

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

**на диссертационную работу Королёва Дмитрия Александровича «Параметрические методы определения и компенсации искажений сейсмических данных» на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности**

### **1.6.9. Геофизика (технические науки).**

Сейсморазведка является основным источником информации при изучении недр, поиске и разведке месторождений полезных ископаемых. Современная ситуация характеризуется, во-первых, тем, что изучаемые объекты (в частности – месторождения углеводородов) связаны с весьма сложным строением геологической среды, а во-вторых – с необходимостью проводить количественную интерпретацию данных для определения фильтрационно-емкостных и иных свойств среды. Это, в частности, предполагает проведение обработки с сохранением амплитуд и сейсмической инверсии. Вместе с тем, сейсмические сигналы в процессе излучения (генерации) и распространения в среде (в том числе – в пределах неоднородной верхней части разреза) претерпевают различного рода искажения, которые не описываются базовыми моделями, используемыми в ходе обработки и интерпретации. Поэтому возникает необходимость разработки методов и алгоритмов компенсации таких искажений, что определяет несомненную актуальность диссертационного исследования.

Говоря об обработке сигналов, автор честно признает, что «Степень разработанности темы можно охарактеризовать как максимальную по сравнению с другими научными направлениями в обработке данных сейсморазведки. Классическими работами заложены основы теории, опубликованы практически все возможные математические методы обработки сигналов и сейсмических волновых полей, предложены многочисленные практические решения задачи деконволюции сигналов». Возможность обеспечения необходимого уровня научной новизны исследования в этих условиях зависит от выбранной частной задачи и совокупности методов, используемых для её решения. В качестве задачи ставится «разработка методов параметрического способа сравнения и коррекции искажений сейсмических сигналов, обусловленных различными или неидеальными условиями возбуждения и регистрации волновых полей». В качестве методов использовано построение фильтров специального вида в спектральной области. В результате автору удалось получить совокупность оригинальных технических результатов, достаточных для обеспечения научной новизны в диссертации по техническим наукам.

Во введении к диссертации описаны постановка задач, современное состояние исследований, цели и задачи работы, степень научной новизны, личный вклад автора. Дан краткий обзор литературы по теме работы. Формулируются защищаемые положения.

В первой главе формулируются методологические основы использованного в работе подхода. Он опирается на интерференционное представление сейсмической трассы, что, применительно к полю отражённых волн, практически означает, что каждая точка на трассе отвечает вступлению волны с какой-либо амплитудой. Это представление лежит в основе подавляющего большинства методов обработки: от ввода кинематических поправок и деконволюции до сейсмической инверсии. Изложены классические и современные результаты в данной области. Рассмотрены способы описания поглощения упругих волн в спектральной области через параметр добротности, а также – приёмы расширения спектра. В завершающих разделах Главы 1 более подробно рассмотрены цели и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены разработанные автором подходы к построению компенсирующих фильтров, включая компенсацию эффектов частотно-зависимого поглощения и фазовую компенсацию. В частности, затронута проблема нахождения оптимальных параметров компенсирующих фильтров и неоднозначность решения соответствующей задачи в случае многих параметров.

В третьей главе рассмотрены методические приёмы построения компенсирующих фильтров и определения их параметров. Справедливое внимание уделено вопросу построения меры сходства двух сейсмических трасс. К использованному автором эмпирическому подходу имеются замечания, которые подробно рассмотрены ниже. Методологический подход автора в данной Главе, как и во всей работе, состоит в изучении синтетических (имитационных) примеров и обобщению полученного опыта. В результате в завершающем разделе Главы 3 сформулированы методические рекомендации по применению разработанных автором подходов.

Четвёртая глава работы посвящена использованию разработанных подходов к практическим задачам, включая определение поглощения по данным ВСП и компенсацию искажений СВИП-сигналов.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой логически связанное исследование, в котором последовательно излагаются методологические предпосылки, созданные на их основе подходы и алгоритмы, методика их применения и примеры практического использования. Подобный подход отвечает хорошему стандарту для диссертаций на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Следует особо отметить очевидную вовлечённость автора во все аспекты и детали процедур обработки сейсмических данных, что однозначно свидетельствует об определяющем личном вкладе в выполнение диссертационного исследования.

Вместе с тем, к работе имеется ряд замечаний, как редакционного, так и методологического характера. К замечаниям редакционного характера (исключая опечатки

и пр., которые в работе присутствуют в незначительном количестве), следует отнести замечания к формулировке защищаемых положений:

Защищаемое положение 1: «Метод сравнения сейсмических сигналов, основанный на построении полосового фильтра, задаваемого наклоном логарифмического спектра, позволяет определять искажения одного сигнала относительно другого». Очевидно, что такой фильтр позволяет компенсировать (именно компенсация, а не определение искажений – задача фильтра) лишь искажения спектров экспоненциального характера, в частности – связанные с поглощением. Приведённая формулировка данного положения является излишне общей.

Защищаемое положение 2: «Метод расчета трехпараметрического полосового фильтра позволяет определять искажения фазового спектра зарегистрированного сигнала относительно сигнала источника». Опять-таки, не произвольные искажения, а те, которые могут быть описаны параболической зависимостью в частотной области. Что описывает, впрочем, весьма широкий класс реальных ситуаций.

Также к редакционным замечаниям следует отнести утверждение, что «невозможно применить современные алгоритмы, если о модели среды нет информации, если не построены скоростные модели и нет информации о структуре полезного сейсмического сигнала и помехах». Иными словами, если мы ничего не знаем ни о среде, ни о волновом поле, то и обработать данные не получится. Это представляется очевидным.

Сюда же относится и само использование терминов «параметрические методы», «параметрические фильтры» и пр. Собственно, конечномерная параметризация всего: от моделей сред и измеряемых величин до процедур обработки является базой всей современной геофизики и обусловлена цифровой эпохой обработки. Более правильно было бы называть используемый и разрабатываемый в диссертационной работе подход модельным, поскольку в его основе лежат определённые модели сигнала и его искажений, возникающих в процессе излучения и взаимодействия со средой.

Неудачным следует считать использование термина «полосовой сейсмический сигнал». Очевидно, имеется в виду сигнал с ограниченной полосой частот. Термин «полосовой сигнал» традиционно используется в теории радиосвязи применительно к сигналам, возникающим в результате модуляции несущей частоты низкочастотным информационным сигналом.

Методологические замечания носят более существенный характер и затрагивают основы работы. Утверждается, со ссылкой на ряд работ отечественных и зарубежных авторов, что представление о том, что «последовательность коэффициентов отражения можно считать случайной статистической последовательностью» является ограничивающим, поскольку «на практике распространение волн происходит в конкретной слоистой геологической среде, и с этой точки зрения процесс имеет детерминированную

природу». Данное утверждение иллюстрирует действительно распространённое непонимание природы случайности в геофизических задачах. Случайными называют такие процессы, для которых точное предсказание их величин (результатов наблюдений), например – на основе ранее измеренных значений, принципиально невозможно. И в этом смысле последовательность коэффициентов отражения, равно как и другие параметры геологической среды, как и сами значения компонентов волновых полей – являются случайными в полном смысле слова, поскольку их непосредственное измерение невозможно (среда скрыта от нас). Более того, даже если бы мы имели точную модель свойств среды в рамках, например, горизонтально-слоистой модели, значения коэффициентов отражения по-прежнему оставались бы случайными, поскольку на них оказывают влияние множество принципиально неконтролируемых (т.е., случайных) факторов – шероховатость и локальные наклоны границ, не описываемые моделью вариации свойств и пр.

Игнорирование случайного характера всех наблюдаемых в сейсморазведке полей и самих свойств среды является одной из коренных причин множества неудач при создании и практическом применении алгоритмов обработки и интерпретации. Формулы (в частности – для фильтров) в спектральной области элегантно выглядят до тех пор, пока мы считаем что сигналы – суть детерминированные функции, заданные на всей числовой прямой. Однако для спектров случайных процессов всё сложнее, поскольку сами спектральные мощности принципиально не вычислимы по единичным реализациям (сейсмическим трассам), а их оценки, получаемые при помощи БПФ – мало того, что не являются состоятельными (имеют конечную дисперсию), но ещё и смещены. Диссертационная работа много выиграла бы от рассмотрения всех этих моментов. Впрочем, следует констатировать, что используемый в работе «детерминистский» подход к спектральному анализу является (к сожалению) широко распространённым в сейсморазведке. На этом языке написаны многие учебники, хотя, несомненно, существуют и работы, в которых используется корректный вероятностный подход (без них была бы невозможна успешно применяемая т.н. «предсказывающая» деконволюция, основанная на модели стационарного случайного процесса), но они мало популярны из-за сравнительной сложности.

Следствием избранного детерминистского подхода к сейсмическому сигналу и, соответственно – спектральному анализу является путаница в понятиях. В частности, говорится о методах «определения фазового спектра сейсмического сигнала», основанных на «параметризации фазового спектра и подборе параметров с применением оптимизации». Строго говоря, определение спектра сводится к расчёту преобразования Фурье и дальнейшему анализу результатов этого расчёта. На самом деле мы имеем дело со случайными сигналами, поэтому в результате расчёта БПФ сейсмотрассы получаем

периодограмму, которая не является состоятельной оценкой спектральной мощности и потому требуется её дальнейшая обработка с целью получения оценки спектра, обладающей более-менее приемлемыми свойствами в статистическом смысле. То же относится и к оценке фазового спектра. Одним из способов такой оценки может являться аппроксимация периодограммы неким модельным спектром. Но называть такую аппроксимацию «определением» спектра некорректно. Свойства соответствующей оценки неразрывно связаны как с алгоритмом расчёта самой периодограммы (который остался вообще вне поля внимания), так и с адекватностью используемой модели.

Игнорирование случайного характера сейсмического сигнала приводит, в частности, к тому, что выбор наилучшей нормы для оценки степени соответствия двух (например – экспериментального и модельного) сигналов осуществляется методом «ползучего эмпиризма». В Главе 3 констатируется, что «Выбор меры сходства не является простым и однозначным; вероятно, сделать выбор в пользу одного из подходов, на основе модельных данных затруднительно, так как все зависит от особенностей конкретного полевого материала». В действительности, если принять во внимание статические свойства спектральных оценок, можно (и нужно) ставить задачу выбора нормы, отвечающей максимально правдоподобной оценке, основываясь как на модельных предположениях, так и на экспериментальном анализе статистических свойств конкретного полевого материала.

В разделе 1.4 сравниваются различные нормы соответствия, применяемые с целью выделения последовательности коэффициентов отражения. Надо заметить, что норма, описываемая формулой (9), строго говоря, не является нормой  $L_0$ , как её предлагается называть в диссертации. Норма  $L_0$  – это количество ненулевых элементов вектора (например – временного ряда или коэффициентов его Фурье-разложения). Она весьма эффективна при нахождении максимально разреженного представления информации, в частности – для выделения коэффициентов отражения, однако её практическое применение вычислительно неэффективно, поэтому используются различные приближения, одним из которых является формула (9). Эффективность её применения, в частности, зависит от выбора параметра  $\beta$ . Надо также отметить, что в разделе 1.4 смешаны понятия вэйвлет-анализа и спектрально-временного анализа (СВАН). Это идеологически близкие, но существенно различающиеся по возможностям и алгоритмам подходы. Такая путаница не позволяет адекватно оценить приведённые в разделе результаты.

Однако, все сделанные замечания не снижают общей ценности работы, которая посвящена актуальным задачам и вносит вклад в развитие методов обработки данных сейсморазведки. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.9. Геофизика по техническим наукам, а также критериям, определённым п. 2.1-2.5 Положения о

присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, Королёв Дмитрий Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. Геофизика (технические науки).

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

**ТИХОЦКИЙ Сергей Андреевич**

04.04.2025 г.

Контактные данные:

Тел. +7(499)766-26-56

Электронная почта: [sat@ifz.ru](mailto:sat@ifz.ru)

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

Адрес места работы: 123242, г. Москва, ул. Б.Грузинская, д. 10.

Тел. +7(499)766-26-56

Электронная почта: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru)

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук Тихоцкого С.А.  
удостоверяю