рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 198-202.
4. Барях А.А., Санфиоров И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 10-22.
5. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Байбакова Т.В. Сейсмоакустическое профилирование МОГТ в скважинах // Инженерная геофизика 2017: материалы 13-й науч.-практ. конф. и выставки. – Кисловодск, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700420.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2019.3.14

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА УЧЕТА СКОРОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

М.В. ТАРАНТИН

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассматривается алгоритм определения скоростей суммирования сейсмических волн и недостатки его классической реализации на примере малоглубинных исследований в условиях Верхнекамского месторождения солей. Предложен ряд его модификаций для повышения информативности и достоверности получаемых результатов. Приведены примеры их использования.

Ключевые слова: цифровая обработка, скоростные неоднородности, малоглубинная сейсморазведка.

Кинематическая интерпретация данных малоглубинной сейсморазведки, выполняемой в условиях ВКМКС [1], базируется на алгоритме поиска максимальной когерентности волновых пакетов, известной также как «*Semblance*» [2]. Можно отметить, что алгоритм постоянно модернизируется и совершенствуется [3-5], что способствует обнаружению отражений с большей надежностью и однозначностью.

В общем случае реализация алгоритма *semblance* предполагает нахождение скоростей распространения волн ($V_{огт}$) для каждого времени (t_0), которые обеспечивают максимальную суммарную когерентность пакетов отражений в пределах зарегистрированных сейсмограмм. Для ускорения процесса обработки на скоростной интервал накладываются определенные ограничения. Также это предполагает некоторое снижение погрешности определения скоростей.

Однако, как показывает практика, в случае недостаточной когерентности отраженных волн, результат может оказываться неустойчивым. Неустойчивость проявляется в физически невозможных различиях получаемых скоростей при переходе от одной точки профиля к соседней на выбранном времени и при переходе к соседнему времени в пределах одной сейсмограммы (рис. 1 а, кривая V_1). Для дальнейшего использования результаты необходимо регуляризовать, привести в согласие с теоретическими и практическими ожиданиями.

Для приведения результатов вычислений к пригодному для интерпретации виду был разработан алгоритм регуляризации [6], основной целью которого является уменьшение влияния интервалов понижения скорости с глубиной. Такие интервалы являются аномальными, так как согласно общей теории, для реальных сред скорости суммирования должны увеличиваться с глубиной. При значительных отрицательных градиентах определение интервальных скоростей распространения волн согласно выражению Урупова-Дикса [7] оказывается невозможным.

При построении функции когерентности используется скользящее временное окно, причем шаг окна существенно меньше его длины. Таким образом, одно волновое отражение охватывается сразу несколькими окнами и потому на результирующем поле представ-