

УТВЕРЖДАЮ  
И.о. директора ИВМиМГ СОРАН  
\_\_\_\_\_ д.т.н. Ковалевский В.В.

22 марта 2022 г

### Отзыв

ведущей организации на диссертацию  
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»  
по специальности 1.6.9-Геофизика  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Объект исследования** – метод многоканального анализа сейсмических поверхностных волн (MASW) на предмет развития его программно-алгоритмического обеспечения и использования для определения скоростного строения верхней части геологического разреза с повышенной точностью.

#### **Актуальность темы исследования.**

Проблема повышения точности и достоверности восстановления скоростного строения верхней части геологического разреза на основе обработки большого объема многоканальных сейсмограмм является весьма актуальной. Основным методом анализа сейсмических данных поверхностных волн и построения разреза является метод многоканального анализа сейсмических поверхностных волн (MASW). Недостаточная фильтрация случайных и регулярных волн-помех при преобразовании исходных сейсмических данных в спектральную область приводит к появлению ложных максимумов в изображении распределения амплитудного спектра сейсмических данных (сейсмограмм), наблюдаемого в пространстве «частота- волновое число». К тому же в силу возможностей метода MASW используются данные коротких линий наблюдения для повышения латерального разрешения двумерных скоростных моделей верхней части геологического разреза, что приводит к дополнительному размытию изображения двумерного амплитудного спектра данных сейсмограмм и уменьшению целевого диапазона частот при применении известных алгоритмов, основанных на методе спектрального анализа.

Другое обстоятельство при анализе двумерных спектров связано с необходимостью пикирования спектральных максимумов при построении дисперсионных кривых фазовых скоростей. Традиционно это производится в ручном/полуавтоматическом режиме, что ограничивает возможность обработки большого объема сейморазведочных данных, полученных методом MASW. Поскольку построение дисперсионных кривых поверхностных волн – ключевой этап метода MASW, то его качество значительно влияет на точность и достоверность определения скоростного строения верхней части геологического разреза.

С учетом вышесказанного следует, что в настоящее время существует необходимость развития программно-алгоритмической составляющей метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW) на предмет автоматизации и повышения точностей процедуры построения дисперсионных кривых фазовых скоростей и определения скоростного строения верхней части геологического разреза.

Настоящая диссертационная работа посвящена решению перечисленных вопросов, что определяет ее несомненную актуальность и важность.

**Цель исследования** – развитие программно-алгоритмического обеспечения метода многоканального анализа данных сейсмических поверхностных волн за счёт использования частотно-временной фильтрации сейсмограмм и искусственных нейронных сетей для повышения точности решения обратной задачи, а именно определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза.

Реализация сформулированной цели исследований обуславливает создание и развитие метода и средств определения скоростного строения верхней части геологического разреза с повышенной точностью.

#### **Научные задачи исследования**

1. Разработать и программно реализовать алгоритм построения дисперсионных кривых фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн по многоканальным данным фланговых линейных систем наблюдения на основе помехоустойчивого спектрального анализа с использованием преобразования Стоквелла и фильтрации сейсмических данных в частотно-временной области.

В качестве основного научного результата здесь выделяется новый оригинальный алгоритм помехоустойчивого автоматического построения дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн от частоты с использованием одномерного преобразования Фурье по расстоянию. В дальнейшем при переходе в частотно-временную область с использованием обобщенного вейвлет-преобразования Стоквелла и последующей фильтрации сейсмических данных фазовым суммированием вдоль множества прямых линий с различными наклонами по многоканальным данным линейных фланговых систем наблюдения становится возможным отфильтровать случайные и регулярные волн-помехи в пространстве время-расстояние.

Алгоритм, его программная реализация и верификация выполнены автором лично. Получен важный вывод, что с использованием разработанного алгоритма повышается точность построения дисперсионной кривой фазовой скорости при наличии регулярных и случайных помех в сейсмических данных.

С точки зрения теоретической и практической значимости полученного результата преимущество предложенного алгоритма – повышенная точность результатов и возможность исключить ручное пикирование дисперсионных кривых фазовых скоростей при обработке полевых сейсмических данных.

2. Разработать и программно реализовать алгоритм определения параметров одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза (значений скорости поперечной волны и мощности слоёв) обращением фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн с ограничением пространства возможных значений параметров скоростной модели и использованием искусственных нейронных сетей. Основным полученным здесь результатом определяется разработкой алгоритма определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза обращением дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей поверхностных волн от частоты с использованием метода искусственной нейронной сети (ИНС). Автором показано, что при использовании разработанного алгоритма повышается точность, уменьшается неоднозначность построения скоростной модели, а время вычисления решения обратной задачи растёт незначительно с увеличением числа дисперсионных кривых, по сравнению с известными алгоритмами Монте-Карло и GWO.

В плане методической реализации метода ИНС автором разработаны оригинальные способы настройки архитектуры полносвязной многослойной ИНС для аппроксимации нелинейной зависимости фазовой скорости поверхностной волны от скорости S-волны и мощности слоёв с использованием статистического анализа распределений ошибок определения параметров скоростной модели. Дополнительно при этом автором рассмотрен вопрос оптимизации параметризации скоростной модели по построенной дисперсионной кривой фазовой скорости для ограничения пространства определяемых параметров.

С точки зрения теоретической и практической значимости полученных здесь результатов использование разработанного алгоритма позволяет значительно ускорить и повысить точность инверсии данных метода MASW; применение разработанного способа оптимизации выбора параметризации скоростной модели позволяет избежать известных трудностей ограничения пространства решений в отсутствии априорных данных; разработанный способ настройки архитектуры ИНС универсален и может применяться для решения схожих задач.

В целом, несомненно, что предложенный и реализованный автором подход к решению обратной задачи восстановления скоростного разреза является оригинальным, новым и практически важным.

В плане программной реализации численный расчёт дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн в горизонтально-слоистых упругих геологических средах основывается на методе матричных пропагаторов и выполняется при использовании лично адаптированного автором программного кода, написанного на языке программирования Fortran и входящего в пакет программ для обработки сейсмологических данных «Computer Program Seismology». Адаптация программного кода включает распараллеливание вычислений на ядрах центрального процессора с использованием библиотеки OpenMPI языка программирования Fortran и среды программирования Python.

Разработанные программные средства характеризуют автора как квалифицированного программиста, владеющего современными системами и языками программирования, что позволило автору выполнить научные исследования на высоком современном научно-техническом уровне.

Практическая апробация предложенного метода построения скоростной модели верхней части геологического разреза, связанного с определением значений скорости поперечной волны и мощности слоёв, выполнена на основе анализа сейсмических данных, полученных в эксперименте со скважинными взрывами, выполненными на глубине 16.5 м. При этом база наблюдения MASW охватила диапазон расстояний до 600 м. Разработанным способом автором построены профильный скоростной разрез заданной области среды, а также карты распределения восстановленной скорости S-волны по площади на различных высотах. Полученные погрешности восстановления составляют не хуже 9%.

Представленная работа прошла необходимую апробацию: результаты ее доложены автором на 6-ти международных конференциях, материалы опубликованы в 4-х статьях из базы ВАК, в 4-х из баз WoS/Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы.

Работа выполнялась и обсуждалась в кругу высококвалифицированных специалистов, что несомненно способствовало ее высокому научному качеству.

Замечания по работе.

1. Разработанный автором программно-алгоритмический метод связан с решением одномерной задачи восстановления скоростной модели верхней части геологического разреза. Однако современные тенденции вычислительного моделирования процессов распространения сейсмических волн в сложнопостроенных средах и восстановления скоростного разреза связаны с 2-3

Д средами.. Применительно к рассматриваемым в работе задачам моделирования при этом открываются возможности повышения точности и устойчивости решения обратной задачи восстановления скоростного разреза за счет привлечения дополнительных данных. Это потребует расширенного моделирования метода восстановления с привлечением ИПС.

2. Задача адаптивного снижения скорости подбора весов в методе инверсии с помощью ИНС, как обосновано автором, сводится к многокритериальной оптимизационной задаче. Решение ее автором рассмотрено на ряде частных примеров и снабжено соответствующими графиками. В связи с этим важны аналитические обобщения в отношении скорости подбора весов ИНС- скорости сходимости на этапе обучения в зависимости от ключевых факторов.
3. Рассмотренные в параграфе 3.6 примеры оценки неустойчивости решения обратной задачи обращением фазовых скоростей поверхностной волны серий независимых запусков различных алгоритмов инверсии не в полной мере отражают количественный расчёт области неоднозначности (эквивалентности результатов), т.к. не учитывается шум, вносимый в данные, и ошибки обратного оператора.

Отмеченные замечания не умаляют высокого научно-технического уровня и значимости выполненной работы.

В целом диссертационную работу Яблокова следует рассматривать как крупное и важное исследование, направленное на создание современного метода и высокопроизводительных программно-алгоритмических средств повышения точности и достоверности построения скоростной модели верхней части геологического разреза.

Диссертация Яблокова А.В. выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, логической завершенностью и содержит решение научной задачи, направленной на создание современного метода и высокопроизводительных программно-алгоритмических средств повышения точности и достоверности построения скоростной модели верхней части геологического разреза. Работа имеет большую научную и практическую значимость для проведения сейсморазведочных работ.

Диссертация соответствует критериям, установленным п.9 Положения о присуждении ученых степеней для ученой степени кандидата наук, а ее автор А.В.Яблоков достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 –Геофизика.

Главный научный сотрудник  
Лаборатории геофизической информатики  
Института вычислительной математики и  
математической геофизики СО РАН

д.т.н.  
(раб.тел. 330-87-43, e-mail: [marat@opg.sccc.ru](mailto:marat@opg.sccc.ru) )

Хайретдинов М.С.

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании лаборатории геофизической информатики, одно из основных направлений которой связано с вычислительным моделированием волновых процессов в сложнопостроенных средах, 15 марта 2022 г, протокол №8, отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации. Отзыв утвержден на заседании Ученого совета ИНГГ СО РАН, протокол № 8 «15» марта 2022 г.

Заведующий лабораторией геофизической информатики, д.т.н.

Ковалевский Валерий Викторович