

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата технических наук Егорова Антона Алексеевича
на тему: «Полноволновая инверсия данных вертикального сейсмического
профилирования для решения задач сейсмического мониторинга» по
специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых»

Актуальность исследования, представленного в диссертации, определяется тем, что закачка диоксида углерода в массив породы требует не только качественной оценки изменений свойств среды, в которую происходит закачка, но также и количественной оценки этих свойств. Обычной практикой для решения подобной задачи до недавнего времени являлось использование данных наземной/морской сейсморазведки. Метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП) используется при этом, как вспомогательный, и лишь для качественной интерпретации изменений свойств среды. Однако этот метод имеет ряд преимуществ перед сейсмическими методами. Прежде всего это то, что приемники находятся в скважине; имеется возможность использования не только отраженных, но и проходящих волн; расширен частотный диапазон исследований. В диссертационной работе предложен способ количественной оценки изменений свойств среды по данным ВСП с использованием метода полноволновой инверсии.

Цель диссертационной работы состояла в разработке подхода к количественной оценке изменений упругих свойств горных пород, связанных с закачкой CO₂ (или добычей углеводородов), по данным метода ВСП, полученным с помощью геофонов или распределённых акустических систем. Для достижения поставленной цели в работе *решен ряд задач*: а) проанализированы существующие подходы к полноволновой инверсии данных ВСП с целью мониторинга закачки CO₂; б) предложен алгоритм

предварительной обработки данных ВСП и полноволновой инверсии, позволяющий количественно оценить изменения упругих свойств по данным ВСП; в) разработанный алгоритм протестирован на модельных и полевых данных; г) алгоритм количественной инверсии данных ВСП адаптирован для данных, полученных с помощью распределённых акустических систем.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Защищаемые положения, выводы и рекомендации обоснованы путем выполнения очень тщательного анализа существующих работ, относящихся к рассматриваемой проблеме. Помимо этого, диссертант провел самостоятельные исследования работоспособности предложенных им методик оценки изменений упругих свойств среды по данным ВСП с использованием полноволновой инверсии как на модельных примерах, так и реальных данных (объект Otway, Австралия). Результаты применения полноволновой инверсии данных ВСП к оценке скоростей упругих волн и плотности пород, в которые закачивается CO_2 , демонстрируют работоспособность предложенных методик как в случае использования геофонов, так и распределённых акустических систем при проведении ВСП.

Достоверность результатов обосновывается успешным применением разработанных методик на синтетических данных, в том числе, и зашумленных, а также – хорошим согласием полученных результатов по оценке изменений упругих свойств среды с результатами, полученными при применении других методик.

Новизна представленной к защите работы заключается в следующем.

Упругая полноволновая инверсия *применяется впервые* к данным неперодольного ВСП (НВСП) с целью мониторинга изменения скоростей

объемных упругих волн (продольных и поперечных) и плотности породы, вызванных закачкой диоксида углерода.

Впервые предложено применение условной оптимизации для проведения полноволновой инверсии данных НВСП при мониторинге изменения упругих свойств и плотности породы при закачке в нее CO_2 (или разработки месторождений нефти и газа).

Разработан новый алгоритм предварительной обработки данных, полученных с помощью распределенных акустических систем, позволяющий проводить их полноволновую инверсию.

Впервые технология полноволновой инверсии данных НВСП применена к полевым данным, полученным с помощью распределённой акустической системы.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации 113 страниц, включая 56 рисунков и таблицу со списком сокращений. Список цитируемых научных публикаций содержит 127 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы, решаемые задачи, защищаемые положения; обосновывается новизна и практическая значимость работы; дается краткое описание методов исследования; описан личный вклад автора в исследования, приводится информация об апробации работы.

В **первой главе** проведен обзор существующих работ по теме диссертации. Анализируется современное состояние ВСП как метода сейсморазведки, а также - использование данных ВСП для построения изображений среды и оценки ее свойств. Анализируется теоретические основы полноволновой инверсии, включая методы решения прямых задач и методы оптимизации, применяемые для решения обратных задач. Приводятся примеры инверсии полного волнового поля данных ВСП, а также использования этого метода в качестве метода сейсмического мониторинга.

Во второй главе анализируются особенности применения полноволновой инверсии к данным ВСП с целью мониторинга. Уделяется внимание вопросу построения достоверной начальной макромоделей, параметризации модели в случае различной геометрии съемки. Обсуждается выбор функционала, используемого для минимизации при решении обратной задачи полноволновой инверсии. Особое внимание уделено функционалу двойной разности, в котором участвует опорная модель (модель среды до закачки двуокиси углерода). На модельном примере сравниваются результаты инверсии с помощью стандартного функционала, с использованием функционала двойной разности без наложения ограничений на искомые параметры и с наложением ограничений. Демонстрируется возможность улучшения качества инверсии при оптимизации с использованием функционала двойной разности с ограничениями на искомые параметры модели. В этой же главе предложен граф предобработки полевых данных и подробно рассмотрены все этапы предобработки.

Третья глава посвящена инверсии полного волнового поля данных, полученных с помощью геофонов. Описан граф инверсии данных НВСП. Продемонстрирована успешная работа алгоритма как на модельных, так и полевых данных (объект Otway, Австралия). Результат инверсии скоростей сравнивается с результатом апскейлинга данных ГИС по методу Бейкуса (ремасштабирования на низкие частоты). В целом, демонстрируется удовлетворительное соответствие этих данных. Проанализированы причины расхождения. В этой же главе предложен граф инверсии данных НВСП со множеством удалений. Продемонстрировано успешное применение инверсии для этого типа данных, полученных для модельной среды.

Четвертая глава посвящена инверсии полного волнового поля данных ВСП, полученных с помощью распределенных акустических систем. Описано преобразование данных к вертикальной компоненте скорости смещения, что дало возможность после такого преобразования применять любой существующий алгоритм полноволновой инверсии. Описан граф инверсии.

Продemonстрировано успешное тестирование подхода на модельных и полевых данных. Как и для случая использования геофонов, проведено сравнение с ремасштабированными скоростями, полученными по данным ГИС, с которыми, в целом, получено удовлетворительное согласие и проанализированы причины расхождения в некоторых интервалах глубин.

Результаты, представленные в главах 1 – 3, обосновывают **первое и второе защищаемые положения** данной диссертационной работы, которые состоят в следующем.

Полноволновая инверсия данных метода ВСП позволяет производить оценку изменений в среде, связанных с закачкой углекислого газа в пласт.

Применение специализированных методик инверсии – функционала двойной разности и условной оптимизации – позволяет получить более достоверные результаты оценки изменений в среде.

В пятой главе описаны перспективы постоянного мониторинга с помощью инверсии полного волнового поля данных ВСП. Обсуждается соответствующее оборудование для этой модификации (источники и приемники упругих колебаний). На модельных данных успешно продемонстрирована инверсия скоростей и упругого импеданса с использованием постоянного источника и оптоволоконного кабеля в качестве приемника.

Результаты, представленные в главах 4 и 5, обосновывают **третье защищаемое положение** данной диссертационной работы:

Данные ВСП, полученные с помощью распределённой акустической системы, могут быть преобразованы в записи скорости смещения, за исключением волн, которые имеют малые значения волнового числа по направлению оптоволоконного кабеля. Данные, преобразованные подобным образом, могут применяться для полноволновой инверсии.

Замечания

Желательно было бы обозначить область применимости разработанного подхода количественной оценки изменений свойств среды по данным ВСП с использованием метода полноволновой инверсии. В частности, возникает вопрос о его применимости в случае наклонных границ.

Остальные замечания носят, в основном, технический характер и состоят в следующем.

- а) На рисунке 1.4 следовало бы указать, что минимум функции Розенброка находится в точке (1,1).
- б) Не ясно, изменение какого параметра отражено на рисунке 1.6.
- в) Рисунок 2.4 не понятен. Следовало бы дать более подробное пояснение к этому рисунку.
- г) Неудачно выбраны цвета на рисунке 4.1 – «фиолетовый» и красный цвета мало различаются.
- д) Автором неправомерно и многократно использован глагол «производить» вместо «проводить».

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертация Егорова Антона Алексеевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена задача применения полноволновой инверсии данных вертикального сейсмического профилирования для решения задач сейсмического мониторинга.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» (по техническим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также

оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Егоров Антон Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

БАЮК Ирина Олеговна



29.04.2019

Контактные данные:



Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

