

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.087.02, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И  
ГЕОФИЗИКИ ИМ. А.А. ТРОФИМУКА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И  
НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело N \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 07.04.2022 N 03/07

О присуждении Яблокову Александру Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «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 принята к защите 20.01.2022 (протокол заседания N 03/01) диссертационным советом 24.1.087.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 3, полномочия совета установлены приказом Минобрнауки России от 03.06.2021 № 561/нк.

Соискатель Яблоков Александр Викторович 21 октября 1993 года рождения. В 2017 году соискатель с отличием окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки «05.04.01 Геология» с присвоением квалификации «магистр», в 2020 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки «05.06.01 Науки о Земле», работает в должности научного сотрудника в лаборатории математического моделирования многофизических процессов в нативных и искусственных многомасштабных гетерогенных средах и в лаборатории динамических проблем сейсмологии Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории динамических проблем сейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Сердюков Александр Сергеевич, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:** **Собисевич Алексей Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, **Пономаренко Андрей Валерьевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики упругих сред кафедры физики Земли физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», - **дали положительные отзывы** на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН), г. Новосибирск, в своём положительном отзыве, подписанном заведующим лабораторией геофизической информатики, д.т.н. Ковалевским Валерием Викторовичем и главным научным сотрудником лаборатории геофизической информатики, д.т.н. Хайретдиновым Маратом Саматовичем, указала, что диссертация Яблокова А.В. выполнена на актуальную тему, обладает существенной научной новизной, логической завершенностью и содержит решение научной задачи,

направленное на создание современного метода и высокопроизводительных программно-алгоритмических средств повышения точности и достоверности построения скоростной модели верхней части геологического разреза, имеет большую научную и практическую значимость для проведения сейсморазведочных работ. Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а её автор, Яблоков А.В. достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Соискатель имеет 52 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано **30 работ**, из них **четыре статьи** опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией и входящих в международные базы Web of Science, Scopus («Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», «Geophysics», «Geophysical Prospecting»), **одно свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ. Соискатель принимал участие на всех этапах подготовки публикаций (обобщение и обработка фактических геолого-геофизических данных, численное моделирование распространения сейсмических волн и дисперсионных кривых поверхностных волн, анализ результатов моделирования, комплексная интерпретация и верификация полученных данных, написание текста статей и подготовка графического материала). Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 212 страниц, их авторский вклад – приблизительно 119 страниц. Сведения, представленные соискателем об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

#### **Наиболее значимые публикации:**

1. Методика и результаты исследования физико-механических свойств связных грунтов сейсмическим методом / М.В. Курленя, А.С. Сердюков, Г.С. Чернышов, А.В. Яблоков [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 3. – С. 3-10.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618979. nSeisLab / Г.С. Чернышов, А.В. Яблоков – Заявка № 2019617513. Дата поступления 21.06.19. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.07.19. Опубликовано 08.07.19.

3. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves / A.V. Yablokov [et al.] // Geophysical Prospecting. – 2021. – V. 69. – №. 7. – P. 1405-1432.

4. Reconstruction of seismic signals using S-transform ridges / A.S. Serdyukov, A.V. Azarov, A.V. Yablokov [et al.] // Geophysical Prospecting. – 2021. – V. 69. – №. 4. – P. 891-900.

5. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data / A.S. Serdyukov, A.V. Yablokov [et al.] // Geophysics. – 2019. – V. 84. – № 1. – P. A19-A24.

На диссертацию и автореферат поступили **9 отзывов** (включая отзывы официальных оппонентов и ведущей организации), все положительные. В отзывах отмечается высокая актуальность темы проведённых исследований, важность разработанных алгоритмов и созданного на их основе программно-алгоритмического комплекса обработки сейсмических данных. В отзывах имеются замечания, касающиеся стиля изложения (д.ф.-м.н. Петров П.С., к.ф.-м.н. Пономаренко А.В.), отсутствия ссылок на работы других авторов в автореферате (д.ф.-м.н. Петров П.С.), недостаточной информации об архитектуре используемой нейронной сети в автореферате (д.ф.-м.н. Петров П.С.), отсутствия в автореферате информации о влиянии продольной волны и плотности слоёв на дисперсионные кривые (д.ф.-м.н. Глушков Е.В.). Собисевич А.Л. отмечает, что автор в своей диссертационной работе ограничивается рассмотрением только фундаментальных мод, тогда как учёт высших мод мог бы повысить устойчивость решения обратной задачи, также отмечает, что целесообразно было бы приложить к основному тексту диссертации лично разработанные автором программные коды. Пономаренко А.В. отмечает, что в работе недостаточно подробно раскрыты отличия рассмотренных функций активации, тип используемой 2D интерполяции и способ введения рельефа в полученные значения глубин границ.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** следующим: Собисевич Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», член-корреспондент РАН, профессор РАН, является высококвалифицированным специалистом в области геофизики, вулканологии и геоэкологии, анализа данных в задачах пассивного сейсмоакустического

исследования земной коры, решения прямой задачи для волн Релевского типа, исследуемых в диссертации Яблокова А.В., имеет публикации по тематике диссертации соискателя; Пономаренко Андрей Валерьевич, кандидат физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», является высококвалифицированным специалистом в области геофизики, разработки алгоритмов и программного обеспечения для обработки данных поверхностных волн с целью построения скоростной модели верхней части геологического разреза, что также является предметом исследования в диссертации Яблокова А.В., имеет публикации по тематике диссертации соискателя, связанные с темой представляемой к защите диссертации; в состав ведущей организации ИВМиМГ СО РАН входит лаборатория геофизической информатики, специалисты которой проводят научные исследования по тематике диссертации и способны определить научную и практическую ценность диссертации, имеют публикации по тематике диссертации соискателя.

**Диссертационный совет отмечает,** что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработан** новый эффективный двухмодульный алгоритм определения скоростного строения верхней части геологического разреза, состоящий из помехоустойчивого алгоритма (модуля) построения дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн по многоканальным данным линейной системы наблюдений и алгоритма (модуля) построения скоростной модели поперечной волны обращением дисперсионных кривых с применением искусственной нейронной сети (ИНС), позволяющий повысить точность обработки сейсмических данных и расширить границы применимости метода многоканального анализа поверхностных волн при решении задач инженерной и нефтегазовой сейсморазведки;

**предложен нетрадиционный подход** к настройке архитектуры ИНС для аппроксимации зависимости дисперсионной кривой от параметров скоростной модели с использованием статистического анализа распределения ошибок решения обратной задачи и **подход** к оптимизации выбора параметризации скоростной модели по построенной дисперсионной кривой фазовой скорости на основе теории распространения поверхностных волн и с использованием адаптированного

алгоритма на основе метода Монте-Карло;

**доказана** перспективность применения разработанных алгоритмов на практике путём их апробации на серии синтетических и полевых сейсмических данных;

**введён** новый термин – наклонное «Slant» FK-преобразование (SFK), подразумевающий оригинальный способ построения спектральных изображений сейсмических данных при их фильтрации в частотно-временной области.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

применительно к проблематике диссертации **эффективно использованы:** теория распространения сейсмических волн в упругих моделях геологических сред, комплекс существующих базовых методов спектрального анализа сейсмических данных (FK-преобразование на основе двумерного преобразования Фурье, вейвлет-преобразование, преобразование Стоквелла) и решения обратной задачи сейсмологии (алгоритмы Монте-Карло и GWO), численный метод расчёта дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн в горизонтально-слоистых упругих геологических средах, основанный на методе матричных пропагаторов;

**проведена модернизация** обобщённой математической модели распространения плоской волны между двумя сейсмоприёмниками, расположенными на одной линии с источником, для учёта нестационарности поля распространения сейсмических поверхностных волн при многоканальном подходе, а также **модернизация** численного расчёта дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн путём распараллеливания вычислений на ядрах центрального процессора с использованием библиотеки OpenMPI языка программирования Fortran с открытой лицензией и реализация обёртки для языка программирования Python.

**Значение полученных соискателем результатов** исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработан** алгоритм построения дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей поверхностной волны от частоты, который позволяет исключить субъективизм и повысить точность пикирования фазовых скоростей поверхностных волн на изображениях двумерного амплитудного спектра сейсмических данных при наличии случайных и регулярных помех за счёт их фильтрации в частотно-временной области, а также **разработан** алгоритм определения скоростного строения верхней части геологического разреза с применением ИНС, который позволяет значительно

ускорить (например, в 2 раза при обращении 50000 дисперсионных кривых по сравнению с алгоритмом Монте-Карло) и повысить точность (в 2 раза по сравнению с алгоритмом Монте-Карло) решения обратной задачи;

**определена** область применимости разработанных программно-алгоритмических средств – определение скоростного строения верхней части геологического разреза при решении прикладных задач инженерно-геологических изысканий в режиме реального времени, 4D экспресс-мониторинг физико-механических параметров грунтов и нефтегазовой сейсморазведки при расчёте статических поправок обменных волн;

**создана система практических рекомендаций** настройки архитектуры полносвязной многослойной ИНС, которая основана на принципах статистического анализа распределений ошибок решения обратной задачи и может применяться для решения схожих задач;

**представлены методические рекомендации** оптимизации выбора параметризации скоростной модели, которая позволяет избежать известных трудностей задания диапазонов возможных значений определяемых параметров для ограничения пространства решений в отсутствие априорной информации, определять число слоёв восстанавливаемой скоростной модели и формировать репрезентативный набор данных для подбора весов ИНС по значениям построенной по максимумам двумерного амплитудного спектра сейсмических данных референтной дисперсионной кривой фазовой скорости, рассматривать широкие диапазоны изменения значений фазовых скоростей поверхностной волны.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила:

**для экспериментальных работ** использовались проверенные полевые сейсморазведочные данные, полученные опытным отрядом малоглубинной сеймики ИНГГ СО РАН с использованием сертифицированной регистрирующей сеймостанции РОСА-L, результаты обработки полевых данных с использованием разработанного программно-алгоритмического комплекса согласуются с результатами других геофизических методов, корректность верификации реализованных алгоритмов обеспечивается слепым тестированием на синтетических данных для одномерных и двумерных скоростных моделей, в рамках которого определяется точность и применимость исследуемого метода; **теория** разработанных

алгоритмов помехоустойчивого спектрального анализа и обращения дисперсионных кривых согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации; **идея** разработанных алгоритмов, систем практических и методических рекомендаций **базируется** на обобщении передового мирового опыта, известного из публикаций, и анализе практических результатов экспериментальных работ, полученных соискателем диссертации.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке, обосновании и программной реализации предложенных в диссертации алгоритмов; создании системы практических и методических рекомендаций для обработки данных поверхностных волн; численном моделировании синтетических данных, используемых для тестирования и верификации разработанного программно-алгоритмического комплекса; обработке синтетических и полевых сейсморазведочных данных для апробации разработанных алгоритмов; сравнении предложенных и традиционных алгоритмов спектрального анализа и инверсии и сопоставлении их результатов; адаптации программных реализаций алгоритмов расчёта прямой задачи для моделирования поля сейсмических волн и дисперсионных кривых поверхностных волн; непосредственном участии в ряде полевых сейсмических испытаний (Быстровский вибросейсмический полигон, сейсмический профиль около д. Бурмистрово) для получения малоглубинных данных; подготовке 29 публикаций по теме диссертации (написание черновых вариантов текстов, подготовка графических иллюстраций, таблиц и приложений) и государственной регистрации одного программного обеспечения (оформление соответствующей документации); выступление на 13 всероссийских и международных научных конференциях (подготовка материалов тезисов и презентаций).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания и вопросы:

- Изменяется ли толщина слоев при решении обратной задачи? Возможно ли изменить баланс подбора весов таким образом, чтобы восстанавливаемая модель больше определялась толщиной слоёв, а не скоростью внутри слоя? Есть ли в вашем алгоритме возможность менять количество слоёв по профилю? (Кулаков И.В.),
- Для какой задачи используется построенный разрез? Если во время сейсморазведочных работ возбуждаются продольные и поперечные колебания, нужна



ли обработка вашим методом? Почему не используются границы, полученные по обработке продольных волн, для улучшения результата обработки поверхностных волн? (Еманов А.А.).

- Проводилась ли фильтрация построенных скоростных разрезов для удаления артефактов в нижнем слое? (Ельцов И.Н.).

- Восстанавливаете ли вы зону малых скоростей, т.е. двумерные разрезы с латеральными неоднородностями? (Чеверда В.А.).

- Почему сглаженный спектр лучше дифференцированного? (Суворов В.Д.).

- Участвовали ли вы в полевых сейсмических работах? (Собисевич А.Л.).

Соискатель Яблоков А.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- Толщина слоёв меняется в процессе решения обратной задачи. Веса подбираются в процессе решения оптимизационной задачи минимизации невязки между дисперсионными кривыми и весами, действующими на скоростную модель. Приоритет для подбора мощностей слоёв возможно задать, введя ограничения в рассчитываемый функционал невязки. Количество слоёв вдоль профиля фиксировано и выбрано исходя из решения оптимизационной задачи предложенным способом выбора параметризации скоростной модели по референтной дисперсионной кривой.

- При обработке инженерных данных построенный разрез используется для определения физико-механических свойств грунтов, в частности, для решения задач сейсморайонирования и расчета построения карт бальности. При обработке данных разведочной сеймики построенная модель ВЧР используется для расчета статических поправок для отраженных S-волн, через корреляционные зависимости используется для расчета значений скорости продольной волны и статических поправок для отраженных P-волн, также для моделирования поля поверхностных волн и их подавления на записях сейсмограмм. Обработка методом MASW позволяет получить разрез скоростей поперечной волны по данным МПВ, без генерации и регистрации поперечных колебаний, что в разы удешевляет стоимость полевых работ. Была поставлена задача – реализация алгоритма, независимого от априорных данных. Задача была выполнена. Но, несомненно добавление априорной информации уменьшит неоднозначность решения обратной задачи, в этом плане алгоритм является гибким и границы можно зафиксировать для лучшего подбора скоростей.

- Фильтрация скоростных разрезов не проводилась чтобы показать все восстановленные значения скоростей, но проводилась фильтрация и сглаживание дисперсионных кривых.
- В диссертации показано, что задача одномерна в пределах длины базы наблюдения и при такой постановке восстанавливаются двумерные разрезы с латеральными неоднородностями с использованием рекомендованных параметров системы наблюдения.
- Сглаженная дисперсионная кривая лучше согласуется с теоретической дисперсионной кривой, рассчитанной для одномерной модели. Сглаженный спектр строится за счёт фильтрации волн-помех.
- Соискатель имеет 8-ми летний опыт полевых сейсморазведочных работ, является активным членом отряда малоглубинной сейсморазведки ИНГГ СО РАН. Последние сейсморазведочные работы проводились летом прошлого года в Забайкальском крае, в районе пос. Удокан. Работы выполнялись для решения задач сейсморайонирования и построения карт бальности с использованием разработанного программно-алгоритмического комплекса и обработкой данных по методу MASW.

На заседании 7 апреля 2022 г. диссертационный совет принял решение:  
за разработку новых научно обоснованных технических, технологических и программных решений, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие малоглубинной сейсморазведки, присудить Яблокову Александру Викторовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора наук по физико-математическим наукам, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 17, против - нет, недействительных бюллетеней нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета, д.г.-м.н.

В.С. Селезнев

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.г.-м.н., доцент

Н.Н. Неведрова

07.04.2022