

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Яблокова Александра Викторовича

«Алгоритмы определения скоростного строения верхней части геологического разреза на основе помехоустойчивого спектрального анализа многоканальных данных поверхностных волн и обращения дисперсионных кривых фазовых скоростей с применением искусственной нейронной сети»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 Геофизика

Диссертационная работа Яблокова А.В. посвящена развитию программно-алгоритмического обеспечения метода многоканального анализа сейсмических поверхностных волн для определения скоростного строения верхней части геологического разреза. В работе решаются две **научные задачи** по разработке и программной реализации следующих алгоритмов: помехоустойчивого алгоритма построения дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн по многоканальным данным с использованием преобразования Стоквелла и фильтрации сейсмических данных, а также алгоритма определения скоростной модели поперечной волны (значений скорости поперечной волны и мощности слоёв) обращением дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн с ограничением пространства возможных значений параметров скоростной модели и использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

**Актуальность темы исследования** определяется несколькими факторами. Во-первых, двумерные распределения амплитуды сейсмических данных в пространстве частоты и волнового числа (или частоты и фазовой скорости), полученные с помощью известных и широко используемых алгоритмов, часто не обладают достаточным качеством для однозначного пикирования дисперсионных кривых поверхностных волн в широком диапазоне частот. Наличие ложных спектральных максимумов, присутствие эффекта спектрального размывания приводят к сильному усложнению и неточности процесса пикировки, который приходится производить фактически вручную. Это ограничивает возможности метода многоканального анализа поверхностных волн при обработке большого объёма данных, а также приводит к ошибкам при решении обратной задачи на основе полученных дисперсионных кривых. Поэтому разработка помехоустойчивого алгоритма, позволяющего получать дисперсионные кривые с большей точностью, является несомненно актуальной задачей. Во-вторых, алгоритмы обращения дисперсионных

кривых, основанные как на методах локальной оптимизации, так и методах глобального поиска имеют ряд определённых ограничений и недостатков. Например, методы локальной оптимизации для устойчивого нахождения глобального минимума функционала невязки требуют задание достаточно близкой начальной гладкой модели, что не всегда возможно даже при наличии априорной информации. Методы глобальной оптимизации позволяют более надёжно определять глобальный минимум функционала невязки в выбранном пространстве параметров скоростной модели, однако выбор этого пространства также основывается на имеющейся априорной информации и является субъективным. Кроме того, использование методов глобальной оптимизации требует больших вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение при работе с большими объёмами данных. В настоящее время для решения многих задач используются методы, основанные на применении ИНС, обладающие высокой скоростью и точностью расчётов, устойчивостью получаемых результатов. Таким образом, разработка алгоритма, позволяющего проводить выбор пространства значений параметров скоростной модели без привязки к априорным данным и затем решать обратную задачу обращения дисперсионных кривых с помощью ИНС, является актуальной задачей.

**Структура диссертационной работы** следующая: титульный лист, оглавление, введение, основная часть, состоящая из четырёх глав, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 116 наименований, список иллюстративного материала. Диссертационная работа представлена на 145 страницах печатного текста.

Во введении автор определяет объект исследования, описывает актуальность выбранной темы, определяет цель исследования, ставит научные задачи, описывает этапы исследования, его методологию, утверждает защищаемые научные результаты, описывает научную новизну, теоретическую и практическую значимость, свой личный вклад, объявляет благодарности коллегам. Также представлена апробация работы в виде ряда публикаций, из которых особенно стоит отметить четыре публикации в научных рецензируемых журналах, входящих в базы данных WoS, Scopus, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и несколько тезисов ведущих международных конференций.

В первой главе представлен подробный обзор метода многоканального анализа поверхностных волн на основе данных литературных источников, приводятся достоинства и недостатки различных алгоритмов, используемых для построения дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн и последующего решения обратной задачи.

Во второй главе решается первая из поставленных научных задач: разработка алгоритма построения дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн на

основе помехоустойчивого спектрального анализа. Подробно представлено описание методологии, предпосылок разработки нового алгоритма, структуры нового алгоритма с ссылками на авторские публикации. Верификация алгоритма проводится на синтетических данных, в том числе с случайными и регулярными помехами, а также на реальных данных, полученных в ходе полевых экспериментов. Показано преимущество разработанного алгоритма по сравнению с  $f$ - $k$  преобразованием: новый алгоритм позволяет отфильтровывать волны-помехи, получать более чёткие спектральные изображения и с высокой точностью проводить автоматическое определение дисперсионных кривых фазовой скорости поверхностной волны в более протяжённом диапазоне частот. Результат остаётся стабильным при наличии шума и регулярных помех, а также при уменьшении длины приёмной линии, приводящей к размыванию спектров. В конце главы автор отмечает полученные результаты.

В третьей главе решается вторая из поставленных научных задач: разработка алгоритма определения скоростной модели поперечной волны обращением дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн с ограничением пространства возможных значений параметров скоростной модели и использованием ИНС. Как и во второй главе, представлено подробное описание методологии, предпосылок разработки, структуры нового алгоритма с ссылками на авторские публикации. Описано построение референтной дисперсионной кривой по имеющимся данным для последующего определения диапазонов возможных значений параметров скоростной модели. Производится построение тренировочного набора данных для последующего подбора весов ИНС, подбирается архитектура ИНС, обосновывается выбор функционала невязки, алгоритма оптимизации и функции активации. Верификация алгоритма проводится на наборе синтетических данных, сравниваются полученные результаты применения разработанного алгоритма с результатами применения известных методов глобальной оптимизации: метода Монте-Карло и GWO. Оказывается, что применение разработанного алгоритма позволяет получать более точное решение, которое также устойчиво и к наличию шума в исходных данных. Разработанный алгоритм позволяет проводить обращение дисперсионных кривых фазовых скоростей с близкими значениями (с отличием до 50%) одновременно обученной ИНС. Время работы разработанного алгоритма практически не зависит от объёмов данных, в отличие от методов глобальной оптимизации, поэтому применение разработанного алгоритма намного эффективнее в вычислительном плане при обработке большого количества данных (в 2.4 раза при 50000 обрабатываемых дисперсионных кривых и в 28.4 раза при обращении 1000000 дисперсионных кривых). В конце главы автор отмечает полученные результаты.

Отдельно стоит отметить, что разработанные алгоритмы реализованы в виде научно-исследовательского программного обеспечения на языке программирования Python и затем объединены в программный комплекс «nSeisLab», на который получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Это имеет несомненную **практическую значимость** в области сейсморазведки малых глубин. Разработанный программный комплекс позволяет значительно улучшить качество результатов при использовании многоканального анализа поверхностных волн и, значит, улучшить качество оценки строения верхней части сейсмического разреза при проведении различных работ. Кроме того, разработанный программный комплекс позволяет быстро обрабатывать большие объёмы данных, что может быть использовано для мониторинга среды фактически в режиме реального времени. Я считаю, что разработанные алгоритмы и разработанный программный комплекс имеют **значение для развития отрасли сейсморазведки и существенное значение для развития страны.**

В четвёртой главе представлена апробация разработанных программно-алгоритмических средств на синтетических и реальных данных для верификации, определения ограничений применимости и решения прикладных задач. В конце главы автор отмечает полученные результаты. Особенно стоит отметить следующие достижения. Во-первых, выбор синтетических моделей упругой среды (см. параграфы 4.2 и 4.3) и набора исследований (вариация длины базы наблюдений, положения пункта возбуждения, шага между пунктами возбуждения) чрезвычайно удачен; наглядно показаны не только возможности и ограничения разработанных алгоритмов, но и многоканального анализа поверхностных волн в целом. Во-вторых, скоростная модель среды, определённая с помощью разработанных алгоритмов по реальным данным (профиль в районе д. Бурмистрово), выделяет две отражающие границы, одна из которых согласуется с границей, определяемой также методом  $t^*_0$ , а вторая с границей, определяемой методом ВЭЗ. Модель, полученная методом многоканального анализа поверхностных волн с применением разработанных алгоритмов, наиболее точно отображает строение среды.

В заключении приводятся результаты работы, рекомендации по применению разработанных алгоритмов, обозначены приоритетные направления дальнейших исследований.

В результате прочтения диссертационной работы А.В. Яблокова я в полной мере могу утверждать, что работа представляет собой **завершённое исследование**, выполненное на очень высоком научном уровне. Текст работы написан в едином стиле, **качественно оформлен**, отмечу и высокое качество иллюстраций. Приведённые в работе научные положения, результаты и рекомендации **научно обоснованы, являются достоверными и**

обладают научной новизной; они представлены также в ряде подтверждённых публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и WoS. Содержание автореферата полностью соответствует основным идеям и выводам диссертационной работы. Сама диссертационная работа полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней (пп. 9-14), а также необходимым требованиям по оформлению текста из Положения о совете по защите диссертаций.

В то же время, необходимо заметить, что диссертация не лишена и недостатков, которые в основном имеют технический характер (ряд опечаток, в том числе, в формулах, ошибки вёрстки, пунктуационные ошибки, некоторые неточности). Возник и ряд вопросов:

1. Из текста работы не совсем понятно, зачем нужна функция активации (с.75, параграф 3.4), и в чём различие той или иной функции активации;

2. В тексте говорится, что 2D скоростные модели получаются интерполяцией, но непонятно, какой именно интерполяцией (см. рис.60, например);

3. На с.56 указано, что задача решается в приближении плоского рельефа, а учёт неплоского рельефа производится введением статистических поправок в полученные значения глубин границ. Но в конкретных примерах не указано, как это было сделано. Считаю, что стоило бы подробнее про это написать. Также было бы интересно рассмотреть, насколько учёт рельефа влияет на качество получаемых данных, ведь из литературы известно, что при разнице высот на профиле исследования  $L$  больше  $0.1L$  возможны существенные искажения в регистрируемых данных;

4. Утверждается, что алгоритм построения дисперсионных кривых фазовых скоростей работает в автоматическом режиме, что исключает субъективизм ручной или полу-ручной пикировки, но необходимо всё-таки заметить, что диапазон частот задаётся вручную на основе качества получаемых спектров.

Данные недостатки и замечания ни в коей мере не умаляют достоинств представленной работы, её научной ценности и значимости.

Отдельно хочу отметить прекрасную эрудированность автора в областях геофизики, обработки данных поверхностных волн, программировании, методах машинного обучения (работа с ИНС). Автор продемонстрировал работу с различным программным обеспечением и алгоритмами, такими как расчёт дисперсионных кривых методом матричных пропагаторов, распараллеливание вычислений, адаптивное программное пакетное SOFI 2D с использованием библиотек языка программирования Python, применение различных спектральных преобразований, решение обратной задачи с помощью методов

Монте-Карло, GWO, настройка архитектуры и подбор весов ИНС в рамках библиотек языка Python и многими другими.

Считаю, что диссертационная работа Яблокова Александра Викторовича «Алгоритмы определения скоростного строения верхней части геологического разреза на основе помехоустойчивого спектрального анализа многоканальных данных поверхностных волн и обращения дисперсионных кривых фазовых скоростей с применением искусственной нейронной сети» полностью удовлетворяет требованиям Высшей Аттестационной Комиссии, предъявляемой к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Официальный оппонент:

Пономаренко Андрей Валерьевич,  
старший научный сотрудник кафедры физики Земли  
Санкт-Петербургского государственного университета,  
кандидат физико-математических наук.

Телефон:

Адрес: Россия, 198504, г. Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 1

E-mail: andrew\_spb2003@mail.ru

15 03 2022 г.