

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЯМИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ 4D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Санина И.А., Усольцева О.А., Шаумян А.В.
Институт динамики геосфер РАН

Общие сведения

Для оценки эффективности разработанной методики была проведена серия полевых экспериментов на Геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», расположенной на правом берегу р. Лопасни в 2,5 км к западу от д. Починки. Сейсмопрофилирование выполнялось на опорной площадке размером 180х180 м, удаленной на 300 м к юго-востоку от лабораторного корпуса ГФО «Михнево». В пределах площадки было разбито два ортогональных профиля в субширотном (профиль 2-1) и субмеридиональном (профиль 2-2) направлениях с шагом 20 м, протяженностью 180 м.

В юго-западном секторе на расстоянии 20 м от пересечения профилей находится горная выработка, состоящая из вертикального шахтного ствола диаметром 4 м и субмеридионального подземного тоннеля протяженностью 20 м, высотой 2 м, шириной 4 м. Горная выработка заложена на глубине 20 м и представляет собой искусственную преграду на пути распространения сейсмического сигнала.

В 200 м к северо-западу опорной площадки пройдены 2 скважины глубиной 31 и 115 м. Результаты комплексных исследований, выполненных в скважинах, использованы при обработке данных тестового сейсмотомографического эксперимента.

Методика исследований

Сейсмотомографический эксперимент выполнялся в 3 сессии (ноябрь, январь и март). Регистрация сейсмического волнового поля осуществлялась вдоль профилей 2-1 и 2-2 от источника возбуждения, который попеременно располагался с запада и востока от окончания профиля 2-1 (очаги 1 и 2), с севера и юга от окончания профиля 2-2 (очаги 3 и 4). Схема эксперимента представлена на рис .1.

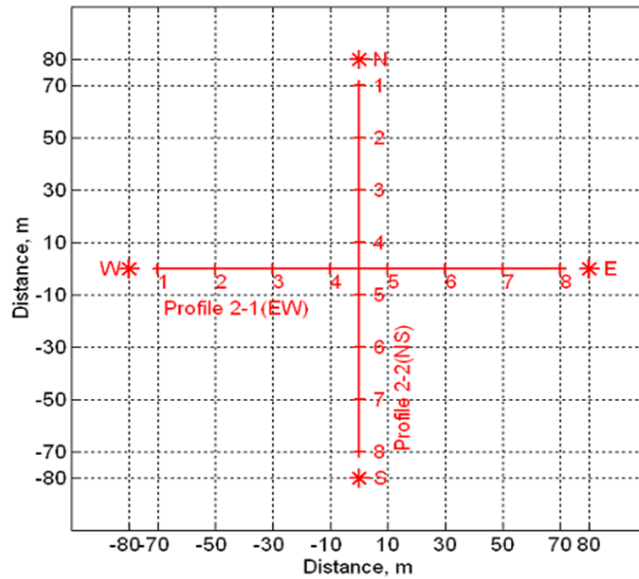


Рис. 1. Схема эксперимента

Интерпретация экспериментального материала выполнялась в соответствии с существующей методикой накопления сигнала. Результаты суммирования 50 сейсмограмм показаны на рис. 2.

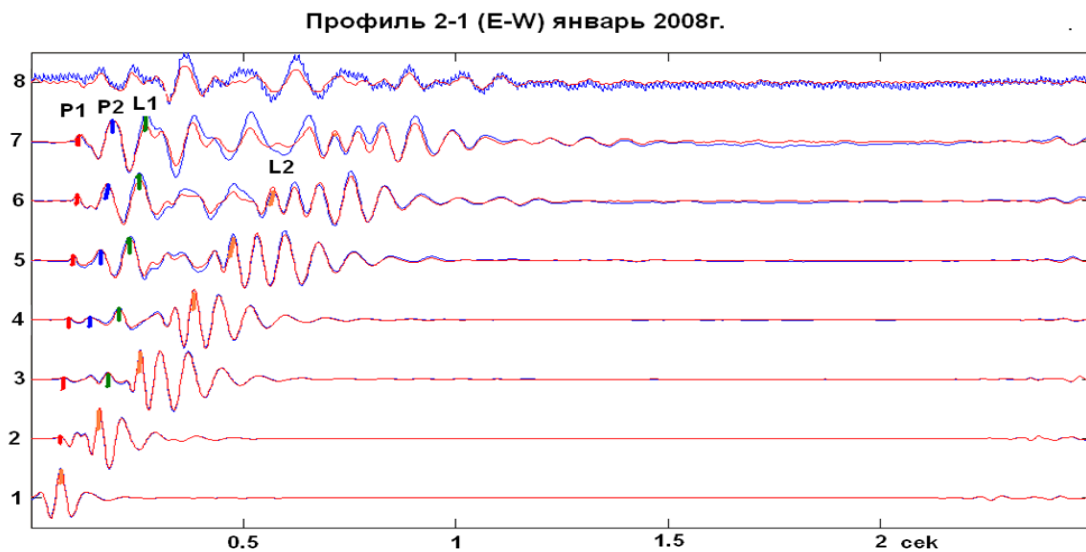


Рис.2 Суммарная сейсмограмма:
синяя линия – нефильтрованная запись, красная - отфильтрованная в диапазоне 1 - 40 Гц

Колебания, регистрируемые на расстояниях до 200 м, имеют довольно широкий спектральный состав с максимумом в районе 15 – 30 Гц.

В качестве метода получения пространственно-скоростных моделей среды был выбран метод сейсмической томографии на временных задержках. В силу специфики условий

задачи, а также требуемой высокой точности стандартные методы были модифицированы путем изменения способов параметризации среды (параметризация с использованием кубических Би-сплайнов) и способов построения лучей (построение лучей ненулевой ширины).

Параметризация с использованием кубических Би-сплайнов

Параметризация с использованием Би-сплайнов применяется в декартовой системе координат. При построении сейсмотомографических моделей часто возникает необходимость задавать неравномерную сетку. Би-сплайны хорошо помогают справиться с этой задачей. Би-сплайн аппроксимация является аппроксимацией общего типа и поэтому не накладывает серьезных ограничений на форму возмущающей функции. Исследования, проведенные в ходе выполнения проекта РФФИ 03-05-64650, показали преимущество использования кубических Би-сплайнов перед линейными Би-сплайнами. Такая параметризация обеспечивает лучшее восстановление скоростных аномалий среды, а модели, построенные с её использованием, содержат меньше артефактных неоднородностей.

Построение лучей ненулевой толщины

В принятой лучевой теории время пробега сейсмической волны определяется функционалом Ферма, в котором интегрирование выполняется вдоль экстремали (луча):

$$T = \int_L \frac{dl}{v(x)}, \text{ где } v(x) \text{ – скорость сейсмической волны в точке } x, L \text{ – траектория}$$

сейсмического луча, также зависящая от скорости сейсмических волн в среде, координат источника. Это так называемый математический луч - бесконечно тонкая кривая. На самом же деле реальный луч, распространяющийся в среде, имеет конечную толщину, зависящую от расстояния между источником и приемником. При построении луча ненулевой толщины определяется первая зона Френеля как область, в которой разность хода волн меньше, чем половина длины волны. Точка x принадлежит множеству F , если она удовлетворяет неравенству:

$$\left| t_{sx} + t_{rx} - t_{sr} \right| \leq \frac{T}{2},$$

где T – период сейсмической волны, t_{sr} – время пробега вдоль сейсмического луча, t_{sx} – время пробега от источника к точке x , t_{rx} – время пробега от приемника к точке x . Легко проверить, какие точки принадлежат, а какие не принадлежат множеству F , если знать для

всего исследуемого объема поле времен пробега, соответствующих данному источнику. и поле времен пробега, соответствующих данному приемнику.

С учетом этого уравнение, с помощью которого определяется время пробега сейсмической волны, принимает следующий вид:

$$T = \int_L \frac{1}{R(l)} \int_{R_l} \frac{dr}{v(x)} dl, \text{ где } R_l - \text{ эллипс Френеля, перпендикулярный траектории}$$

сейсмического луча: dr – элемент площади R_l , $R(l)$ – площадь R_l .

Использование лучей ненулевой толщины в задачах сейсмической томографии позволяет получить детальное восстановление тонкой пространственной структуры среды, в частности в поверхностных слоях.

Результаты экспериментальных исследований

В результате натурного эксперимента в пределах рассматриваемого массива были зарегистрированы следующие волны:

- преломленные волны от первого и второго слоя (предположительно глубина 15 и 30 м),
- отраженные волны от этих двух слоев,
- две поверхностные волны.

В зимний период (январь) за счет сезонного промерзания приповерхностного слоя прямая волна зафиксирована вдоль всей длины профилей 2-1 и 2-2 при различном положении источника возбуждения в отличие от экспериментов, выполненных в ноябре и марте. В этом случае уменьшение скорости распространения волны и затухание сейсмического сигнала связаны с оттаиванием, набуханием и снижением прочности (связности) приповерхностного слоя.

Последовательная регистрация серии рефрагированных (преломленных и отраженных) волн подтверждает слоистое строение геологической среды. После прохождения поверхностной волны на годографах прослежено четкое вступление отраженной волны от локального водоупора – ростиславльской толщи. Вступление рефрагированной высокоскоростной волны с относительным временным запаздыванием, выделенной в картине волнового поля вдоль субмеридионального профиля 2-2, ориентированного вкост залегания слоев, вероятно, связано с наличием прослоя кремня в известняках.

Значения вариаций скоростей продольных волн для моделей «ноябрь» и «март» относительно модели «январь» сопоставимы с точностью определения времен вступлений

сейсмических волн и не могут на данном этапе исследований использоваться для мониторинга напряженно-деформированного состояния среды. Поэтому дальнейшие исследования велись путем анализа спектрально-временных характеристик записей, которые являются более чувствительными к изменению параметров среды. При их анализе были получены значимые вариации. Пример спектограммы вдоль перпендикулярных профилей для январского эксперимента показан на рис. 3.

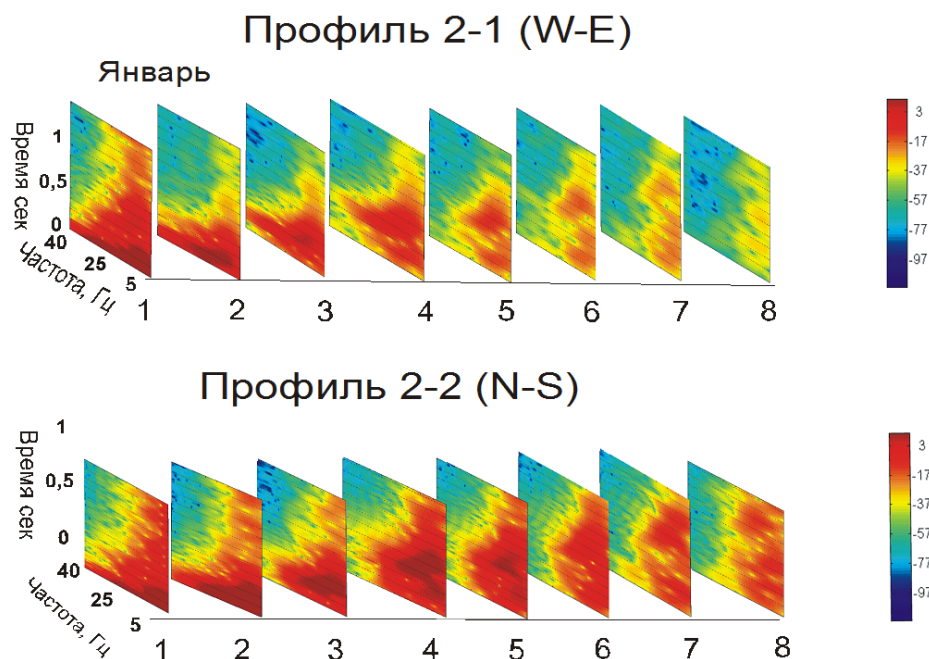


Рис. 3. Спектрограмма вдоль профилей 2-1 и 2-2

Прослеживаются заметные различия в спектральном составе волнового поля для субширотного профиля 2-1 и субмеридионального профиля 2-2 на одинаковых удалениях от источника. Выделяются два экстремума и локальные ячейки интенсивного затухания сейсмического сигнала. Экстремумы связаны с наличием сейсмогенерирующих границ в разрезе, области аномального затухания сигнала обусловлены наличием крупных (до 1 м в диаметре) каверн или неравномерной трещиноватостью массива в интервале глубин от 10 до 26 м.

Построение разностных спектрально-временных диаграмм позволяет уменьшить влияние структурных элементов, присущих слоистой пористо-трещиноватой среде, на формирование «рисунка» волнового поля. Наряду с этим сравнительный анализ амплитудно-частотных характеристик способствует более четкому выделению различий в

состоянии среды для каждой серии эксперимента. При сопоставлении диаграмм разности спектральных амплитуд «январь-ноябрь» и «январь-март» (рис. 4) установлена неоднородность затухания сейсмического сигнала по ортогональным профилям, более сильно выраженная по профилю 2-1, расположенному согласно простиранию основных границ.

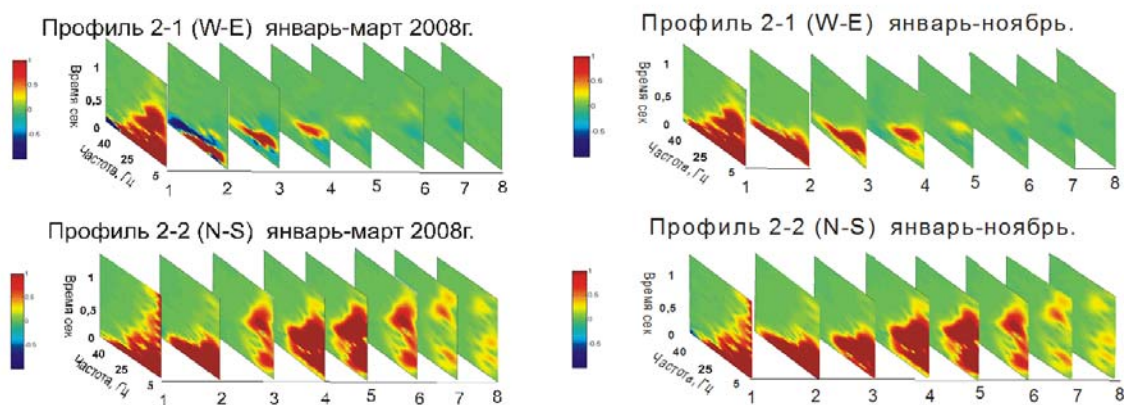


Рис. 4. Разность спектральных амплитуд

Наблюдается снижение интенсивности сигнала, связанного с интервалом глубин 10-26 м в период «январь-март» по отношению к периоду «январь-ноябрь», что может быть объяснено общим трендом снижения уровня подземных вод и соответствующим снижением интенсивности водонасыщения массива горных пород.

Таким образом, анализ разностных спектрограмм позволяет проследить изменение состояния массива на фоне общей закономерности “сглаживания” картины волнового поля и снижения частотного спектра.

Комплексная модель, содержащая данные как об основных особенностях скоростного строения, так и о диссипативных свойствах среды приведена на рис.5.

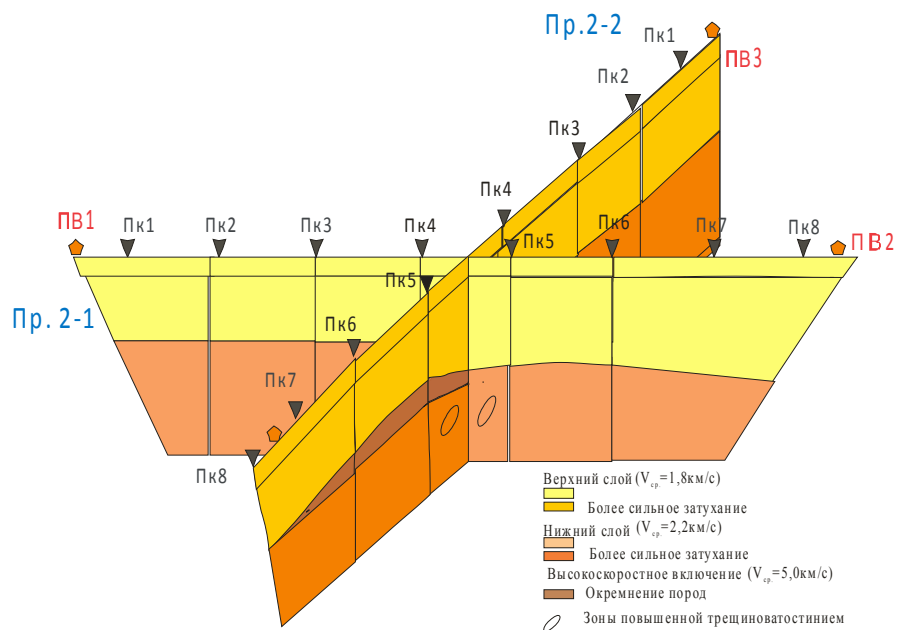


Рис.5. Комплексная модель.

Выводы

1. Проведенные натурные эксперименты убедительно продемонстрировали преимущества использования динамических характеристик при изучении вариаций параметров среды методом сейсмической томографии. Длительный мониторинг подтвердил анизотропию свойств среды и выявил динамику состояния изучаемого массива.
2. Рассматриваемая среда, представленная слоистым пористо-трещиноватым коллектором, специфически проявляется в волновом поле с четко выраженными тенденциями к затуханию и уменьшению скорости упругой волны по глубине, к снижению частотного спектра. В осадочной (терригенно-карбонатной) толще наиболее значимые изменения характеристик волнового поля фиксируются вкrest простирания выделенных слоев.
3. Комплексный анализ кинематических и динамических вариаций волнового поля может быть использован при организации мониторинга напряженно-деформированного состояния среды. Результаты сейсмических исследований, выполненных поэтапно, послужат основой при разработке методики внесения поправок, учитывающих неоднородность изучаемого массива горных пород (пористость, трещиноватость, наличие прослоев и степень водонасыщенности).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 24.

Направление 2. Научное обоснование и разработка инновационных ресурсосберегающих экологически безопасных технологий освоения природных и техногенных месторождений.