

На правах рукописи



ЯБЛОКОВ Александр Викторович

**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**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Сердюков Александр Сергеевич,
кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Собисевич Алексей Леонидович,
доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН,
профессор, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
главный научный сотрудник;

Пономаренко Андрей Валерьевич,
кандидат физико-математических наук, Санкт-Петербургский
государственный университет, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительной математики и математической
геофизики Сибирского отделения Российской академии наук
(г. Новосибирск).

Защита состоится 07 апреля 2022 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02 (Д 003.068.03) на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3
факс (8-383) 330-28-07,
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН
<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/yablokov2021>

Автореферат разослан 11 февраля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331639



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

Актуальность темы исследования. Изображения распределения амплитудного спектра сейсмических данных (сейсмограмм) в пространстве частоты и волнового числа, полученные с использованием известных алгоритмов построения дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей поверхностных волн от частоты (f - k преобразование, τ - p преобразование, алгоритмы направленного суммирования и фазового сдвига), как правило, содержат ложные энергетические максимумы. Причина – недостаточная фильтрация случайных и регулярных волн. Кроме того, в силу возможностей метода MASW используются данные коротких линий наблюдения для повышения латерального разрешения двумерных скоростных моделей верхней части геологического разреза, что приводит к размытию изображения двумерного амплитудного спектра данных сейсмограмм и уменьшению целевого диапазона частот при применении известных алгоритмов, основанных на методе спектрального анализа. Наличие ложных максимумов и эффекта спектрального размывания значительно снижает качество изображений двумерных спектров сейсмограмм и осложняет процедуру пикирования максимумов энергии (дисперсионной кривой). Поэтому пикирование дисперсионной кривой выполняется вручную и представляет собой трудоёмкую процедуру, а результаты носят субъективный характер. Необходимость в ручном/полуавтоматическом пикировании спектральных максимумов при построении дисперсионных кривых фазовых скоростей ограничивает возможность обработки большого объёма сейсморазведочных 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. Поэтому разработка помехоустойчивого алгоритма построения точных дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей поверхностной волны от частоты, основанного на помехоустойчивом спектральном анализе многоканальных данных линейных систем наблюдений, актуальна.

Известные из публикаций алгоритмы построения скоростной модели верхней части геологического разреза обращением дисперсионных

кривых поверхностных волн имеют ряд ограничений. Так, алгоритмы, основанные на методах локальной оптимизации (алгоритмы Левенберга-Марквардта, Оккама и др.), дают устойчивое решение только при использовании гладких скоростных моделей, что снижает точность определения положения границ слоёв, а сходимость решения в таких алгоритмах в значительной степени зависит от начального приближения, точности расчёта первых и вторых производных целевого функционала. При использовании алгоритмов, основанных на методах глобальной оптимизации (Монте-Карло, GWO), выполняется одновременное восстановление значений скорости и мощности в слоях. Однако при этом требуется наличие априорной информации для ограничения пространства подбираемых параметров скоростной модели, предварительная настройка параметров оптимизатора и значительные вычислительные ресурсы. Высокие требования к вычислительным ресурсам известных алгоритмов инверсии также ограничивают применимость метода MASW при обработке больших объёмов сейсморазведочных данных. В то же время, всё чаще при решении обратных задач сейсмологии используются искусственные нейронные сети (ИНС) из-за простоты в реализации, устойчивости результатов, высокой скорости и точности вычисления. Известный алгоритм обращения дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн с использованием ИНС требует совершенствования: необходимо разработать и включить в алгоритм способ оценки пространства возможных параметров скоростной модели для расчёта репрезентативного набора тренировочных данных и разработать способ настройки архитектуры ИНС.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость развития программно-алгоритмической составляющей метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW) на предмет автоматизации и повышения точности процедуры построения дисперсионных кривых фазовых скоростей, повышения точности и вычислительной эффективности определения скоростного строения верхней части геологического разреза.

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 и скорости решения обратной задачи, а именно определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза.

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.

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.

Теория, методы исследования, фактический материал, программное обеспечение

Решение поставленных задач основывается на теории распространения сейсмических волн в упругих моделях геологических сред, а также на использовании методов спектрального анализа сейсмических данных и методов решения обратной задачи сейсмологии.

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 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 с открытой лицензией и реализацию обёртки для языка программирования Python.

Данные синтетических сейсмограмм рассчитываются с использованием лично адаптированного программного пакета с открытой лицензией «Sofi2D», в котором реализовано численное решение системы уравнений Ламе для упругой двумерной модели геологической среды на основе метода конечных разностей. Адаптация программного кода включает подбор параметров для моделирования распространения сейсмических волн в двумерной неоднородной упругой модели геологической среды, записи данных сейсмограммы для различных систем наблюдений и реализацию обёртки для языка программирования Python.

Для реализации классического $f-k$ преобразования используется быстрое двумерное преобразование Фурье по времени и пространству из библиотеки с открытой лицензией «numpy» языка программирования

Python. Временно-частотные представления сейсмограмм вычисляются с использованием реализации алгоритма быстрого обобщённого преобразования Стоквелла из библиотеки с открытой лицензией «stockwell» языка программирования Python. Выполняется распараллеливание вычислений по количеству используемых частот на ядрах центрального процессора с использованием библиотек с открытой лицензией языка программирования Python «joblib» и «multiprocessing».

Обратная задача решается в классе слоистых моделей, т.е. одновременного подбора значений скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза, с использованием личной реализации алгоритма Монте-Карло и лично адаптированной реализации алгоритма GWO. Адаптация включает применение программного кода определения фазовых скоростей поверхностных волн в горизонтально-слоистых упругих геологических средах для расчёта прямой задачи, распараллеливание на ядрах центрального процессора по количеству независимых запусков решения обратной задачи с использованием библиотек с открытой лицензией языка программирования Python «joblib» и «multiprocessing».

Для настройки архитектуры и подбора весов полносвязной многослойной искусственной нейронной сети используется библиотека с открытой лицензией «tensorflow» языка программирования Python. Для построения двумерных скоростных моделей применяется пространственная интерполяция.

Для верификации разработанных и программно реализованных алгоритмов выполняется тестирование в ходе численных экспериментов, сравнительный анализ с известными из публикаций алгоритмами и сопоставление результатов, полученных при обработке синтетических сейсмических данных при наличии случайных и регулярных помех. Точность алгоритма инверсии дисперсионных кривых с применением ИНС оценивается при обращении большого объёма набора тестовых данных (1250000 дисперсионных кривых) и сопоставлении статистических характеристик (математического ожидания, дисперсии, коэффициентов асимметрии и эксцесса) распределений ошибок восстановления параметров скоростной модели с использованием различных гиперпараметров ИНС.

Для апробации разработанных и реализованных алгоритмов используются данные инженерной сейсморазведки, полученные полевым отрядом лаборатории динамических проблем сейсмологии ИГиГ СО РАН.

Защищаемые научные результаты

1. Алгоритм помехоустойчивого построения дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн от частоты по результатам перехода в частотно-временную область с использованием преобразования Стоквелла и последующей фильтрации сейсмических данных фазовым суммированием вдоль множества прямых линий с различными наклонами по многоканальным данным линейных фланговых систем наблюдения.

2. Алгоритм 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 ограничением диапазонов возможных значений определяемых параметров и использованием искусственной нейронной сети с подобранной архитектурой.

Научная новизна

1. С использованием преобразования Стоквелла для построения изображений распределения энергии сейсмических волн в пространстве время-частота- расстояние и с использованием одномерного преобразования Фурье по расстоянию для расчёта спектра амплитуд сейсмических волн вдоль множества прямых линий с различными наклонами на фиксированных частотах разработан и реализован в виде научно-исследовательской версии программного обеспечения помехоустойчивый алгоритм построения дисперсионных кривых фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн по многоканальным данным линейных фланговых систем наблюдения.

2. С использованием рассчитанных статистических характеристик распределения ошибок при определении параметров скоростной модели разработан способ настройки архитектуры полносвязной многослойной ИНС для аппроксимации нелинейной зависимости фазовой скорости поверхностной волны от скорости поперечной волны и мощности слоёв.

3. С использованием адаптированной реализации алгоритма на основе метода матричных пропагаторов и метода Монте-Карло разработан способ оптимизации выбора параметризации скоростной модели по построенной дисперсионной кривой фазовой скорости, а именно определение числа слоёв, диапазонов возможных значений скорости поперечной волны и мощности слоёв для ограничения пространства определяемых параметров и расчёта репрезентативного тренировочного набора данных.

4. С применением полносвязной многослойной ИНС с подобранной архитектурой разработан и реализован в виде научно-исследовательской версии программного обеспечения алгоритм определения скорости

поперечной волны и мощности слоёв одномерной упругой модели верхней части геологического разреза.

Личный вклад

1. Разработан и программно реализован помехоустойчивый алгоритм определения фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн по многоканальным данным линейных фланговых систем наблюдения с применением преобразования Стоквелла и последующей фильтрации сейсмических данных с использованием фазового суммирования вдоль множества прямых линий с наклонами, соответствующими значениям групповых скоростей; выполнено сопоставление двумерных амплитудных спектров сейсмических данных в пространстве фазовой скорости и частоты, полученных с использованием стандартного и разработанного алгоритмов спектрального анализа, которое показало что с использованием разработанного алгоритма спектрального анализа определяется более гладкая и реалистичная дисперсионная кривая фазовой скорости поверхностной волны при наличии регулярных и случайных шумов в сейсмических данных, чем при использовании стандартного $f-k$ преобразования.

2. Выполнен сравнительный анализ разработанного алгоритма помехоустойчивого спектрального анализа и алгоритма полосовой фильтрации для извлечения и последующего подавления поверхностных волн из сейсмограмм общей точки возбуждения, из которого следует вывод, что при использовании разработанного алгоритма помехоустойчивого спектрального анализа значительно точнее выделяются и подавляются поверхностные волны, чем при использовании стандартного алгоритма полосой фильтрации.

3. Разработан и программно реализован алгоритм определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза, основанный на разработанном способе ограничения диапазонов возможных значений подбираемых параметров модели и применении искусственной нейронной сети (ИНС) с подобранной архитектурой при инверсии дисперсионных кривых частотной зависимости фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн. Результаты сравнительного анализа показали, что эффективность подбора весов ИНС зависит от следующих гиперпараметров: числа скрытых слоёв и нейронов, типа функции активации, функционала невязки, алгоритма минимизации функционала невязки (оптимизации) и способа уменьшения скорости обучения.

4. На основе найденных зависимостей эффективности подбора весов ИНС от её гиперпараметров и с использованием статистического анализа распределений ошибок определения параметров скоростной

модели соискателем предложен способ настройки архитектуры многослойной нейронной сети с прямой связью для аппроксимации зависимости дисперсионных кривых от скорости S-волн и мощности слоёв.

5. Выполнено сопоставление результатов инверсии синтетических дисперсионных кривых, полученных с использованием различных алгоритмов инверсии данных метода MASW (алгоритма с применением ИНС, алгоритма на основе метода Монте-Карло и алгоритма GWO).

6. Адаптирована программная реализация расчёта прямой задачи, входящая в программный пакет обработки сейсмологических данных с открытым исходным кодом «Computer Program Seismology» для решения задачи вычисления обучающей выборки дисперсионных кривых фазовых скоростей распараллеливанием вычислений на ядрах центрального процессора.

7. Рассчитаны все синтетические данные за исключением одиночной сейсмограммы (рассчитана сотрудниками лаборатории многоволновых сейсмических исследований ИНГГ СО РАН), использующейся для слепого тестирования в главе 4.1.

Теоретическая и практическая значимость работы

Использование разработанного алгоритма построения дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей поверхностной волны от частоты позволяет исключить субъективизм пикирования максимумов двумерного амплитудного спектра сейсмических волн при наличии случайных и регулярных помех в данных за счёт использования программного обеспечения алгоритма. Кроме того, при использовании разработанного алгоритма точность определения значений фазовых скоростей выше по сравнению с известными алгоритмами за счёт фильтрации волн-помех в пространстве времени и частоты.

Использование разработанного алгоритма определения скоростного строения верхней части геологического разреза с применением ИНС позволяет значительно ускорить (в 2.4 и 28.4 раза быстрее, чем алгоритм на основе метода Монте-Карло при обращении 50000 и 1000000 дисперсионных кривых соответственно) определение значений скорости поперечной волны и мощности слоёв с высокой точностью (в два раза превышающей точность алгоритма Монте-Карло). Использование подобранных весов ИНС для инверсии данных метода MASW не требует значительных вычислительных ресурсов и дополнительной настройки её параметров, в отличие от алгоритмов глобальной оптимизации. Вычислительная сложность применения подобранных весов ИНС растёт незначительно с увеличением числа извлечённых дисперсионных кривых, в отличие от алгоритмов глобальной оптимизации. Разработанный способ

настройки архитектуры полносвязной многослойной ИНС является универсальным, т.к. основан на принципах статистического анализа распределений ошибок решения обратной задачи, и может применяться для решения схожих задач. Применение разработанного способа оптимизации выбора параметризации скоростной модели позволяет: избежать известных трудностей задания диапазонов возможных значений определяемых параметров для ограничения пространства решений в отсутствие априорной информации, определять число слоёв определяемой 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. Последнее позволяет применять единожды подобранные веса ИНС для обращения разных дисперсионных кривых (с максимальным отличием не более 50%), построенных при обработке данных с одной площади исследования. Использование разработанного алгоритма инверсии с применением ИНС позволяет получать решение более устойчивое к случайному Гауссовскому шуму в данных, чем при использовании рассмотренных алгоритмов глобальной и локальной оптимизации.

Публикации

Материалы диссертации полностью изложены в 30 научных работах, из которых четыре статьи в научных рецензируемых журналах, рекомендованных для публикации результатов диссертации и входящих в МБД WoS, Scopus (одна в «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», одна в «Geophysics», две в «Geophysical Prospecting»), и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация

Результаты лично докладывались на трёх международных научных конференциях: «Инженерная геофизика 2016» (Анапа, Россия, 2016 г.), «Международная ежегодная конференция и выставка EAGE» (Дания, Копенгаген, 2018 г.; Амстердам, Нидерланды, 2020 г.); на 10 всероссийских научных конференциях: «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, Россия, 2016 г.; 2017 г.; 2018 г.), «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, Россия, 2016 г.; 2017 г.; 2018 г.; 2019 г.; 2020 г.), «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (Новосибирск, Россия, 2018 г.), «Науки о Земле. Современное состояние» (Геологический полигон "Шира", Республика Хакасия, Россия, 2018 г.) и на семи студенческих научных конференциях: «МНСК» (Новосибирск, Россия, 2015 г.; 2016 г.; 2017 г.; 2018 г.), «2 студенческая виртуальная конференция SEG» (онлайн,

2020 г.), «3 студенческая виртуальная конференция SEG» (онлайн, 2020 г.) научных конференциях.

На выполнение исследования в 2019 году получен грант РФФИ №19-35-90055 «Развитие методов обработки данных поверхностных сейсмических волн на основе нового алгоритма частотно-временного анализа и машинного обучения в целях повышения эффективности определения структуры и свойств верхней части геологического разреза».

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 116 источников. Объём работы – 145 страниц, в том числе 79 рисунков и 15 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. А.С. Сердюкову за постановку задачи, многолетнее сопровождение, постоянное внимание и оказанную поддержку в процессе выполнения исследования; В.И. Самойловой, д.ф.-м.н. М.И. Протасову, д.ф.-м.н. Г.М. Митрофанову, д.г.-м.н. И.Ю. Кулакову, д.т.н. Ю.И. Колесникову и к.т.н. С.Б. Горшкалеву за экспертный анализ диссертационной работы и полезные замечания; к.ф.-м.н. А.А. Дучкову за внимание, помощь и интерес к исследованию; д.ф.-м.н. В.А. Чеверде и д.г.-м.н. В.Д. Суворову за обсуждения научных результатов и важные комментарии; Г.Н. Логинову за содействие в ознакомлении с методами машинного обучения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определяется объект исследования, обосновывается актуальность, ставятся цели и научные задачи, описываются этапы и методология исследования, формулируются защищаемые результаты, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость найденных решений и разработок.

В **главе 1** выполняется краткий аналитический обзор известных алгоритмов построения и обращения дисперсионных кривых зависимости фазовой скорости поверхностной волны от частоты по данным метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW) для определения скоростного строения верхней части геологического разреза, указываются их достоинства и недостатки.

Во **второй главе** описывается разработка алгоритма построения дисперсионных кривых зависимости фазовой скорости сейсмических поверхностных волн от частоты, выполняется его верификация при обработке синтетических и полевых сейсмических данных и

сопоставление результатов с известным алгоритмом FK-преобразования [Serdyukov, Yablokov et al., 2019; Serdyukov, ..., Yablokov et al., 2021].

В разделе 2.1 ставится задача, описываются методология, имеющийся фактический материал и программное обеспечение для разработки алгоритма. В разделе 2.2 указываются ограничения алгоритмов спектрального анализа при их использовании в обработке данных поверхностных волн: пространственный аляйсинг, спектральное размывание и учёт характера распределения энергии поверхностной волны для различных моделей геологических сред. В разделе 2.3 подробно описывается разработка помехоустойчивого алгоритма построения дисперсионных кривых фазовых скоростей сейсмических поверхностных волн по многоканальным данным линейных систем наблюдения (SFK-преобразование) с точным порядком действий исполнителя:

- построение изображения распределения энергии сейсмических волн по времени, частоте и расстоянию обобщённым вейвлет-преобразованием Стоквелла зарегистрированных сейсмических данных;

- расчёт спектра амплитуд сейсмических волн вдоль множества прямых линий с различными наклонами на фиксированных частотах с использованием одномерного преобразования Фурье по пространству;

- построение изображения распределения энергии сейсмических волн в пространстве частоты и волнового числа по максимумам спектра их амплитуд;

- построение дисперсионной кривой зависимости фазовой скорости поверхностной волны от частоты по максимумам энергии вдоль волновых чисел [Яблоков, Сердюков, 2018; Сердюков, Яблоков и др., 2019].

В разделах 2.4 и 2.5 выполняется верификация алгоритма и его программной реализации при обработке синтетических данных со случайными и регулярными помехами. Из сопоставления результатов применения разработанного SFK-преобразования и известного FK-преобразования следует вывод, что выделение поверхностных волн расчётом спектра их амплитуд вдоль множества прямых линий с различными наклонами на фиксированных частотах позволяет качественнее отфильтровывать волны-помехи и строить более точные дисперсионные кривые фазовых скоростей [Яблоков и др., 2016; Yablokov et al., 2018].

В разделе 2.6 выполняется опробование алгоритма и его программной реализации при обработке сейсморазведочных данных, полученных полевым отрядом лаборатории динамических проблем сеймики ИНГГ СО РАН вдоль профиля в районе Урского хвостохранилища, Кемеровской области, а также выполняется обратный переход от спектров к

сейсмограммам и даётся оценка влияния длины линии наблюдения на точность построения скоростной модели.

Результаты обработки показывают, что использование разработанных программно-алгоритмических средств позволяет строить дисперсионные кривые фазовых скоростей в более протяжённом диапазоне частот и более устойчиво определять фазовые скорости при уменьшении длины линии наблюдения, чем при использовании стандартного алгоритма ФК-преобразования. Постоянство результатов обращения дисперсионных кривых, построенных разработанным алгоритмом, свидетельствует о его надёжности и повышенной точности (Рисунок 1).

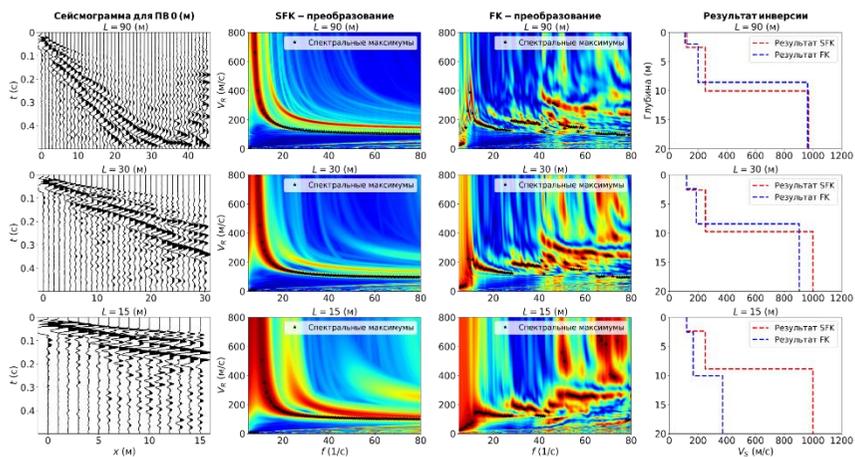


Рисунок 1 – Сейсмограмма сейсмических данных при различной длине базы наблюдения: 90, 30 и 15 м (левый столбец), изображения её V-f спектров по результатам расчёта SFK- и FK-преобразованиями (два центральных столбца) и зависимость глубины от восстановленных значений скоростей поперечной волны обращением построенных дисперсионных кривых фазовых скоростей волны Релея (правый столбец)

В разделе 2.7 выполняется тестирование алгоритма и его программной реализации при обработке полевых данных встречных сейсмограмм, полученных полевым отрядом лаборатории динамических проблем сеймики ИНГГ СО РАН вдоль профиля в районе д. Бурмистрово Новосибирской области. Дисперсионные кривые фазовых скоростей, построенные по максимумам амплитудных спектров встречных сейсмограмм, совпадают с максимальной абсолютной разницей 6 м/с, что свидетельствует о повторяемости результатов и надёжности разработанного алгоритма [Яблоков, Сердюков, 2017].

Во **третьей главе** описывается разработка алгоритма определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза, выполняется его верификация при обращении синтетических дисперсионных кривых фазовых скоростей и сопоставление результатов с известными алгоритмами глобальной оптимизации (алгоритмом Монте-Карло и GWO) [Yablokov et al., 2021].

В **разделе 3.1** ставится задача, описываются методология, имеющийся фактический материал и программное обеспечение для разработки алгоритма. В **разделе 3.2** указываются ограничения алгоритмов обращения дисперсионных кривых поверхностных волн при их использовании в обработке данных поверхностных волн: учёт чувствительности фазовых скоростей поверхностной волны Релея к изменениям упругих параметров геологической среды, влияния параметров системы наблюдений на латеральное и глубинное разрешение построенных двумерных скоростных моделей. В **разделе 3.3** подробно описывается разработка алгоритма определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза с использованием подобранной архитектуры искусственной нейронной сети (ИНС) с точным порядком действий исполнителя:

- построение референтной дисперсионной кривой зависимости фазовой скорости поверхностной волны от частоты осреднением значений фазовой скорости по каждой частоте дисперсионных кривых, построенных по имеющимся сейсмическим данным для исследуемой площади;

- определение диапазонов возможных значений скорости поперечной волны и мощности слоёв по построенной референтной дисперсионной кривой зависимости фазовой скорости поверхностной волны от частоты с использованием разработанного способа оптимизации выбора параметризации скоростной модели, т.е. числа слоёв, диапазонов возможных значений скорости поперечной волны и мощности слоёв.

- построение тренировочного набора данных: выбор параметров скоростных моделей (скорости поперечной волны и мощности слоёв) в пределах оценённых диапазонов в соответствии с равномерным распределением и численный расчёт дисперсионных кривых зависимостей фазовых скоростей поверхностных волн от частоты с использованием выбранных параметров скоростных моделей и адаптированной (распараллеленной на ядрах центрального процессора) реализации алгоритма на основе метода матричных пропагаторов;

- подбор весов ИНС с использованием построенного тренировочного набора данных, подобранной архитектуры и алгоритма оптимизации Nadam;

– определение скорости поперечной волны и мощности слоёв применением подобранных весов ИНС к дисперсионным кривым зависимостей фазовых скоростей поверхностной волны от частоты, построенных по имеющимся сейсмическим данным для исследуемой площади.

В **разделе 3.4** подробно описывается разработка способа настройки архитектуры и гиперпараметров полносвязной многослойной ИНС для аппроксимации нелинейной зависимости фазовой скорости поверхностной волны от скорости поперечной волны и мощности слоёв на основе результатов численных исследований и с использованием статистического анализа распределений ошибок определения параметров скоростной модели [Яблоков и др., 2019].

В **разделе 3.5** выполняется верификация алгоритма и его программной реализации при обращении 1250000 синтетических дисперсионных кривых фазовых скоростей, рассчитанных для скоростных моделей с различным числом слоёв (от двух до шести). Из сопоставления результатов применения разработанного алгоритма с применением ИНС и известного алгоритма Монте-Карло следует вывод, что разработанный алгоритм в 2 и 1.6 раз точнее при определении мощностей и скоростей поперечной волны соответственно.

В **разделе 3.6** выполняется верификация алгоритма и его программной реализации при обращении синтетических дисперсионных кривых фазовых скоростей, рассчитанных для четырёхслойной синтетической скоростной модели в трёх различных случаях: 1 – с положительным градиентом скорости по глубине, 2 – при наличии низкоскоростного слоя и 3 – при наличии высокоскоростного слоя. Из сопоставления результатов серии независимых запусков обращения одной и той же дисперсионной кривой для различных моделей геологических сред с использованием разных алгоритмов следует вывод, что область неоднозначности решения обратной задачи с использованием алгоритма с применением ИНС значительно меньше, чем при использовании алгоритмов Монте-Карло и GWO (Рисунок 2). Из результатов обращения зашумлённых дисперсионных кривых фазовых скоростей с использованием различных алгоритмов следует, что использование разработанного алгоритма с применением ИНС позволяет получать более устойчивое решение при наличии случайного Гауссовского шума в данных, чем при использовании алгоритмов Монте-Карло и GWO [Яблоков и др., 2020; Yablokov, Serdyukov, 2020].

В **разделе 3.7** выполняется сопоставление времени вычисления обращения дисперсионных кривых с использованием различных алгоритмов инверсии, из которых следует что вычислительная сложность

применения подобранных весов ИНС растёт незначительно с увеличением числа построенных дисперсионных кривых, в отличие от алгоритмов глобальной оптимизации, а при обращении большого числа дисперсионных кривых (более 50000) алгоритм с применением ИНС более вычислительно эффективен.

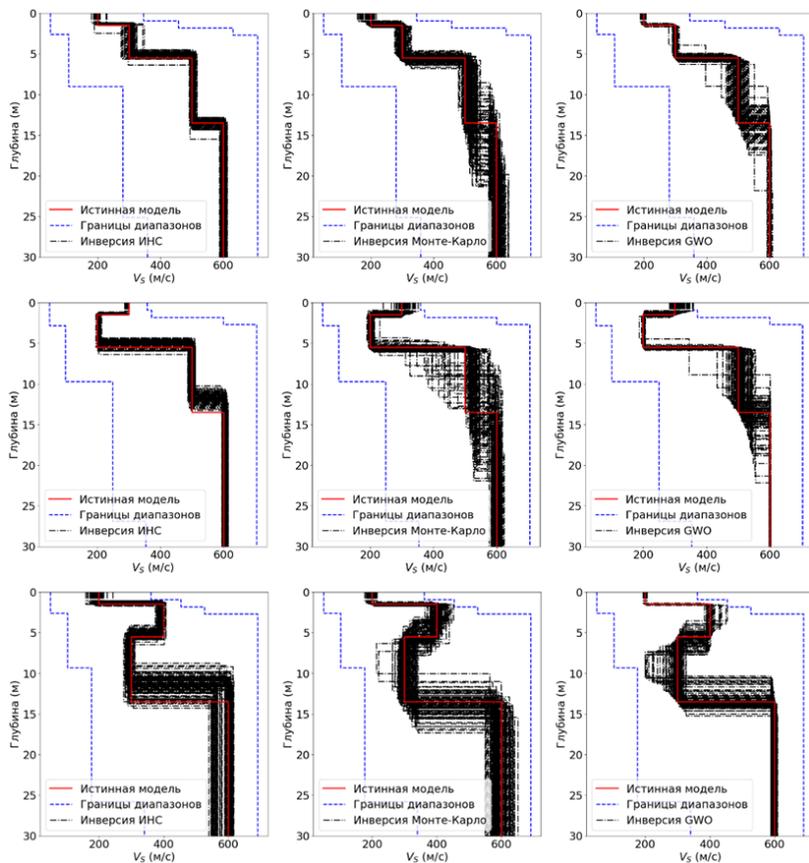


Рисунок 2 – Зависимость восстановленных значений скорости поперечной волны от глубины по результатам независимого обращения дисперсионной кривой фазовой скорости различными алгоритмами для разных моделей геологических сред

В четвертой главе выполняется апробация разработанных программно-алгоритмических средств для их верификации, определения ограничений применимости и решения прикладных задач при обработке

синтетических и реальных сейсмических данных [Курленя, ..., Яблоков и др., 2016; Чернышов, Яблоков, 2019].

В разделе 4.1 в рамках слепого тестирования разработанных программно-алгоритмических средств выполняется построение одномерной скоростной модели по данным синтетической сейсмограммы, из результатов которого следует вывод, что средняя относительная ошибка построения одномерных скоростных моделей составляет 11.5% для мощности и 9% для скорости поперечной волны [Яблоков и др., 2020].

В разделах 4.2 и 4.3 с использованием комплекса разработанных программно-алгоритмических средств выполняется построение двумерных скоростных моделей по синтетическим данным сейсмопрофилирования для упругих моделей геологической среды с волнообразной и со ступенчатой формой границ. По результатам численных экспериментов определяется зависимость точности построения скоростной модели от параметров системы наблюдения: длина базы наблюдения должна быть по меньшей мере в два раза меньше латеральной протяжённости скоростных аномалий, интервал наблюдений должен быть меньше или равен половине длины базы наблюдения.

В разделе 4.4 с использованием комплекса разработанных программно-алгоритмических средств выполняется апробация при обработке данных инженерной сейсморазведки, полученных вдоль профиля в районе д. Бурмистрово. В результате обработки данных определяется скоростное строение верхней части геологического разреза, в котором положение восстановленной границы согласуется с положением границы, полученной методом t'_0 (разница средней глубины около 0.6 м при глубине границы около 23.4 м), что свидетельствует о достоверности полученных результатов. Построенная модель скорости поперечной волны дополняет известную модель скорости продольной волны приповерхностным слоем жёлтых суглинок со средней глубиной около 6.75 м, который не обнаруживается методом t'_0 , но обнаруживается методом вертикального электрического зондирования [Яблоков, Сердюков, 2018].

В разделе 4.5 с использованием комплекса разработанных программно-алгоритмических средств выполняется апробация при обработке данных, полученных в ходе площадных сейсморазведочных работ на месторождении углеводородов в Западной Сибири. В результате построения и обращения 35010 дисперсионных кривых фазовых скоростей волны Релея определяется скоростное строение верхней части геологического разреза – строится серия скоростных разрезов поперечной волны вдоль сейсмических профилей, расположенных на площади около 995 км², с использованием которых строятся площадные карты распределения скорости поперечной волны на различной глубине

(Рисунок 3). Показывается возможность использования единовременно обученной ИНС для обращения всех дисперсионных кривых, построенных в результате обработки имеющихся данных с использованием разработанного алгоритма и его программной реализации [Yablokov et al., 2021].

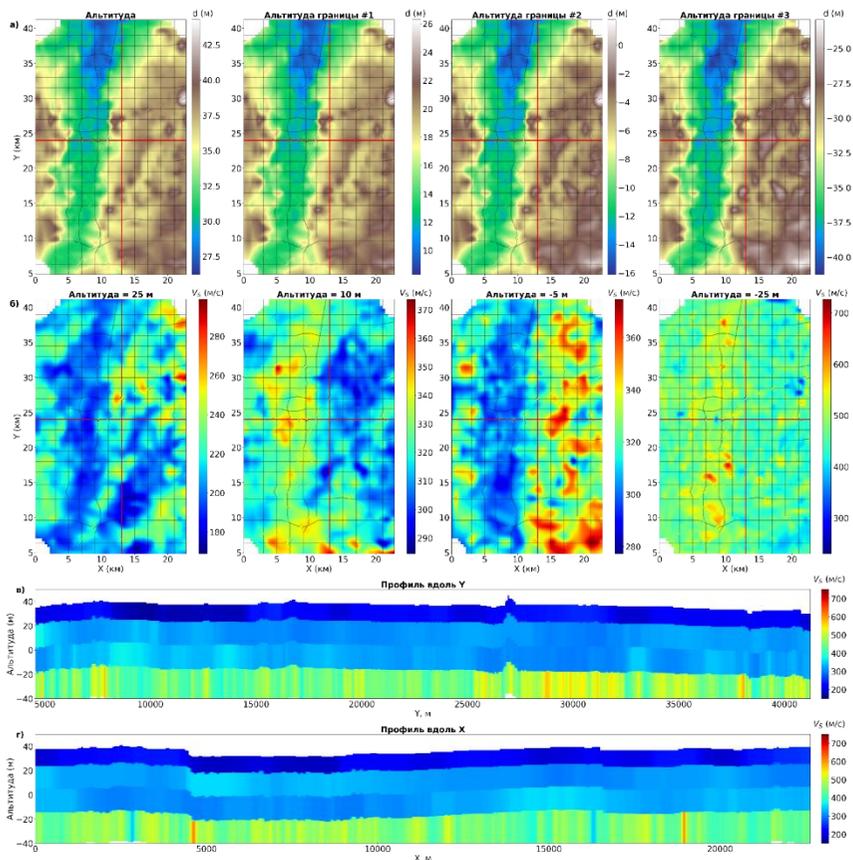


Рисунок 3 – Карты распределения альтитуды и глубин восстановленных границ (а), карты распределения восстановленных значений скорости поперечной волны V_s на альтитуде 15, 40, 60 и 80 м (б), скоростные разрезы поперечной волны для профиля вдоль Y (в) и X (г) по результатам инверсии данных разработанными алгоритмами. Красные линии – выбранные профиля для изображения восстановленных скоростных разрезов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат исследования – 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 искусственных нейронных сетей (ИНС). Разработанные алгоритмы теоретически и экспериментально обоснованы и реализованы в виде научно-исследовательской версии программного обеспечения.

Использование преобразования Стоквелла при разработке алгоритма построения дисперсионных кривых фазовых скоростей позволяет получать высокоразрешающее распределение энергии волн в пространстве времени, частоты и расстояния за счёт переменного по частоте нормализующего множителя. С использованием последующей фильтрации сейсмограммы расчётом спектра амплитуд сейсмических волн вдоль множества прямых линий с различными наклонами на фиксированных частотах выделяется пакет поверхностной волны и подавляются волны-помехи. Несомненное преимущество предложенного алгоритма построения дисперсионных кривых фазовых скоростей – возможность исключить субъективизм пикирования максимумов двумерного амплитудного спектра сейсмических данных при наличии регулярных и случайных помех за счёт использования лично разработанного программного обеспечения алгоритма. Более того, за счёт реализованной в разработанном алгоритме фильтрации регулярных и случайных помех значения дисперсионных кривых фазовых скоростей определяются точнее, чем при использовании f - k преобразования.

Использование ИНС при разработке алгоритма определения скорости поперечной волны и мощности слоёв одномерной скоростной модели верхней части геологического разреза обращением дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн позволяет значительно ускорить и повысить точность решения обратной задачи. Использование подобранных весов ИНС для инверсии данных метода MASW не требует значительных вычислительных ресурсов и дополнительной настройки её параметров, в отличие от алгоритмов глобальной оптимизации. Разработанный способ настройки архитектуры полносвязной многослойной ИНС является универсальным, так как основан на общепринятых принципах статистического анализа распределений

ошибок решения обратной задачи, и может применяться для решения схожих задач. Применение разработанного способа оптимизации выбора параметризации скоростной модели позволяет: избежать известных трудностей задания диапазонов возможных значений определяемых параметров для ограничения пространства решений в отсутствие априорной информации, определять число слоёв определяемой 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. Последнее позволяет применять единожды подобранные веса ИНС для обращения разных дисперсионных кривых (с максимальным отличием не более 50%), построенных при обработке данных с одной площади исследования.

Выгодное отличие разработанных программно-алгоритмических средств от используемых в настоящее время заключается в возможности автоматизации построения двумерных скоростных моделей поперечной волны при наличии случайных и регулярных помех в данных, в значительном ускорении решения обратной задачи при инверсии большого объёма данных метода MASW (от 50 000 дисперсионных кривых), повышенная точность определяемого скоростного строения верхней части геологического разреза.

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

Приоритетным направлением дальнейшего развития программно-алгоритмического обеспечения метода MASW для определения скоростного строения верхней части геологического разреза является разработка алгоритма обращения полного двумерного амплитудного спектра сейсмических данных, что позволит снизить неоднозначность, повысить точность и устойчивость решения обратной задачи за счёт исключения процедуры построения дисперсионных кривых и использования мод высших порядков. Для решения такой задачи целесообразно использовать свёрточные ИНС глубокого обучения, хорошо зарекомендовавшие себя при анализе изображений, для аппроксимации связи между изображением двумерного амплитудного спектра и скоростной модели. Другим перспективным направлением

дальнейшего изучения является разработка алгоритма определения области неоднозначности решения обратной задачи за счёт проекции на пространство скоростных моделей шума, связанного с наличием случайных и регулярных волн-помех и перераспределением энергии между модами поверхностной волны, и ошибок инверсии данных метода MASW, вводимых обратным оператором. Известные способы определения неоднозначности решения обратной задачи требуют её многократного решения. В связи с этим, также целесообразно использовать ИНС за счёт быстрого действия применения подобранных весов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. Методика и результаты исследования физико-механических свойств связных грунтов сейсмическим методом / М.В. Курленя [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 3. – С. 3-10. Переводная версия: Procedure and evidence of seismic research into physical properties of cohesive soils / M.V. Kurlenya [et al.] // Journal of Mining Science. – 2016. – V. 52. – № 3. – P. 417-423.

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

3. 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.

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

5. 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.

Другие значимые публикации и лично доложенные материалы конференций

6. Развитие методов инженерной сейсморазведки на основе данных поверхностных волн [Электронный ресурс] / А.В. Яблоков [и др.] // Инженерная геофизика 2016: тез. докл. 12-й научно-практической конференции и выставки (Анапа, Россия, 25-29 апреля 2016 г.). – Анапа, 2016.

7. Яблоков А.В. Разработка методов малоглубинной сейсморазведки

на основе обработки многокомпонентных данных поверхностных волн / А.В. Яблоков, А.С. Сердюков // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума студентов и молодых учёных им. акад. М.А. Усова (Томск, Россия, 3-7 апреля 2017 г.). – Томск, 2017. – Т. 1. – С. 429-430.

8. Яблоков А.В. Метод автоматизированного извлечения дисперсионных кривых на основе временно-частотного распределения сейсмических данных [Электронный ресурс] / А.В. Яблоков, А.С. Сердюков // Геофизические технологии. – 2018. – № 3. – С. 48-58.

9. The S-transform based Automated Picking of Surface Wave Phase Velocity Dispersion Curves / A. Yablokov [et al.] // 80th EAGE Conference and Exhibition 2018 (Copenhagen, Denmark, 11-14 June 2018). – Copenhagen, 2018. – P. 8-9.

10. Решение обратной задачи метода многоканального анализа поверхностных волн на основе искусственной нейронной сети / А.В. Яблоков [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.). – Новосибирск, 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 191-200.

11. Сердюков А.С. Новые методы цифровой обработки сигналов для определения параметров моделей распространения сейсмических волн / А.С. Сердюков, А.В. Яблоков, Г.С. Чернышов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 233-237.

12. Yablokov A. Inversion of Surface Waves Dispersion Curves Using Artificial Neural Network / A. Yablokov, A. Serdyukov // 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition. European Association of Geoscientists Engineers (Amsterdam, The Netherlands, 8-11 June 2020). – Amsterdam, 2020. – P. 1-5.

13. Яблоков А.В. Сравнение результатов инверсии дисперсионных кривых поверхностных волн на основе искусственных нейронных сетей с подходами локальной и глобальной минимизации / А.В. Яблоков, А.С. Сердюков, Г.Н. Логинов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.). – 2020. – С. 742-750.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 20.01.2022

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 85. Зак. № 205

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3