

На правах рукописи



МОСЯГИН Евгений Вячеславович

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
РЕЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ
В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2024

Работа выполнена в отделе обработки и интерпретации данных сейсморазведки акционерного общества «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», а также в лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук **Георгий Михайлович Митрофанов**, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Официальные оппоненты:

Ампиров Юрий Петрович, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», Профессор кафедры сейсмологии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;

Фатьянов Алексей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН.

Ведущая организация:

ООО «КрасноярскНИПИнефть» – специализированный институт по обработке и интерпретации сейсмических данных на суше, г. Красноярск.

Защита состоится 16 апреля 2024 г. в 10:00 часов на заседании 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 (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные 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/mosyagin2024>

Автореферат разослан 12 марта 2024 г.

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



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – различные способы обработки сейсмических данных на предмет их использования при создании технологии обработки материалов речной сейсморазведки.

Актуальность исследования определяется необходимостью совершенствования способов обработки материалов речного профилирования в силу роста объемов речной сейсморазведки при поисках новых объектов скопления углеводородов в Восточной Сибири в последние годы. Начиная с 2000-х годов начинается новый виток развития речной сейсморазведки, с существенным усложнением методик полевых исследований, по сравнению с применявшимися в 80-х и 90-х годах. Обработка этих сейсмических материалов (по рекам Енисей, Обь, Вах, Лена) выполнялась сотрудниками ОАО «Сибнефтегеофизика» А.П. Сысоевым, А.А. Евдокимовым и др. [Селезнев, Соловьев, Сысоев, 2007; Сысоев, Селезнев и др., 2008]. В публикациях по результатам этих исследований ими отмечаются сложности в обработке, в частности, связанные с кривизной профиля и низким соотношением сигнал/помеха. В последующие годы появляются сейсмические материалы по р. Нижняя Тунгуска с её притоками р. Кочечум и р. Тутончана, по р. Лена (в нижнем течении) и р. Витим, отличающиеся от материалов стандартных наземных исследований криволинейностью профиля, высокой плотностью пунктов возбуждения, нерегулярностью системы наблюдения и очень низким соотношением сигнал/помеха.

В отличие от обработки материалов наземной сейсморазведки, способы и подходы которой постоянно совершенствуются, обработка материалов речной сейсморазведки в силу их малой доступности нуждается в совершенствовании способов выполнения отдельных этапов обработки, таких как: бинирование, деконволюция, подавление волн-помех, регуляризация и др. Как показывает практика, прямой перенос способов обработки материалов наземной сейсморазведки на способы обработки материалов речного профилирования неэффективен и не удовлетворяет современным потребностям науки и производства.

Цель исследования – повысить информативность и достоверность построения сейсмических разрезов по материалам речного профилирования в Восточной Сибири за счет создания технологии их обработки на основе

современных высокотехнологичных средств учета кривизны профиля, подавления помех, деконволюции, поверхностно-согласованной коррекции амплитуд.

Научно-техническая задача – создать технологию обработки данных речной сейсморазведки с учетом специфики материалов речного профилирования и их ключевых отличий от материалов стандартной наземной сейсморазведки: криволинейности профиля, высокой плотности пунктов возбуждения, нерегулярности системы наблюдения и низкого соотношения сигнал/помеха.

Этапы решения задачи:

Анализ известных современных разработок, способов и подходов к выполнению различных этапов обработки сейсмических данных как наземного, так и речного профилирования, выявление их преимуществ, недостатков и ограничений применения.

Анализ методики полевых исследований и используемой аппаратуры, системы наблюдения, амплитудно-частотных характеристик волнового поля, соотношения сигнал/помеха, уровня амплитуд сейсмической записи, наличия регулярных и нерегулярных волн-помех и др.

Выявление ключевых отличий полевых материалов речного профилирования от материалов стандартной наземной сейсморазведки и определение этапов обработки, способы и подходы выполнения которых требуют усовершенствования и адаптации в соответствии с их спецификой.

Анализ известных способов и подходов в обработке и поиск оптимальных для подавления помех, деконволюции, учета искажений амплитуд, устранения нерегулярности и др.

Обработка фрагментов данных речного профилирования стандартным способом и усовершенствованным, сравнительный анализ обработанных данных на предмет повышения качества изображения, увеличения информативности и достоверности, согласно общепринятым в отрасли критериям оценки качества

Формирование полной последовательности этапов обработки (с указанием способов и подходов для выполнения каждого этапа), составляющих технологию обработки материалов речного профилирования.

Оценка эффективности разработанной технологии по результатам анализа волновой картины сейсмограмм и разрезов как на отдельных, так и на конечном этапах обработки.

Фактический материал, программное обеспечение и методы исследования.

Теоретические основы решения задачи:

– Классическая теория обработки цифровых сигналов, включающая преобразование Фурье, теорию прямых и обратных фильтров, метод наименьших квадратов и другие её фундаментальные составляющие, которые используются почти на всех стадиях обработки.

– Теория обработки данных сейсморазведки, включающая фильтрацию сейсмических колебаний, определение скоростей распространения упругих волн, деконволюцию, миграцию сейсмических записей и др.

– Физико-математические и геологические основы сейсмического метода разведки, включающие кинематическую и динамическую теорию распространения сейсмических волн, методы отраженных и преломленных волн.

– Современные сейсмические способы изучения геологических сред – системы наблюдения, технические средства сейсмической разведки, технологии полевых исследований.

– Сопоставление предложенных подходов с известными, сравнительный анализ информативности и достоверности построенных сейсмических разрезов.

Обрабатываемые материалы речного профилирования уникальны своей представительностью. Они зарегистрированы в течение ряда лет, с 2012 по 2019 гг., охватывают районы Восточной Сибири с различными геологическими характеристиками и имеют совокупную протяженность профилей более 3 000 км. Это первичный полевой материал по профилям: р. Нижняя Тунгуска и ее притоки р. Кочечум и р. Тутончаны – 1800 пог. км (2012-2014 гг., ООО «Геофизическая служба», ООО «Богучанская геофизическая экспедиция», ООО «Донгеофизика»), р. Лена в нижнем течении – 1050 пог. км (2018 г., полевая геофизическая экспедиция Научно-производственного предприятия геофизической аппаратуры «Луч») и р. Витим – 170 пог. км (2019 г., полевая геофизическая экспедиция НППГА «Луч»). При выполнении полевых исследований используется

современная аппаратура: пневматические и импульсные сейсмические источники «Пульс-6», «Малыш», «ВЭМ-50», а также регистрирующая аппаратура «Sercel-428», «Байкал», «XZone Fly Lander» с геофонами GS-20DX или GS-One.

Полевые материалы получены в рамках государственных контрактов за счет средств федерального бюджета по заказу «Роснедра»:

– Госконтракт №30 от 12.03.2012 г.: «Региональные сейсмические профили (речные работы) и опытные электроразведочные работы по реке Нижняя Тунгуска с переинтерпретацией сейсмических и скважинных данных на территории южного борта Курейской синеклизы с целью выделения приоритетных нефтегазоперспективных зон для постановки детальных работ»

– Госконтракт №08/16 от 09.09.2016 г.: «Проведение комплексных региональных полевых геофизических работ с целью изучения геологического строения и перспектив нефтегазоносности акватории реки Лена»

– Госконтракт №57 от 11.08.2017 г. «Выявление крупных нефтегазопроисловых объектов на западных склонах Непско-Ботуобинской антеклизы, Присяно-Енисейской синеклизы, Сюгджерской седловины и прилегающих территорий по комплексу геологических, геофизических и гидрогазогеохимических методов»

Для обработки сейсмических данных используется современное программное обеспечение ведущих мировых производителей для геофизической отрасли – Geocluster, Geovation (CGG, Франция), SeisSpace ProMAX (Halliburton, США), TomoPlus (Geotomo, США).

Высокая степень достоверности построенных разрезов подтверждена результатами их геолого-геофизической интерпретации совместно со скважинными данными и другой априорной геологической информацией. Исследования выполнены автором совместно с сотрудниками АО «СНИИГГиМС» и изложены в научно-производственных отчетах и научных публикациях (Смирнов, Ухлова, Мосягин, 2015; Новые данные..., 2017; Ефимов, Мосягин, 2021; Мосягин, Ефимов, 2021; Шапорина, Мосягин и др., 2021).

Защищаемые научные результаты:

На основе теории обработки сейсмических данных создана технология обработки данных речной сейсморазведки по материалам профилей Восточной

Сибири. Помимо этапов обработки, выполняющихся традиционными способами, технология включает ряд усовершенствованных решений, адаптированных к специфике материалов речного профилирования. Полная технологическая последовательность обработки включает следующие этапы:

1. Криволинейное бинирование с выбором оптимальной ширины бина путем её перебора непосредственно в процессе суммирования и дальнейшим сопоставлением построенных изображений на предмет их информативности и качества прослеживания отражающих горизонтов. Подход адаптирован и проверен на практике соискателем.

2. Вычисление и анализ различных атрибутов волнового поля: амплитудно-частотные характеристики, уровень амплитуд и соотношение сигнал/помеха в различных пространственно-временных окнах. Анализ сейсмограмм на предмет наличия визуально различимых типов волн, определение их скоростных и амплитудно-частотных характеристик.

3. Учет верхней части разреза одним из традиционных способов, с использованием головных волн.

4. Подавление нерегулярных высокоамплитудных помех по сейсмограммам общего пункта приема (ОПВ и ОПП) с использованием технологической схемы LIFT для исключения потерь полезных сигналов и более эффективного шумоподавления. Схема адаптирована и проверена на практике соискателем.

5. Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд с использованием помехоустойчивого подхода к оценке амплитуд по разрезам общего пункта возбуждения и приема (ОПВ и ОПП). Дополнительные итерации поверхностно-согласованной коррекции амплитуд могут выполняться на усмотрение обработчика после каждого значимого этапа подавления помех. Подход адаптирован и проверен на практике соискателем.

6. Анализ скоростей суммирования и расчет высокочастотных статических поправок. Выполняется традиционным способом на всем протяжении графа обработки, в последующем не упоминается.

7. Подавление регулярных помех линейного типа (прямой волны и низко- и среднескоростных поверхностных волн-помех) с использованием технологической схемы LIFT (сокр. от *Leading Intelligent Filter Technology* – ведущая технология

интеллектуальной фильтрации) и, при необходимости, уплотнением сейсмических трасс в сейсмограммах для избавления от аляйсинг-эффекта, мешающего эффективной работе алгоритмов подавления волн-помех. Схема адаптирована и проверена на практике соискателем.

8. Деконволюция. Расчет оператора деконволюции выполняется по сейсмограммам п.4. Длина оператора подбирается общепринятым способом по анализу функций автокорреляции. Для выбора оптимального уровня белого шума на небольшом участке данных выполняется его перебор в режиме тестирования, после чего для всех полученных вариантов результата деконволюции рассчитываются атрибуты ширины спектра и соотношения сигнал/помеха. Оптимальный уровень белого шума находится из графика зависимости ширины спектра от соотношения сигнал/помеха. Рассчитанный оператор деконволюции применяется к сейсмограммам после п.3. После подавления основного фона помех оператор деконволюции рассчитывается более корректно, нежели по зашумленным исходным данным. После применения такого оператора к исходным данным полезный сигнал и помеха лучше разделяются, поэтому последние подавляются более эффективно. Схема адаптирована и проверена на практике соискателем.

9. Подавление помех по сейсмограммам после деконволюции (пп. 4,5).

10. Вторая итерация поверхностно-согласованной коррекции амплитуд с использованием помехоустойчивого подхода.

11. Регуляризация сейсмограмм для заполнения пропусков трасс и приведения набора удалений в сейсмограммах ОСТ к регулярному виду. Используются алгоритмы 3D-регуляризации с одновременной интерполяцией трасс по направлениям ОСТ-удаление-время. Схема адаптирована и предложена к применению автором.

12. Подавление кратных волн по сейсмограммам ОСТ. На первом шаге подавление выполняется традиционными способами с использованием алгоритмов кинематической фильтрации. На втором шаге выполняется подавление ревербераций – кратных волн-помех, связанных с переотражением сигнала от дневной поверхности (переотражение волн в слое воды и на контрастных границах ВЧР). Для этого используется известный алгоритм SRME (сокр. от surface-related multiple elimination – подавление кратных волн, связанных с поверхностью),

адаптированный для данных речной сейсморазведки. Адаптация исходных данных для применения SRME включает подавление всех типов волн-помех, т.е. обеспечение высокого соотношения сигнал/помеха на сейсмограммах (пп.4, 5), обязательную регуляризацию (п.9) и исключение длиннопериодной компоненты статических поправок из сейсмограмм. Затем выполняется численное моделирование волнового поля кратных волн и его адаптивное вычитание из исходных сейсмограмм. Подход адаптирован и проверен на практике соискателем.

13. Миграционные преобразования до суммирования с уточнением скоростной модели среды. Выполняются традиционным способом.

14. Коррекция остаточных фазовых сдвигов для полного спрямления годографов отраженных волн перед окончательным суммированием. Выполняется традиционным способом.

15. Окончательное суммирование с подбором оптимальных параметров мьютинга. Выполняется традиционным способом.

Научная новизна результатов. Впервые для материалов речного профилирования в Восточной Сибири создана технология полного цикла обработки данных (от исходных сейсмограмм до построения окончательного разреза), включающая ряд усовершенствованных способов, значительно повышающих эффективность обработки:

– Для учета кривизны профиля выполняется криволинейное бинирование по оптимизированной схеме – длительный по времени интерактивный процесс перебора ширины бина выполняется в автоматическом режиме.

– Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд выполняется с использованием помехоустойчивого подхода к оценке амплитуд по разрезам ОПВ и ОПП.

– Подавление регулярных и нерегулярных волн-помех выполняется по технологии LIFT для исключения потерь полезного сигнала и повышения эффективности шумоподавления.

– Для подавления регулярных волн-помех линейного типа используются приемы избавления от аляйсинг-эффекта путем уплотнения сейсмических трасс в сейсмограммах.

– Деконволюция выполняется по двухшаговой схеме, в которой расчет и применение её оператора разделены. На первом шаге по исходным сейсмограммам выполняется шумоподавление с последующим расчетом оператора деконволюции. На втором – оператор применяется к исходным сейсмограммам, а шумоподавление выполняется заново, уже существенно эффективнее за счет более высокого соотношения сигнал/помеха на сейсмограммах после деконволюции;

– Для подготовки сейсмограмм к подавлению кратных волн методом SRME и миграции до суммирования выполняется регуляризация сейсмограмм ОСТ;

– Для подавления ревербераций, связанных с переотражением волн в слое воды и на контрастных границах в верхней части разреза используется алгоритм SRME, широко распространенный в морской сейсморазведке.

Личный вклад. Автором лично создана технология полного цикла обработки данных (от исходных сейсмограмм до построения окончательного разреза), включающая ряд усовершенствованных и адаптированных для материалов речной сейсморазведки решений, значительно повышающих эффективность обработки:

1. Для учета кривизны профиля используется схема быстрого нахождения оптимального размера ячейки бина.

2. Адаптирован для материалов речной сейсморазведки помехоустойчивый подход к поверхностно-согласованной коррекции амплитуд с использованием разрезов общего пункта приема (ОПП) и общего пункта возбуждения (ОПВ).

3. Для исключения потерь полезного сигнала при подавлении регулярных и нерегулярных волн-помех по материалам речной сейсморазведки адаптирована известная схема LIFT.

4. Адаптирована схема подавления регулярных волн-помех линейного типа с приемом избавления от аляйсинг-эффекта путем уплотнения сейсмических трасс в сейсмограммах.

5. Деконволюция выполняется по двухшаговой схеме, в которой расчет и применение её оператора разделены. Схема адаптирована для материалов речного профилирования.

6. Для устранения последствий существенной нерегулярности системы наблюдения на различных этапах обработки данных применяется регуляризация.

7. Адаптирован для материалов речного профилирования известный из обработки морской сейсморазведки алгоритм SRME для подавления ревербераций, связанных с переотражением волн в слое воды.

Практическая значимость. Создан надежный инструмент для специалистов-обработчиков сейсмических данных на современном уровне – технология обработки материалов речного профилирования, в которой детально описан и научно обоснован каждый шаг. Высокая эффективность технологии следует из сопоставления результатов обработки, выполненной по стандартным и усовершенствованным способам.

С использованием созданной диссертантом технологии выполнена обработка профилей с построением разрезов по р. Нижняя Тунгуска и ее притокам р. Кочечум и р. Тутончаны (1800 пог. км), р. Лена (1050 пог.км) и р. Витим (170 пог. км) (совместно с Харченко Н.Н., Литвиченко Д.И., Недомовным Б.Н., исполнителями отдельных этапов графа обработки). По построенным разрезам значительно уточняется геолого-геофизическое строение территории, что важно при поисках углеводородов. Результаты изложены в научно-производственных отчетах и приняты заказчиком – государством.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на российских и международных конференциях, в том числе «Сейсмические технологии» (Москва, 2015 г.), «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири» (Новосибирск, 2015 г.), «Геомодель» (Геленджик, 2015 г.), «Росгеонефтегаз» (Москва, 2018 г.), «EAGE Marine Technologies» (Геленджик, 2019 г.), «Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами (Красноярск, 2020 г. и 2022 г.).

Часть научных результатов получена в рамках исследования, проводимого при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования России в рамках крупного научного проекта «Социально-экономическое развитие Азиатской России на основе синергии транспортной доступности, системных знаний о природно-ресурсном потенциале, расширяющегося пространства межрегиональных взаимодействий», Соглашение № 075-15-2020-804 от 02 октября 2020 г. (грант № 13.1902.21.0016).

Публикации. По теме диссертации соискателем опубликовано 16 работ. Из них 8 статей в журналах из перечня ВАК, 8 статей в сборниках материалов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 133 источников. Полный объем диссертации 136 страниц, включая 44 рисунка и 2 таблицы.

Благодарности. За научное руководство и помощь на всех этапах подготовки квалификационной работы диссертант глубоко благодарен доктору физико-математических наук Георгию Михайловичу Митрофанову.

Диссертант искренне признателен академику РАН Михаилу Ивановичу Эпову за мотивирование к написанию диссертации и непрекращающийся интерес к ходу исследования.

Отдельно соискатель безгранично благодарен Валентине Илларионовне Самойловой, без помощи и поддержки которой рукопись вряд ли была бы завершена.

Соискатель от всей души благодарит своих коллег Литвиченко Д.А., Харченко Н.Н., Недомовного Б.Н. за помощь при обработке материалов речного профилирования, а также А.С. Ефимова, к.г.-м.н. М.Ю. Смирнова, к.г.-м.н. Г.Д. Ухлову, Келлер Е.Г., к.г.-м.н. М.Н. Шапорину, к.т.н. Е.Ю. Гошко, Д.И. Рудницкую, В.В. Жабина, к. ф.-м. н. А.Н. Ошкина за совместный плодотворный труд при написании научных статей.

Автор глубоко признателен коллегам В.Н. Беспечному и к.г.-м.н. А.Н. Процко за проявленный интерес и ценные советы по ходу исследования. Автор выражает благодарность Селезневу В.С. за высокую оценку результатов обработки материалов речных профилей и Чеверде В.А. за поддержку на этапе подготовки к защите диссертации.

Автор искренне благодарит свою семью и родителей за терпение, неоценимую моральную поддержку, вдохновение и веру в успех. Без их усилий этот путь был бы более тернист и извилист.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, определены научная новизна, практическая значимость и личный вклад автора.

Первая глава «Анализ известных современных методик обработки и ограниченность их применения к данным речных сейсморазведочных работ в Восточной Сибири» посвящена краткому обзору речных сейсморазведочных исследований в Восточной Сибири и в мире, особенностям технологии проведения полевых исследований, различным способам обработки материалов сейсморазведки и ограниченности их применимости для материалов речного профилирования. Исходя из сейсмогеологических особенностей, характерных для Сибирской платформы [Некоторые методические..., 2018; Ефимов, Мосягин, 2021] определены этапы обработки, на которых стандартные подходы, принятые для материалов наземных сейсморазведочных исследований, требуют адаптации и усовершенствования [Мосягин, 2015а; Мосягин, 2015б; Мосягин, Ефимов, 2021].

Специалисты знают, что первичные данные речного профилирования значительно отличаются от данных профилирования на суше. Это связано, прежде всего, с технологией и условиями проведения полевых работ, не характерными для наземных наблюдений. Так, система наблюдения, как правило, обращенная, с высокой плотностью пунктов возбуждения, расстояние между которыми нерегулярно, а зависит от скорости движения судна-источника и его траектории. Криволинейность профиля определяется естественным положением русла реки и требует специального учета ввиду чрезвычайной извилистости восточно-сибирских рек. Трассы ближних удалений преимущественно отсутствуют, так как приемная расстановка располагается на берегу. Первичные сейсмограммы характеризуются высоким уровнем разнообразных шумов, среди которых можно выделить шум от двигателей и гребных винтов, электрические наводки судового оборудования, шумы, связанные с течением воды как самой реки с её перекатами, порогами и шиверами, так и впадающих в нее многочисленных ручьев [Мосягин, Ефимов, 2021]. Перечисленные особенности данных речного профилирования требуют не только адаптации стандартной методики обработки наземных данных, но и новых

подходов и способов выполнения отдельных этапов графа обработки [Мосягин, 2020; Шапорина, Мосягин и др., 2021; Мосягин, Ошкин, 2022].

Вторая глава «Обработка цифровых свтериялов речных профильных сейсмических исследований» посвящена выявлению и систематизации главных особенностей материалов речного профилирования, которые необходимо учитывать при их обработке, а также созданию технологии обработки, в которой отдельные малоэффективные подходы и способы обработки, традиционно применяющиеся для материалов наземных исследований, заменены на более эффективные, учитывающие специфику зарегистрированных при речных наблюдениях волновых полей.

В отличие от стандартных работ МОГТ-2D на суше, где кривизна профиля не позволяет средним точкам значительно отклоняться от линии наблюдения, данные речных работ по сибирским рекам характеризуются отклонением средних точек на 3-5 км от линии возбуждения/приема. Для учета смещения точек отражения на изгибах речных профилей выполняется криволинейное бинирование, при этом используется схема быстрого нахождения его оптимальных параметров, прежде всего ширины бина вкрест линии профиля [Мосягин, 2015б; Рудницкая, Корнилов, Мосягин, 2017; Жабин, Гошко, Мосягин, 2017].

В некоторых случаях, на меандрах, где облако средних точек достаточно рассредоточено, возможно построение двумерной сети бинов, по аналогии с материалами 3D-сейсморазведки. Последующая обработка выполняется с построением кубов данных. Такой эксперимент выполнен на участке профиля в нижнем течении р. Лена с построением куба данных, на котором хорошо просматриваются отраженные от глубоких горизонтов волны [Features of..., 2019], что подтверждает результаты, полученные ранее другими исследователями [Милашин и др., 2010].

При подавлении регулярных и нерегулярных помех в условиях крайне низкого соотношения сигнал/помеха на сейсмограммах речного профилирования возникает необходимость использования различных программ фильтрации. При этом для выделения полезного сигнала требуются более агрессивные настройки этих программ, нежели при работе с менее зашумленными данными стандартных наземных исследований. При такой фильтрации часть амплитуд отраженных волн

иногда теряется, а результат подавления волн-помех выглядит излишне зарегулированным (искусственным). Исследование показывает, что использование известной схемы подавления помех LIFT (сокр. от *Leading Intelligent Filter Technology* – ведущая технология интеллектуальной фильтрации) для сейсмограмм речного профилирования, позволяет выделить часть полезного сигнала, потерянного в результате фильтрации, и вернуть его обратно в данные. Таким образом, даже на значительно зашумленных данных удастся добиться корректного подавления помех с минимальным искажением формы сигнала [Шапорина, Мосягин и др., 2021]. Возможно применение схемы LIFT на этапе фильтрации любых помех: поверхностных волн, нерегулярного шума, кратных волн.

Результаты исследования показывают, что традиционная схема сигнальной обработки сейсмограмм, состоящая из шумоподавления до деконволюции, самой деконволюции и последующего шумоподавления, недостаточно эффективна для зашумленных данных речного профилирования. Причина в слабой результативности подавления помех перед деконволюцией, и, соответственно, самой деконволюции, после чего дальнейшее корректное подавление помех затруднено. Более эффективной оказалась альтернативная схема обработки, при которой расчет и применение оператора деконволюции разделены [Результаты обработки..., 2018; Мосягин, 2020; Мосягин, Ефимов, 2021]. На первом шаге по исходным сейсмограммам выполняется шумоподавление с последующим расчетом оператора деконволюции. На втором – оператор применяется к исходным сейсмограммам, а шумоподавление выполняется заново, уже существенно эффективнее за счет более высокого соотношения сигнал/помеха на сейсмограммах после деконволюции (Рис.1).

Важным и одним из самых сложных этапов обработки считается компенсация динамических искажений, связанных со сложным, резко неоднородным строением верхней части разреза (ВЧР), которое характерно для Восточной Сибири. Стандартный подход учета таких искажений, предлагаемый популярными программными комплексами обработки, предполагает итеративную (на разных этапах обработки) оценку уровня амплитуд по сейсмограммам с последующим расчетом корректирующих множителей за источники и приемники. Такой подход показывает низкую эффективность по данным речного профилирования из-за

наличия на сейсмограммах большого количества помех и, соответственно, малодостоверных оценок полезной сигнальной составляющей. Более того, в ряде случаев после применения стандартного подхода к коррекции амплитуд появляются новые, ранее не наблюдавшиеся аномалии.

Для получения более точных оценок амплитуд сигнала и корректного учета амплитудных вариаций по зашумленным данным речного профилирования рекомендуется использовать альтернативный подход, который можно реализовать в любом современном комплексе для обработки данных [Мосягин, Ошкин, 2022]: использовать для оценки полезного сигнала разрезы общего пункта возбуждения (ОПВ) и приема (ОПП) вместо сейсмограмм [Cary, Nagarajappa, 2013].

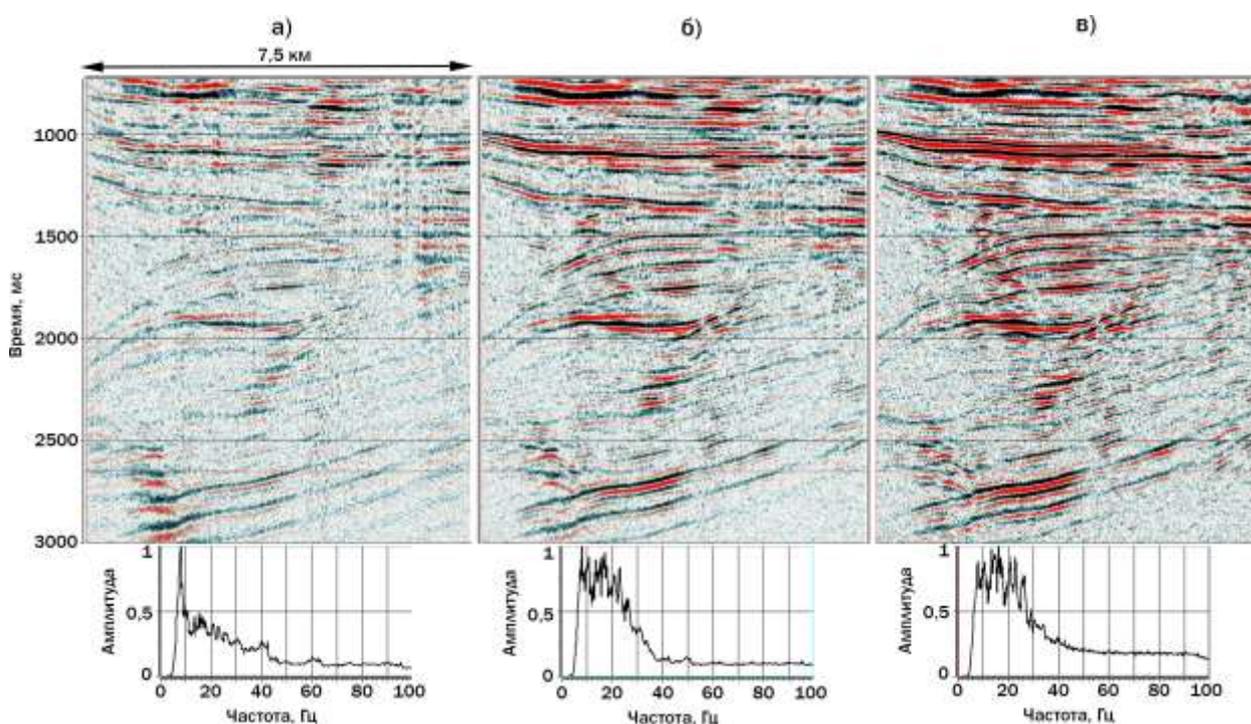


Рисунок 1. Фрагмент временного сейсмического разреза по р. Лена (2018 г.) до деконволюции (а), после шумоподавления и деконволюции традиционным способом (б), после шумоподавления с деконволюцией альтернативным способом (в), а также их АЧХ.

Преимущество суммарных разрезов перед сейсмограммами состоит в том, что за счет суммирования (т.е. синфазного накопления сигналов), они имеют существенно более высокое соотношение сигнал/помеха. Оценка и расчет амплитудных множителей выполняются отдельно и поочередно для разрезов ОПВ и ОПП, в несколько итераций.

Для устранения эффекта реверберации, или многократного переотражения сигнала, которое, как правило, возникает на кровле и подошве слоя воды (или на контрастных границах внутри ВЧР) применяется алгоритм SRME (подавление кратных волн, связанных со свободной поверхностью), который широко используется специалистами при обработке морских данных. В результате применения этого алгоритма при обработке данных профиля в нижнем течении р. Лена, включающего моделирование и адаптивное вычитание кратных волн-помех, волновое поле существенно упрощается за счет удаления (ослабления) ложных осей синфазности [Мосягин, Ефимов, 2021; Шапорина, Мосягин и др., 2021] (Рис.2).

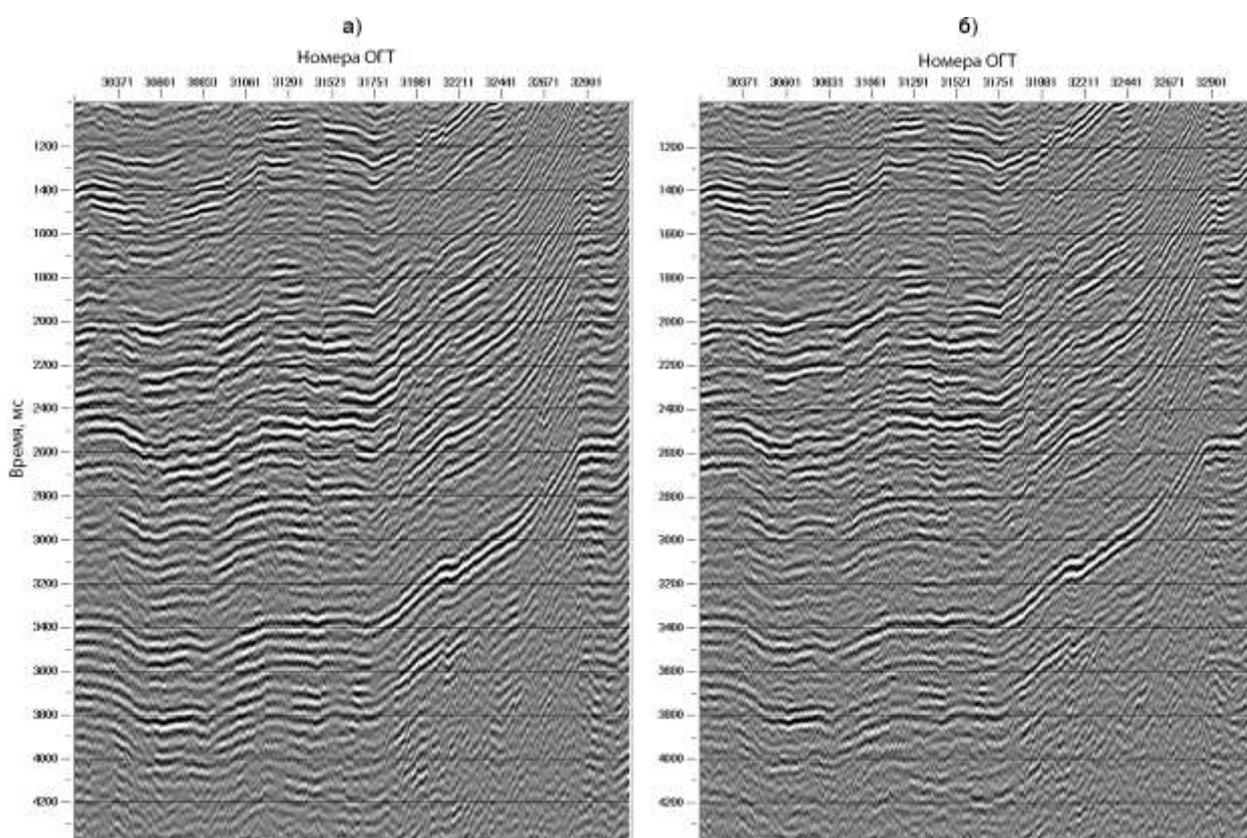


Рисунок 2. Волновое поле разреза по профилю р. Лена в нижнем течении до подавления фона кратных волн-помех процедурой SRME (а) и после подавления (б).

Применяемая при речном профилировании на Восточно-Сибирских реках система наблюдения обуславливает существенную нерегулярность зарегистрированных данных при высокой плотности пунктов возбуждения. С одной стороны, высокая плотность обеспечивает статистический эффект накапливания сигналов и подавления помех [Турчков..., Мосягин и др., 2022]. С

другой стороны, высокая степень нерегулярности создает ряд сложностей при обработке данных. Одна из них – чрезмерное сгущение трасс на некоторых участках профиля, связанное с особенностями движения судна-источника, чего почти никогда не наблюдается при стандартных наземных исследованиях методом МОГТ-2D. Это сопровождается резкими скачками кратности, амплитудными аномалиями на сейсмическом разрезе, а также затрудняет корректное подавление помех по сейсмограммам и выполнение миграции до суммирования. Практика показывает, что наилучший инструмент борьбы с такими эффектами – регуляризация данных, т.е. интерполяция сейсмических трасс на некоторую заданную сетку. Расстояние между трассами рекомендуется выбирать так, чтобы устранить чрезмерное сгущение трасс, но избегая появления большого количества интерполированных трасс. Регуляризация успешно борется со скачками кратности, помещает трассы сейсмограмм ОСТ на регулярную сетку удалений, таким образом, способствуя устранению амплитудных искажений на суммарном сейсмическом разрезе [Мосягин, 2020; Мосягин, Ефимов, 2021].

Для каждого этапа обработки выполняется сопоставление результатов, полученных стандартным и усовершенствованным способом.

В третьей главе «Геологическое строение Восточной Сибири по материалам речного профилирования и их обработки по созданной технологии» представлены результаты геолого-геофизической интерпретации построенных сейсмических разрезов речного профилирования в Восточной Сибири, обработанных по созданной технологии. Эффективность технологии оценивается при сопоставлении со стандартной методикой, традиционно применяющейся при обработке материалов наземных сейсмических исследований в этом регионе (Рис.3). Разрез, построенный по созданной технологии, характеризуется более широким диапазоном частот, лучше прослеживаемостью и сфокусированностью отражающих горизонтов, особенно с крутыми углами наклонов.

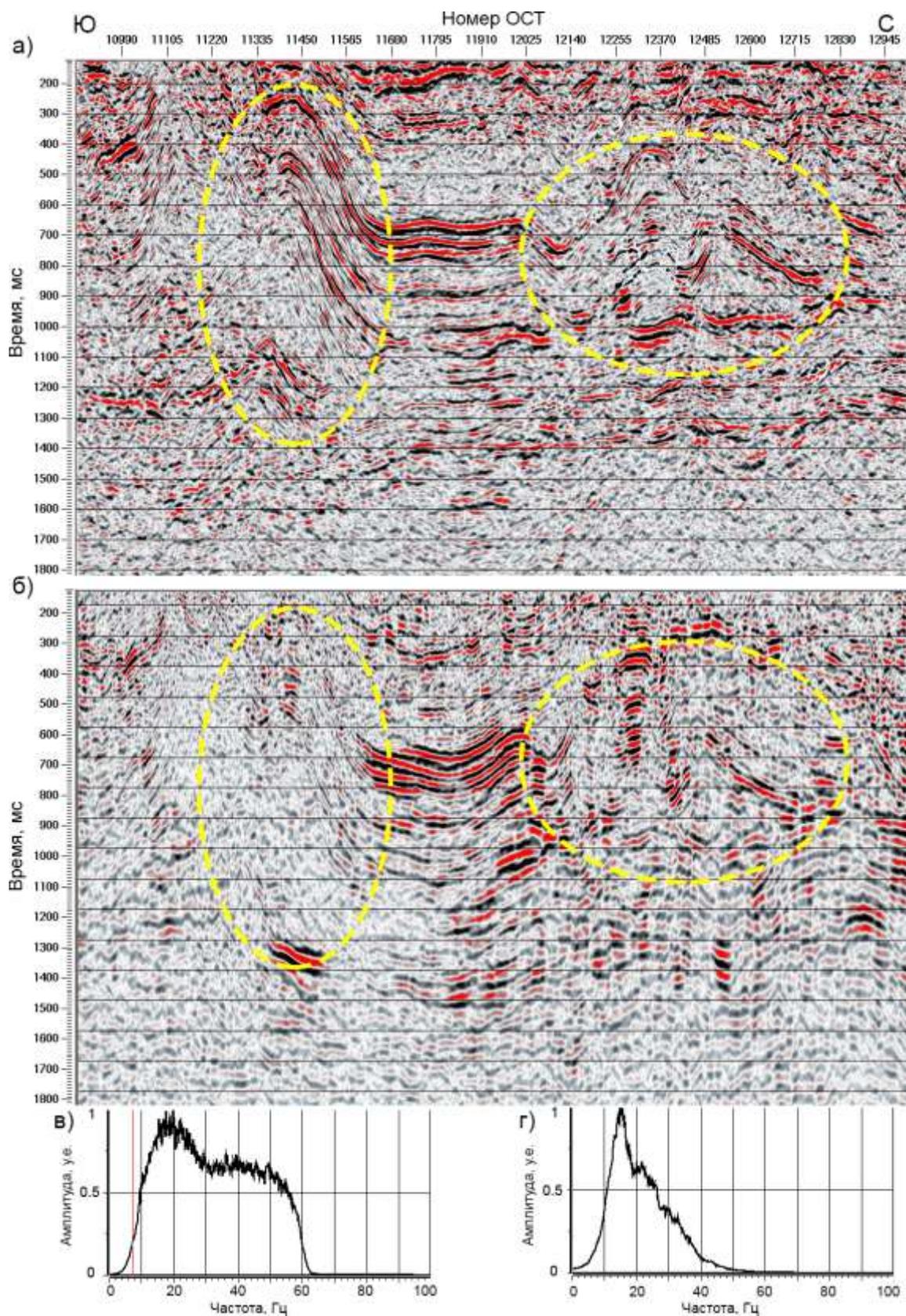


Рисунок 3 – Часть временного сейсмического разреза по профилю р. Витим (2019 г.) после обработки усовершенствованной технологией (а), после обработки стандартным способом (обработка в рамках ГК №57 от 11.08.2017) (б) и соответствующие им АЧХ (в, г).

Обрабатываются материалы трех речных сейсмических профилей, со своими особенностями волновой картины, расположенные в разных частях Сибирской платформы и характеризующих основные типы геологического строения территории: региональный профиль по р. Нижняя Тунгуска и ее притоки р. Кочечум и р. Тутончаны (1800 пог. км), профиль в нижнем течение р. Лена (1050 пог. км) и профиль по р. Витим (170 пог. км) [Смирнов, Уклова, Мосягин, 2015; Ефимов, Смирнов, Мосягин, 2015; Geological Structure..., 2015].

Из сопоставления окончательных временных разрезов, построенных по усовершенствованной технологии, с разрезами, построенными с использованием стандартных методик обработки, следует значительно более высокая информативность первых.

Созданная технология, включающая современные подходы и технологические приемы при выполнении отдельных этапов обработки, универсальна и обеспечивает высокое качество изображения отражающих горизонтов на сейсмических разрезах в различных геологических обстановках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана технология обработки материалов речной сейсморазведки для построения сейсмических разрезов и определения геологического строения на примере Восточной Сибири путем адаптации отдельных этапов обработки наземных данных к особенностям речного профилирования, а также применения современных подходов при их выполнении. Модернизация стандартных способов обработки необходима, прежде всего, в силу различия технологий наземных и речных полевых исследований, а именно систем наблюдения, условий возбуждения и приема сейсмических волн, используемой аппаратуры и др.

Усовершенствованные способы применяются на таких базовых и определяющих этапах обработки как: криволинейное бинирование, деконволюция, подавление регулярных и нерегулярных волн-помех с сохранением полезных сигналов, учет влияния приповерхностных условий на амплитуды полезных волн, вычитание кратных волн, регуляризация. Например, оптимизирован подбор оптимальной ширины бина при учете кривизны профиля, при подавлении регулярных волн помех используются преимущества высокоплотной системы

наблюдения речного профилирования, а технологические схемы выполнения деконволюции, компенсации амплитудных аномалий ВЧР и подавления различных видов помех оптимизированы для эффективной работы с зашумленными данными.

Применение адаптированных для материалов речного профилирования способов и приемов обработки значительно повышает эффективность результатов обработки, что выражается в более четких изображениях среды в широком диапазоне частот и минимизации влияния аномалий ВЧР на амплитуды полезных волн. Временные сейсмические разрезы, построенные с использованием разработанной технологии, характеризуются высокой степенью информативности и уверенной прослеживаемостью отражающих горизонтов в широком спектре различных геологических условий. Например, имеющиеся архивные сейсмические разрезы вдоль р. Нижняя Тунгуска значительно уступают построенному по разработанной технологии разрезу речного профилирования по четкости прослеживания отражающих горизонтов. А степень детальности волнового поля разреза по р. Витим значительно выше разреза по пересекающему его региональному профилю «Батолит» и при этом уверенно подтверждается геологической картой в своей верхней части.

При геолого-геофизической интерпретации построенных сейсмических разрезов по профилям р. Нижняя Тунгуска, р. Лена, р. Витим получены новые надежные данные о строении территорий исследования, прежде слабо изученных сейсморазведкой. По сейсмическому разрезу профиля по р. Нижняя Тунгуска на всем его протяжении прослежены и закартированы основные горизонты венд-кембрия. Детально изучено сложное тектоническое строение западной части профиля, которое характеризуется многочисленными надвигами. В том числе, в интервале рифейских отражений впервые выделены сейсмические аномалии типа «риф», ранее не отмечавшееся на этой территории. По сейсмическому разрезу профиля по р. Лена значительно уточнено строение Предверхожанского прогиба, в частности расположение и конфигурация Кютингдинского грабена, а также выделены более мелкие грабенообразные структуры. При этом что построенные по протяженным речным профилям разрезы стали опорными для своих территорий и структурной основой для планирования дальнейших геолого-разведочных исследований.

Предложенная технология или отдельные ее элементы, рекомендуются использовать при дальнейших сейсмических исследованиях по рекам Восточной Сибири а также в других регионах, как Российской федерации, так и за ее пределами. К тому же, описанные приемы обработки зашумленных данных высокой плотности могут использоваться и при обработке наземных данных, например при сейсмических съемках 2D/3D, полученных с использованием полевой технологии высокоплотного возбуждения сигналов (без накапливания сигнала на точке воздействия).

Необходимо отметить, что ряд вопросов обработки в настоящем исследовании не затронут либо недостаточно проработан ввиду их обширности и сложности. Например, отдельно не рассматриваются вопросы построения точных глубинно-скоростных моделей верхней части разреза и компенсации влияния скоростных аномалий, что является нетривиальной задачей в условиях криволинейности профиля и отсутствия части ближних удалений. Дальнейшие исследования требуют сосредоточиться на разработке современных алгоритмов и способов качественного подавления помех, учету криволинейности профиля, в частности так называемого crossdip-эффекта, а также миграции непрямолинейных профилей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК

1. Ефимов А.С. Анализ и совершенствование методов поисковой сейсморазведки в Восточной Сибири /А.С. Ефимов, **Е.В. Мосягин** // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – №1. – С. 56-73.
2. Жабин, В.В. Региональный геологический разрез по линии геофизического профиля 1-СБ (Восточное Забайкалье, Восточный участок) / В. В. Жабин, Е. Ю. Гошко, Е. В. Мосягин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 4. – С. 11-22.
3. **Мосягин Е.В.** О речной сейсморазведке: история, опыт применения, возможности на современном этапе исследований Сибирской платформы /Е.В. Мосягин, А.С. Ефимов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – №3. – С. 48-60.

4. Некоторые методические особенности применения геофизического комплекса при изучении геологического строения Восточно-Сибирского региона / М.Ю. Смирнов, Г.Д. Ухлова, **Е.В. Мосягин** [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2018. – №2. – С. 65-76.
5. Новые данные о строении Туруханской зоны дислокаций на основе комплексной интерпретации речных сейсморазведочных работ и геологических маршрутов / А.С. Ефимов, М.Ю. Смирнов, **Е.В. Мосягин** [и др.] // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 3-4. – С. 553-564.
6. Рудницкая, Д. И. Технология и результаты сеймотектонического анализа при выделении и оценке кинематики глубинных разломов земной коры (на примере геотраверса 1-СБ в Забайкалье) / Д. И. Рудницкая, М. В. Корнилов, **Е. В. Мосягин** // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 6. – С. 147-155.
7. Турчков А.М., Ошкин А.Н., Детков В.И., **Мосягин Е.В.**, Воронцов В.В. Опыт применения высокопроизводительного способа получения сейсмических данных в районе действующих рудников ПАО «Норильский Никель» / Приборы и системы разведочной геофизики. – 2022. – №1(72). – С. 32-39.
8. Шапорина М.Н., Геолого-геофизическое строение Предверхожанского краевого прогиба и прилегающих территорий по данным нового сейсморазведочного речного профиля МОГТ-2D и переинтерпретации архивных материалов. / М.Н. Шапорина, **Е.В. Мосягин**, О.Г. Садур, В.Н. Беспечный // Геология нефти и газа. – 2021. – №3. – С. 55-72.

Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций

1. **Мосягин, Е.В.** Возможности современной переработки архивных сейсмических материалов в Восточной Сибири / Е.В. Мосягин // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии 2015» (Москва, 13-15 апреля 2015 г.): тез. докл. – М., 2015а.
2. **Мосягин, Е.В.** Особенности обработки данных речных сейсморазведочных работ МОГТ 2D / Е.В. Мосягин // 2-я научно-практическая конференция «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири» (Новосибирск, 21-24 апреля 2015 г.): тез. докл. – Новосибирск, 2015б. – Т. 2. – С. 83-84.
3. **Мосягин Е.В.** Возможности речной сейсморазведки на современном этапе исследований Сибирской платформы // Материалы научно-практической

- конференции «Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами» (Красноярск, 13-16 октября 2020 г.). – Красноярск. – 2020. – С. 5-10.
4. **Мосягин Е.В.** Опыт применения уплотнённой съёмки МОГТ-3D для поисков и локализации объектов рифового типа / Е.В. Мосягин, А.Н. Ошкин // Материалы научно-практической конференции «Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами» (Красноярск, 08-11 ноября 2022 г.). – Красноярск. – 2022. – С. 5-10.
 5. Результаты обработки и интерпретации геолого-геофизических данных в зоне развития кембрийского рифогенного барьера на севере Сибирской платформы / **Е.В. Мосягин** [и др.] // Конференция «Росгеонефтегаз-2018» (Москва, 22-24 мая 2018 г.): тез. докл. – М., 2018. – С. 123-127.
 6. Смирнов, М.Ю. Новый сейсмический речной профиль в системе региональной сети каркасных профилей Восточной Сибири / М.Ю. Смирнов, Г.Д. Ухлова, **Е.В. Мосягин** // Природные ресурсы Красноярского края. – 2015. – № 25. – С. 28-30.
 7. Features of the Technology of River Seismic Exploration / Seleznev V., Liseikin A., Bryksin A., Babushkin S., Sysoev A., **Mosyagin E.** and D. Krechetov // EAGE, Marine Technologies 2019, (Gelendzhik, 22-26 Apr 2019). – Gelendzhik. – 2019. – P. 1-11.
 8. Geological Structure of the Turukhan Zone of Dislocations Based on Interpretation of Seismic Data Acquired at the Survey / E. Keller..., **E. Mosyagin** // EAGE, Geomodel 2015, (Gelendzhik, 09-14 September 2015). – Gelendzhik. – 2015. – P. 1-5.