

Применение низкочастотной сейсмической шумовой томографии для мониторинга за разработкой месторождения сверхвязкой нефти

■ Косарев Я.С., Файзетдинов Г.Р., Крылов П.С., Ситдинов Р.Н.,
Казанский (Приволжский) федеральный университет. г. Казань.

Аннотация: Данная научная работа посвящена проблеме мониторинга месторождения сверхвязких нефтей с применением методов пассивной сейсморазведки. В настоящей работе проведено описание опытно-методических исследований метода шумовой томографией с их дальнейшей качественной оценкой и интерпретацией.

Ключевые слова: шумовая томография, парогравитационное дренирование, волна релея, кросс-корреляция, пассивная сейсморазведка, контроль за разработкой.

Добыча тяжёлой нефти является одной из основных проблем, встающих перед современными нефтегазовыми компаниями. Основная сложность заключается в том, что тяжёлая нефть — это высоковязкий продукт, для которого неприменимы обычные методы добычи. Специально для тяжёлой нефти и битума был создан метод добычи SAGD (парогравитационный дренаж), суть которого заключается в паровом “вытапливании” нефти или битума и дальнейшей добычи смеси воды и менее вязкого продукта. Главной сложностью в проведении SAGD является необходимость в его постоянном мониторинге. Начиная с заведомо анизотропных геологических условий, контролирующих распределение пара в искомой среде, заканчивая неравномерным “вытапливанием” и миграцией продукта добычи.

Для контроля за разработкой применяется комплекс геофизических методов, в который в основном входит сейсморазведка, гравиразведка и электроразведка. Каждый из проводимых методов имеет свои сложности, преимущества и недостатки. Одним из регулирующих недостатков является дороговизна работ, напрямую зависящая от: объёма работ, характера местности, срока выполнения задачи, детальности съёмки и количес-

тва людей, участвующих в этом. Задачей же рационального использования природных ресурсов и материальных благ при проведении прикладных геофизических исследований состоит в правильном подборе методов, заключающих в себе одновременное качество, простоту и результативность. Дальнейшее использование метода невозможно без его предварительной апробации.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы является исследование возможностей метода шумовой томографии для мониторинга добычи битумов с дальнейшей оценкой качества результатов съёмки. При достижении цели необходимо: 1) организовать сеть пассивных сейсмических наблюдений; 2) обработать полученные данные.

Объект исследования

Объектом исследования является толща осадочных горных пород, содержащих в приповерхностных частях скопления сверхвязкой нефти.

Методика и технология проведения работ

Перед проведением полевых исследований необходимо удостовериться в предварительном качестве записи

приборов, их работоспособности и идентичности. Для этого все 3 прибора были поставлены в одно место. В дальнейшем, на них одновременно была запущена запись сейсмоволнового поля. Запись производилась ночью для минимизации техногенных помех. По результатам проведения диагностики оборудования было выявлено, что записи трёх приборов попарно соотносятся друг с другом с коэффициентом корреляции приблизительно 0,9963. Такие значения коэффициента корреляции демонстрируют, что запись на всех трёх приборов однородна и достоверна, что удовлетворяет требованиям проводимой съёмки.

Полевые исследования проводились в сентябре-октябре 2024г во время ежесезонного мониторинга за разработкой месторождения. Для более качественного выходного сигнала было выбрано месторождение, на которое отводилось большее количество рабочих дней.

Для приёмников была выбрана фиксированная геометрия, выбор которой заключался в предварительном исследовании параметров исходного месторождения. Для исследования был выбран ствол одной из скважин, находящейся как можно дальше от возможных источников помех, и отвечающей за большие мощности продуктивного пласта. Такой скважиной оказалась крайняя скважина, находящаяся на востоке месторождения. Она одновременно легкодоступна, а также расположена вдали от полевых дорог и лесов. Всего на исследуемой площади было расставлено три приёмника: 1 (№ регистратора 41); 2 (№ регистратора 37); 3 (№ регистратора 42) (рис. 1). Первый приёмник был поставлен в конце горизонтального участка паронагнетательных скважин, второй приёмник был в начале этого участка. Расстояние между двумя первыми приёмниками

составляет 850 м. На продолжении прямой, соединяющих их, на расстоянии в 850 м от второго приёмника был поставлен третий. Третий приёмник в свою очередь находился вне исследуемой залежи, и представлял из себя сверочный элемент, отвечающий за область, свободную от проведения метода SAGD. Рекомендованное расстояние между приёмниками при проведении шумовой томографии должно быть минимум в 2,5 раза больше максимальной (или, в данном случае, целевой) длины волн Релея (Cheng et al., 2024). Однако, в настоящей работе соблюдение данного условия невозможно из-за относительно небольших линейных размеров залежи и маленького количества задействованных сейсмоприёмников, из-за чего дальнейшая обработка имеет ряд специфических черт, отличных от “обычного” варианта метода шумовой томографии.

Такое расположение даёт наиболее полную информацию о битумосодержащем пласте, а также даёт возможность сверить значения двух различных интервалов для оценки качества съёмки.

▼ Рис. 1. План-схема расстановки комплектов оборудования для пассивного сейсмического мониторинга.

- 1 – точка установки регистратора № 41;
2 – точка установки регистратора №37;
3 – точка установки регистратора № 42



Подготовка и обработка данных

Для качественной и количественной оценки полезного сигнала, приходящие на каждый из приёмников, необходимо должным образом обработать искомый сигнал, выделив из него полезную компоненту, и в дальнейшем правильно её интерпретировать.

Из-за специфики расстановки приборов, приёме сигнала и методики проведения, предложен следующий порядок обработки сигнала, основывающийся на графах обработки других исследователей (Беловежец и др., 2021):

1. Фильтрация ФНЧ;
2. Фильтрация по узкой полосе частот;
3. Одноритовая нормализация сигнала;
4. Кросс-корреляция между парами приёмников;
5. Усреднение результирующих значений кросс-корреляций;
6. Нахождение огибающей для графиков волновых цугов;
7. Определение времени прихода сигнала;
8. Подсчёт групповых скоростей для определённых частот поверхностных волн.

Разберём каждый из этапов предложенного алгоритма обработки данных шумовой томографии.

Фильтрация фильтром низких частот применяется для выделения полезного сигнала и устранения сигнала с паразитных частот. Этот этап позволяет устранить техногенные помехи и шумы, возникшие из-за генерации пара и его дальнейшего движения по паропроводам.

Фильтрация по узкой полосе частот выделяет сигнал поверхностной волны только для узкой определённой частоты, что в дальнейшем может продемонстрировать изменения скоростей прохожде-

ния волн в зависимости от их длин, а значит, и от глубины их проникновения.

Одноритовая нормализация сигнала позволяет обособиться от внезапно возникающих и узких помех-сигналов, ограничив сигнал значениями -1, 0, +1. Такой подход позволяет сохранить искомую частоту, при этом очистив сигнал от высокочастотной составляющей, прошедшей через фильтры, а также устранив непериодические помехи, связанные с движением транспорта или влиянием животных.

Кросс-корреляция между парами приёмников возвращает функцию “схожести” двух сигналов при их смещении относительно друг друга на условные единицы. Такое сравнение сохраняет частоты сигнала, но при этом даёт представление о времени прохода отдельных волновых цугов между двумя станциями.

Нахождение огибающей для графиков кросс-корреляции (волновых цугов) применяется для определения времени прохода сигнала, ведь искомое время отвечает абсциссе максимума огибающей (Левшин и др., 1987). Дальнейшее определение групповых скоростей проводится из тех соображений, что искомый волновой пакет проходит расстояние между двумя приёмниками за своё групповое время (Левшин и др., 1987; Беловежец и др., 2021).

Перейдём непосредственно к обработке. Перед определением границ ФНЧ была произведена спектральная оценка сигнала. Определено, что для всех трёх приёмников имеет место паразитная частота приблизительно в 7 Гц. Её амплитуда находится в прямой зависимости от расстояния до некой точки, находящейся между приёмниками 2 и 3. Предположительно, данный сигнал исходит от котельной, а сам сигнал отвечает генерации пара. На приёмнике 2 так же была опре-

делена паразитная частота приблизительно в 24 Гц, связанная, возможно, с закачкой пара в пласт.

ФНЧ фильтр имеет верхнюю границу в 10 Гц, однако пропускающий максимум начинался с 5 Гц, что позволило в большей степени избавиться от шумовой частоты в 7 Гц. В случае, если была бы выбрана более низкая верхняя граница, то результирующий сигнал не имел бы важных для определения частот. Для определения искоемых частот, которые будут применяться в обработке, предварительно был обработан сигнал на частоте 1 Гц для двух пар приёмников. В дальнейшем обработка так же будет происходить по двум парам: 1-2 и 2-3. По предварительной обработке были подсчитаны примерная групповая скорость и длина поверхностной волны, что позволило выделить 3 группы частот при условии, что исследуемый пласт находится на глубине в 100 м. Внутри этих групп выбраны наиболее показательные частоты, для дальнейшего выделения которых были заданы пропускающие фильтры.

Искомые группы частот оказались:

- 1) частота, относящейся к области над пластом (3,5 Гц);
- 2) частоты, относящиеся к пласту (1 – 2 Гц);
- 3) частоты, относящиеся к области под пластом (0,375 – 0,75 Гц).

Дальнейшая обработка сигнала производилась с использованием программного кода, написанного на языке программирования Python. В пределах этого кода была проведена однобитовая нормализация и кросс-корреляция пар приёмников.

На выходе из программы по обработке были получены таблицы значений функции кросс-корреляции для двух пар. Такие таблицы содержали значение

схожести сигналов при временных сдвигах от -13 до +13°С. Такой широкий диапазон был выбран из тех соображений, что более низкочастотные сигналы могут иметь более широкий волновой цуг, для определения максимума которого в любом случае было бы необходимо увеличивать ширину полученного диапазона значений функции кросс-корреляции.

Последующая обработка происходила в табличном процессоре Excel. В него были внесены полученные после программной обработки значения, представляющие из себя значение временной задержки (мс) и коэффициент корреляции. Однако ежедневный сигнал был подвержен влиянию ежедневных периодических помех, а также неконтролируемо приходящих землетрясений. Для уменьшения влияния таких факторов, происходило усреднение функций кросс-корреляций за весь период съёмки. В этом случае полностью исключались дни, в которые происходили мощные землетрясения, ведь на волновое поле в такие дни влияет не только само землетрясение, но и все его афтершоки. Для качественной оценки дневной сейсмичности у геофизической обсерватории Арти были запрошены ежедневные сейсмические записи, происходящие во всех трёх компонентах. Обработка таких записей была произведена лишь на качественном уровне – в предполагаемые дни высокой сейсмичности, с применением функционала программы Grapher производился полный просмотр записи с целью поиска моментов прихода землетрясений, а также общей качественной оценки амплитуд приходящего сейсмического сигнала с целью определения возмущённости сейсмического поля. Такая оценка позволила выявить, что в целом сейсмоволновое поле на весь

период исследований было невозможным, поэтому дальнейшая обработка сигнала происходила без исключения каких-либо дней.

По осреднённым значениям функции кросс-корреляции была построена диаграмма. На ось абсцисс отложены времена задержки, на ось ординат коэффициент корреляции. На этом этапе оставалась ручная обработка полученных диаграмм волновых цугов, которая заключалась в поиске огибающей для волнового пакета, поиска его максимума, и дальнейший пересчёт групповых скоростей. Из-за специфики выбора ФНЧ фильтра на ранних этапах и “нарушенной” геометрии измерительной сети, сигнал более высоких частот был незначительно, но “зашумлён” компонентой в 7 Гц. Общий вид волнового пакета из-за этого не искажался, однако поиск максимума и общего вида огибающей был затруднён. Для поиска максимума огибающей в этом случае был предложен следующий метод, заключающийся в поиске характерных симметричных

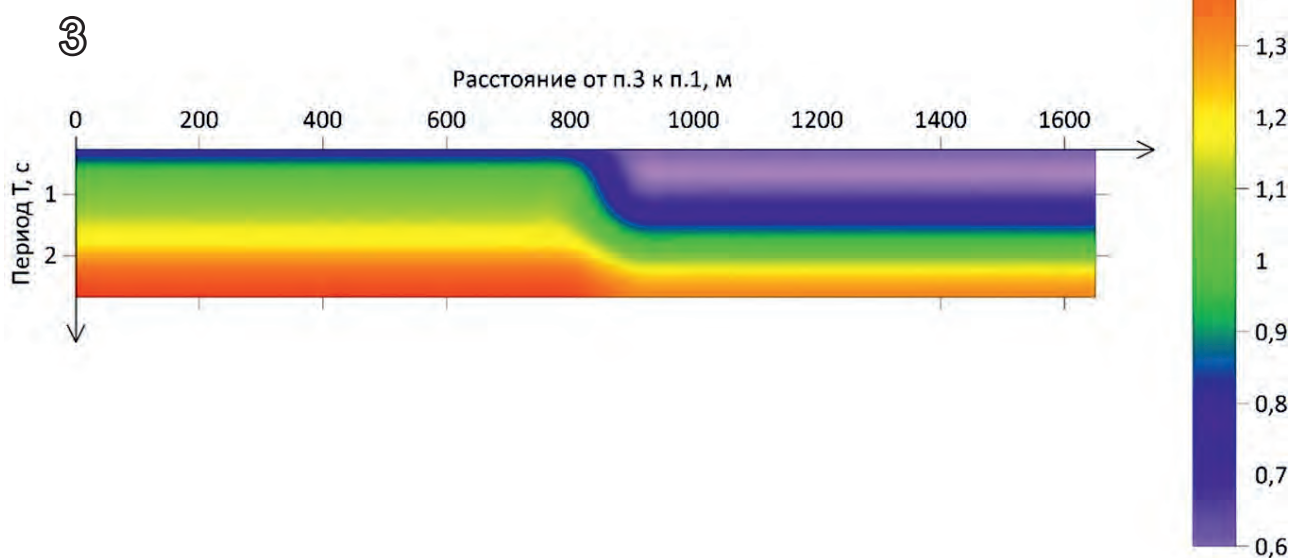
точек огибающей волнового цуга (например, точки, в которых огибающая имела значение в 0,05 условных единиц). Для таких точек можно было точно определить значение их абсцисс. Разность абсцисс этих точек демонстрировала ширину огибающей, заключённой между точками. Т.к. точки были симметричны, то центр этой ширины относился к центру самой огибающей, а значит, прибавив к абсциссе левой точке полуширину интервала огибающей, можно было получить абсциссу искомого максимума.

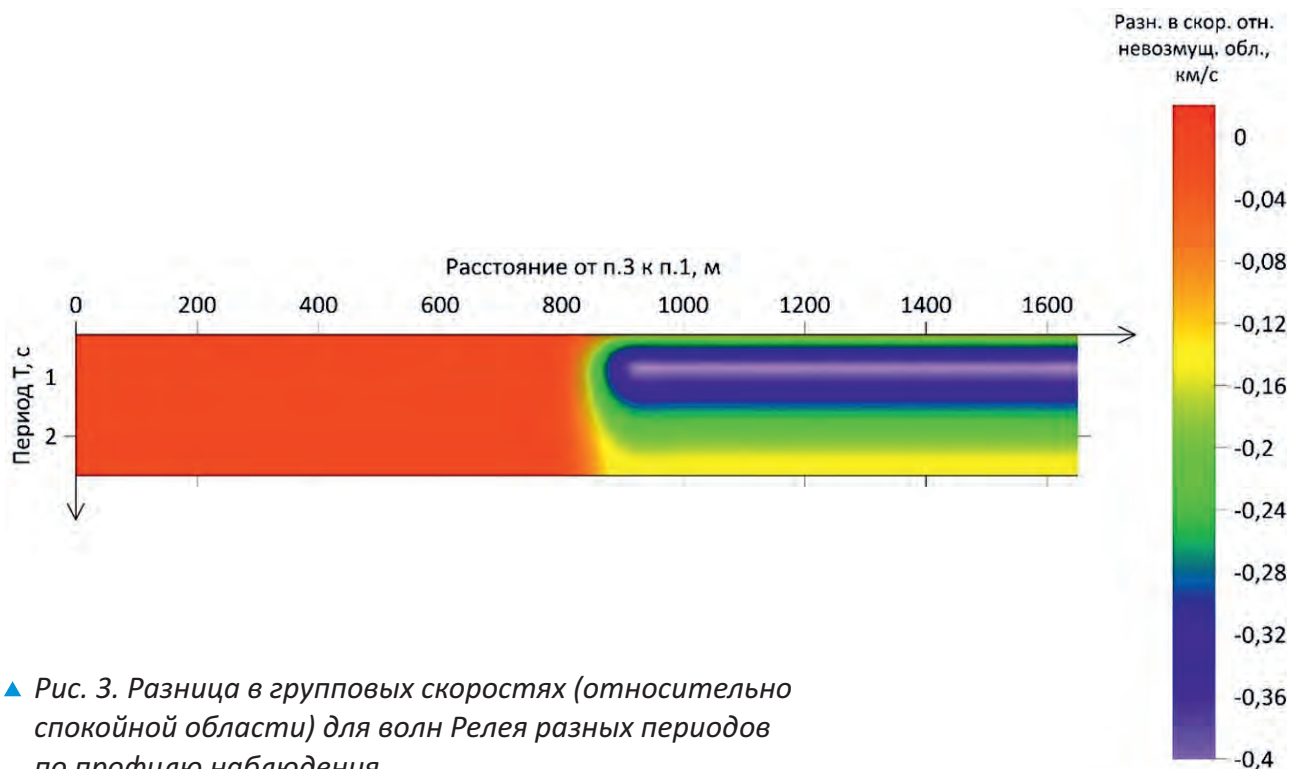
По предложенному способу были обработаны данные по всем исследуемым частотам. Нахождение групповой скорости сводилось к нахождению частного расстояния между двумя источниками и групповым временем (Левшин и др., 1987).

Результаты исследования

После проведения обработки данных, были получены групповые скорости различных частот поверхностных волн

▼ Рис. 2. Распределение групповых скоростей волн Релея разных периодов по профилю наблюдения.





▲ Рис. 3. Разница в групповых скоростях (относительно спокойной области) для волн Релея разных периодов по профилю наблюдения.

для двух различных сред – области с месторождением, и области без него. Из-за их взаимного расположения на одном профиле, наиболее наглядно они могут быть представлены в виде характерного плана-профиля, на оси абсцисс которого отложено расстояние по профилю, на оси ординат – период колебаний. Значение групповой скорости было бы представлено в виде цветовой заливки. Таким образом был получен профиль групповых скоростей (рис. 2). Приняв часть профиля вне залежи за “нормальное” поле, можно сравнить его значения со значением “аномального” поля, тем самым продемонстрировав скоростные аномалии, полученные для различных периодов (рис. 3).

На полученных иллюстрациях видна явная аномалия значений групповых скоростей для частот от 2,3 до 0,7 Гц. Наиболее интенсивное значение аномалия имеет при частоте в 1,25 Гц. При средней скорости поверхностных волн на этих частотах в 0,6 км/с (для исследуемой территории), длина волны составляет

~ 480 м., а значит, наибольшую чувствительность к изменению скорости данная поверхностная волна имеет на глубинах ~ 96 м (максимальная чувствительность к изменению скорости для волн Релея находится на глубине ок. 0,15-0,2 от длины волны (Боганик и Гурвич, 2006), что в целом отвечает глубине продуктивного интервала месторождения.

Выводы и рекомендации

Таким образом, опытно-методические работы показали, что метод шумовой томографии может применяться на месторождениях, разрабатываемых методом SAGD как для уточнения скоростных параметров, так и для мониторинга за разработкой. Для проведения исследований был разработан собственный граф обработки, основанный на графах прошлых исследований. Кроме этого, была апробирована методика расстановки сейсмических приёмников на месторождении сверхвязкой нефти.

Однако всякое исследование имеет свои достоинства и недостатки. В настоя-

щем исследовании была наглядно продемонстрирована неидеальность механизмов фильтрации и преобразования сигнала. Кроме этого, имеет место также неидеальная расстановка пассивных сейсмоприёмников.

Для более качественного и детального мониторинга необходимо не только увеличить количество приёмников, но и сгустить сетку их расстановки. Т.к. продуктивный пласт находится на сравнительно небольших глубинах (~100 м.), то имеет место уменьшение расстояния между приёмниками в ~ 2 раза, с сохранением при этом качества обработки для периодов, отвечающих залежи сверхвязкой нефти. Но при этом стоит учесть важное замечание – максимальная длина волны, “адекватно” фиксируемая при этом, равна расстоянию между приёмниками (Cheng et al., 2024). А значит, максимально значимая глубина, на которую можно “заглянуть” в геологическую среду, равна приблизительно 1/5 от расстояния между приёмниками.

При проведении обработки была выявлена необходимость планировании фильтров, обладающих более выраженными спектральными характеристиками. Однако, такое возможно лишь при одновременном продлении периода наблюдения.

Несмотря на недостатки, данный метод показал свою состоятельность для мониторинга за разработкой месторождений битумов. Дальнейшие опытно-методические работы с учётом всех рекомендаций позволят доработать как методику расстановки приёмников, так и методику дальнейшей обработки полученного сигнала. Интерпретация полученных данных позволит дополнить и одновременно уточнить данные одновременно проводимой сейсморазведки. В случае самостоятельного использова-

ния, данный метод позволит производить ежемесячный мониторинг за состоянием месторождения с минимальным привлечением ресурсов.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Литература:

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 2006, 744 с.
2. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле / А.Л. Левшин, Т.Б. Яновская, А.В. Ландер и др. М.: Наука, 1987, 277 с.
3. Строение верхней коры вулкана Камбальный (Южная Камчатка) по результатам шумовой сейсмической томографии / Н. Н. Беловежец, [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 11-2021. – Т. 501, № 1. – С. 43-48.
4. Ching-Yu Cheng, Hao Kuo-Chen, Dennis Brown, Huajian Yao, Kai-Xun Chen, Kuo-Fong Ma, High-resolution 3D ambient noise tomography around the Meishan-Chiayi active fault system of western Taiwan, Journal of Asian Earth Sciences: X, Volume 12, 2024, Pages 100182, ISSN 2590-0560, <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2024.100182>.