

На правах рукописи



Гафаров Радий Марсович

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ДОСТОВЕРНОСТИ
ПОЛЕВЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Научный руководитель: **Шумилов Александр Владимирович**,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой геофизики ПГНИУ, г. Пермь

Официальные оппоненты: **Кузнецов Владислав Иванович**,
доктор геолого-минералогических наук, профессор
ВАК, профессор кафедры прикладной геофизики
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Санфиоров Игорь Александрович
доктор технических наук, профессор, директор
«Горного института Уральского отделения Российской
академии наук» - филиала Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Пермь

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Специальные геофизические системы данных» (ООО «НПП «Спецгеофизика»), г. Москва

Защита диссертации состоится 05 декабря 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета www.psu.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах направлять по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, ПГНИУ, ученому секретарю диссертационного совета П.А. Красильникову.

Е-mail: dissovet.geol@gmail.com , тел: +7 902 646 06 59.

Автореферат разослан « ____ » октября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент



П.А. Красильников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сейсморазведка является одним из основных методов поиска месторождений углеводородов. Переход к выявлению небольших по размерам сложнопостроенных ловушек с тонкими коллекторами потребовал повышения детальности исследований и усложнения технологии наблюдений. Для построения более достоверной модели месторождения при интерпретации сейсмических материалов стали широко использоваться динамические характеристики отраженных волн, предъявляющие высокие требования к качеству регистрации. Удовлетворение растущих требований к точности и качеству полевых материалов, обеспечение высокой производительности и экономической эффективности работ невозможно без постоянного совершенствования технологии работ и тотального контроля качества производства работ.

Санкции западных стран ограничивают доступ к передовым технологиям и делают актуальным развитие импортозамещающих технологий производства работ.

Ужесточение природоохранного законодательства, необходимость обеспечения качества поисково-разведочных работ в сложных природно-климатических и орографических условиях, в районах с развитой инфраструктурой и на труднодоступных участках вызывают необходимость внедрения новых систем регистрации без кабеля и новых телеметрических систем сбора информации.

Полевой контроль качества сейсморазведочных работ сейчас основан на анализе ограниченного числа параметров только с точки зрения удовлетворения требований заказчика к заданному допустимому пределу их изменения. Это не обеспечивает полноценного контроля технологии производства сейсморазведочных работ, своевременного выявления и устранения причин потери качества, выявления и устранения узких мест в технологии выполнения работ, сдерживающих их производительность.

Степень разработанности

Несмотря на существование различных методик в сейсморазведке до сих пор острой проблемой остается изучение параметров зоны малых скоростей с использованием полевых исследований. В данной области, в разные годы занимались В.И. Бондарев, С.Г. Бычков, С.М. Крылатков, В.М. Кузнецов, И.Ю. Митюнина, И.В. Огородова, Б.А. Спасский, А.К. Урупов, Г.А. Шехтман, А.В. Шумилов.

Применение высокопроизводительных методик с вибрационными источниками создало проблему удаления корреляционных помех от одновременной работы нескольких групп вибраторов. Для решения данной проблемы пока используются зарубежные технологии, но в её решение также внесли ощутимый вклад российские учёные: А.П. Жуков, С.В. Колесов, А.В. Череповский, М.Б. Шнеерсон.

Вопросам контроля качества полевых работ в своё время уделяли внимание А.В. Белоусов, А.М. Блюменцев, И.Л. Дагаев, В.И. Ефимов, В.И. Кузнецов,

И.А. Санфиров, А.И. Тищенко, А.В. Череповский, М.Б. Шнеерсон. В настоящее время реализован только полевой контроль качества полевых работ в процессе их выполнения. Второй уровень контроля качества полевых работ (со стороны головного офиса исполнителя) практически отсутствует. Общепринятая методика контроля качества отсутствует. Анализ данных прошлых лет по контролю качества затруднен.

Цель работы

Повышение качества сейсмических данных и эффективности производства полевых сейсморазведочных работ на основе усовершенствования их технологии, методики контроля качества и двойного уровня мониторинга выполнения работ.

Основные задачи исследований

1. Анализ современного состояния технологии и контроля качества полевых сейсморазведочных работ.

2. Разработка метода прямого микросейсмокаротажа в шнековой колонне на основе комплексирования особенностей МСК и МПВ для повышения точности изучения зоны малых скоростей.

3. Исследование возможности применения новых технических решений для повышения качества и производительности сейсморазведочных работ в российских условиях (гидропневматического источника, бескабельных сейсморегистрирующих систем и гибридных телеметрических систем сбора сейсмической информации).

4. Разработка отечественной методики подавления помех и повышения качества вибрационных работ по высокопроизводительной методике Slip-sweep на основе следящей фильтрации виброграмм.

5. Разработка системы контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ, обеспечивающей сбор, хранение и анализ полной информации о производстве работ, двойной уровень непрерывного контроля работ и использование полученной информации при планировании будущих работ.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных задач выполнены теоретические и модельные исследования, проведен анализ опубликованных данных, выполнены экспериментальные работы, обобщены результаты полевых производственных и опытно-методических исследований. Проведен комплексный анализ параметров, извлекаемых из полевого оборудования. Выполнено обобщение геологических и геофизических данных, результатов микросейсмического каротажа, материалов наземной сейсморазведки.

Научная новизна

1. Впервые в практике сейсморазведки для повышения точности определения параметров зоны малых скоростей предложен метод, основанный на комплексировании прямого МСК в шнековой колонне и метода преломленных волн.

2. Впервые разработан метод удаления гармонических помех от одновременной работы нескольких групп вибраторов, основанный на

фильтрации виброграмм с изменяющимися во времени граничными частотами (следящей фильтрации).

3. Разработана система контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ, включающая базу оперативно пополняемых данных о всех параметрах полевых работ и систему прикладных программ, автоматизирующих процесс систематизации информации и позволяющих оперативно извлекать огромный объем информации в удобном для анализа виде, впервые обеспечивающая двойной уровень контроля (в полевой партии и в головном офисе).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что обоснованы и смоделированы новый метод изучения зоны малых скоростей и новый метод обработки виброграмм при проведении работ по высокопроизводительной методике Slip-sweep. Разработан новый двухуровневый подход к контролю первичных полевых сейсмических данных, включающий более полный набор параметров, характеризующих процесс полевых работ. Обосновано, что полученная база данных является базисом для будущего применения искусственного интеллекта при планировании и поиске оптимального пути обработки площади.

Практическая значимость подтверждается тем, что:

- разработанная соискателем методика изучения зоны малых скоростей на протяжении трёх полевых сезонов успешно применяется на лицензионных участках ПАО «ЛУКОЙЛ»;

- разработанный метод очистки виброграмм путем следящей фильтрации не требует дополнительного оборудования, сокращает время обработки и используется при работах по высокопроизводительной методике Slip-sweep на участках ПАО «АНК «Башнефть»;

- разработанная система контроля качества и мониторинга полевых работ применяется в АО «Башнефтегеофизика» в течение пяти лет, в результате чего достигнуто существенное повышение качества материалов, рост производительности и экономической эффективности работ;

- обеспечено эффективное внедрение на объектах АО «Башнефтегеофизика» бескабельных систем регистрации и гибридной телеметрической системы Sercel-508XT.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод изучения зоны малых скоростей на основе комплексирования прямого МСК в шнековой колонне и метода преломленных волн позволяет повысить точность определения параметров зоны за счет плотного прижатия зонда с сейсмоприемником к стенке буровой колонны и использования двух дополнительных критериев – минимального времени вступлений и смены фазы первой волны на подошве ЗМС, сокращает время работ на скважине, затраты на проведение работ и обеспечивает безопасность работ.

2. Метод удаления гармонических помех на основе следящей фильтрации позволяет эффективно проводить очистку виброграмм от помех соседних пунктов возбуждения как раннего, так и позднего включения, дополнительно подавляет микросейсмы и промышленные шумы, выходящие за границы

частотного диапазона фильтра, сокращает время обработки и успешно заменяет импортную технологию.

3. Система контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ позволяет использовать полный объем информации о полевых работах, проводить двухуровневый контроль качества сейсмических материалов, оперативно выявлять причины ухудшения качества и производительности работ и обеспечивает переход на более высокий уровень контроля полевых сейсморазведочных работ.

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность научных выводов и практических рекомендаций, изложенных в работе, базируется на использовании теоретических и методических положений, сформулированных в работах российских и зарубежных ученых, применении широко апробированных, а также оригинальных методов и методик экспериментальных и теоретических исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечивается анализом большого объема производственных работ, результатами специально выполненных экспериментальных работ, привлечением опыта отечественных и зарубежных специалистов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих 7 научных форумах: 14-й конференции EAGE «Геомодель-2012» (Геленджик, 10–14 сентября 2012 г., 2 доклада); конференции «Тюмень 2013» (Тюмень, 25–29 марта 2013 г.); международной 75-й конференции и выставке EAGE, совместно с SPE EUROPEC (Великобритания, Лондон, 10–13 июня 2013 г.); 20-й юбилейной конференции EAGE «Геомодель-2018» (Геленджик, 10–14 сентября 2018 г., 2 доклада); конференции «Геомодель-2022» (Геленджик, 5–8 сентября 2022 г.); 25-й юбилейной конференции «Геомодель-2023» (Геленджик, 8–11 сентября 2023 г., 3 доклада); 3-й международной научно-практической конференции «ПроГРРесс'23» (Сочи, 23–25 октября 2023 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 20 печатных трудах в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ. Получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 121 наименования, содержит 161 страницу текста, в том числе 71 рисунок, 4 таблицы и 3 приложения.

Личный вклад автора. Автором разработан метод определения параметров зоны малых скоростей, основанный на комплексировании прямого микросейсмического каротажа внутри шнековой колонны и метода преломленных волн.

Создан метод удаления корреляционных помех от одновременной работы нескольких групп вибраторов, основанный на фильтрации виброграмм с изменяющимися во времени граничными частотами.

Впервые предложена система контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ, обеспечивающая двойной уровень контроля в полевых и камеральных условиях.

В основу диссертации положены результаты многолетних исследований в АО «Башнефтегеофизика», обобщение результатов экспериментальных работ и практической реализации предложенных решений при проведении сейсмической разведки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и защищаемые положения, приведена практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние технологии и контроля качества полевых сейсморазведочных работ. Качество, производительность и экономическая эффективность производства полевых сейсморазведочных работ определяются выбранной системой наблюдений (повышением плотности и обеспечением высокой кратности 2D и 3D съемок), точностью изучения верхней части разреза, точностью выноса в натуру проектных пикетов системы наблюдений, системой сбора и регистрации сейсмической информации (улучшением характеристик сейсмоприемников, повышением канальности телеметрических систем и совершенствованием способов передачи данных), способом возбуждения колебаний и системой контроля качества выполнения работ. Непрерывное совершенствование этих составляющих определяет достигнутый уровень технологии сейсморазведочных работ.

Традиционными методами изучения ЗМС являются сейсмические методы: прямой и обращенный микросейсмокаротаж (МСК) и метод преломленных волн (МПВ). Одним из путей получения более точных данных о строении зоны малых скоростей и снижения стоимости работ при шнековом бурении взрывных скважин и скважин для МСК может быть комплексирование МСК и метода преломленных волн.

На сегодняшний день подавляющее большинство систем сбора сейсмической информации являются кабельными. Для обеспечения бесперебойной передачи данных при сложных конфигурациях площадной приёмной расстановки используется многомаршрутная кабельная телеметрия. Гибридная система регистрации является на сегодняшний день самой совершенной и в принципе позволяет существенно увеличить производительность и качество сейсморазведочных работ за счет снижения зависимости от условий местности и применения технологий, которые ранее считались экономически нецелесообразными.

Значительная часть сейсморазведочных работ в настоящее время выполняется вибрационными источниками возбуждения. Активно применяется высокопроизводительная конвейерная методика вибрационной сейсморазведки Slip-sweep. Одновременная работа нескольких групп вибраторов влечет за собой наложение помех от соседних работающих групп, которые сопоставимы по амплитуде с излучаемым сигналом. Для их подавления используются зарубежные методы. Необходимость снижения зависимости от иностранных компаний вызывает целесообразность разработки эффективного отечественного

способа подавления помех, возникающих при одновременной работе нескольких групп вибраторов.

Общепринятая методика контроля качества полевых материалов отсутствует, применяемая методика зависит от требований конкретного заказчика. Анализ данных прошлых лет затрудняется применением в разных комплексах программ разных внутренних форматов данных, разным набором параметров, часть которых мало полезна для практического усовершенствования методики полевых работ, разными подходами к оценке некоторых параметров, субъективностью оценки коэффициента качества. Второй уровень контроля качества полевых работ (со стороны головного офиса исполнителя) практически отсутствует. Поэтому существующая система контроля качества материалов полевых сейсморазведочных работ нуждается в совершенствовании.

В связи с отмеченным диссертационные исследования были направлены на решение следующих задач:

1. Анализ современного состояния технологии и контроля качества полевых сейсморазведочных работ.
2. Разработка метода прямого микросейсмокаротажа в шнековой колонне на основе комплексирования особенностей МСК и МПВ для повышения точности изучения зоны малых скоростей.
3. Исследование возможности применения новых технических решений для повышения качества и производительности сейсморазведочных работ в российских условиях (гидропневматического источника, бескабельных сейсморегистрирующих систем и гибридных телеметрических систем сбора сейсмической информации).
4. Разработка отечественной методики подавления помех и повышения качества вибрационных работ по высокопроизводительной методике Slip-sweep на основе следящей фильтрации виброграмм.
5. Разработка системы контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ, обеспечивающей сбор, хранение и анализ полной информации о производстве работ, двойной уровень непрерывного контроля работ и использование полученной информации при планировании будущих работ.

Во **второй главе** обосновывается первое защищаемое положение. На сегодняшний день основными методами изучения ЗМС являются сейсмические методы: прямой и обращенный микросейсмокартаж (МСК) и метод преломленных волн (МПВ).

Наиболее часто применяется обращенный МСК, так как по сравнению с другими методами он обладает большей достоверностью определения глубины подошвы ЗМС и скоростей в зоне и под зоной. Однако метод требует больших затрат из-за использования бурения и недостаточно эффективен, поскольку косичка с детонаторами не всегда опускается в натянутом виде, шаговое расстояние между детонаторами изменяется, что приводит к погрешности в измерениях.

Из-за высоких временных и материальных затрат на обсадку скважины, значительных расходов на проведение работ и высокого риска потери сейсмоприемников в настоящее время метод прямого МСК перестал использоваться практически во всём мире.

В методе МПВ наблюдения выполняются только на поверхности земли. Возбуждение осуществляется импульсным поверхностным источником, а приём - специальной расстановкой с переменным шагом между сейсмоприёмниками. Главный недостаток, перекрывающий все достоинства метода, – низкая точность результатов, которые дополнительно зависят от качества разметки приёмного оборудования, поверхностных условий и пересечённости рельефа.

Для повышения точности изучения зоны малых скоростей, а также повышения эффективности и безопасности проводимых исследований разработан метод прямого микросейсмокаротажа в шнековой колонне на основе комплексирования особенностей МСК и МПВ.

В последние годы большой объем бурения взрывных скважин и скважин МСК производится с использованием полых шнеков, так как в болотистой местности зарядка скважин осложнена из-за напорных плывунов. Автором предложено использовать полую шнековую буровую колонну в качестве обсадной трубы, в которую легко погружается сейсмический зонд. На основе известных технических решений, применяемых в скважинной сейсмической аппаратуре для ВСП, разработан более простой по конструкции скважинный сейсмический зонд для МСК в шнековой колонне, который имеет электромеханическое прижимное устройство, диаметр 36 мм, длину 480 мм, для регистрации колебаний установлены три сейсмоприёмника GS-20DX.

В отличие от традиционного прямого МСК источник удаляется от устья скважины на расстояние, обеспечивающее образования головной волны на подошве ЗМС, которое определяется условием

$$\alpha = \arctg (L_{min} / h_{ЗМС}) = \arcsin (V_1 / V_2),$$

где L_{min} – минимальное удаление источника от устья скважины; $h_{ЗМС}$ – глубина подошвы ЗМС, V_1 и V_2 – скорости в ЗМС и в подстилающем слое. Это устраняет влияние волн, распространяющихся по обсадной колонне (их энергия ослабевает с удалением источника). Данный метод ничем, кроме выноса, не отличается от МСК, позволяет определять скоростные характеристики разреза после ввода поправки в наблюдаемые времена за вынос ПВ и также выявлять подошву ЗМС по резкому возрастанию скорости.

Появление головной волны представляет два дополнительных критерия, повышающих точность определения глубины подошвы ЗМС (рисунок 1). Первый критерий состоит в том, что, распространяясь вдоль подошвы ЗМС со скоростью V_2 , головная волна первой из всех образовавшихся волн достигает ствола скважины, поэтому на полученной сейсмограмме МСК трасса с минимальным временем вступления указывает на глубину подошвы ЗМС. Вторым критерием состоит в том, что к сейсмоприёмникам в скважине, расположенным над ЗМС, первой приходит головная волна, отражённая от подошвы ЗМС в направлении *снизу-вверх*, которая имеет отрицательную кажущуюся скорость. А к сейсмоприёмникам, находящимся под ЗМС, первой приходит преломленная волна, распространяющаяся в направлении *сверху-вниз* и имеющая положительную кажущуюся скорость. Таким образом, на вертикальной компоненте в зоне и под зоной сигнал приходит в противофазе, смена полярности первых вступлений является однозначным критерием определения глубины подошвы ЗМС.

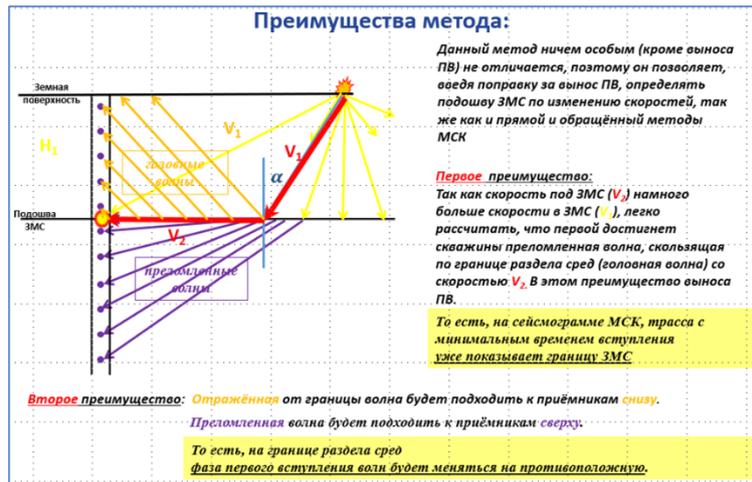


Рисунок 1- Преимущества комплексирования прямого МСК в шнековой колонне и МПВ

Результатами моделирования и большого объема экспериментальных работ доказано, что использование головных волн и применение отмеченных критериев существенно повышает надежность выявления и точность определения глубины подошвы зоны малых скоростей. На рисунке 2 приведено сравнение результатов обращенного МСК и прямого МСК в шнековой колонне. Положение подошвы ЗМС по обоим методам совпадает (7 м), скорости на подошве ЗМС и в подстилающем слое близки. Следует отметить, что на результатах обращенного МСК в области подошвы ЗМС отсутствует резкое нарастание скорости, подошва ЗМС отбита по плавному достижению скорости 1200 м/с, соответствующей предполагаемому значению в подстилающем слое на данной площади. Таким образом, в обращенном МСК использование только скорости иногда затрудняет определение подошвы ЗМС и может привести к значительным погрешностям.

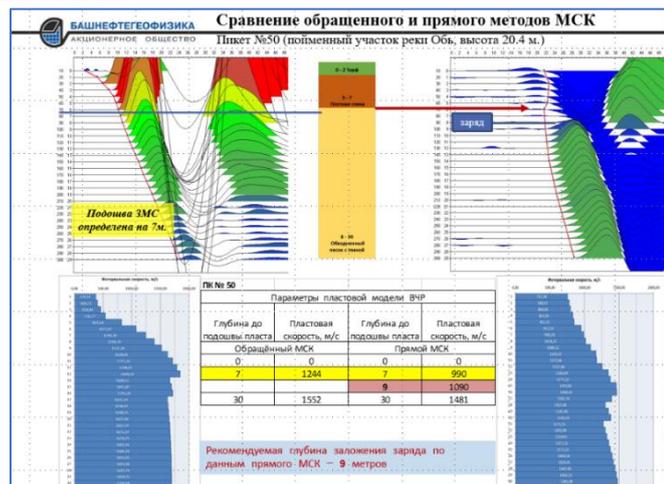


Рисунок 2 - Сравнение результатов обращенного МСК и прямого МСК в шнековой колонне

Предложенный метод обеспечивает следующие дополнительные преимущества. Плотное прижатие зонда с сейсмоприемником к стенке буровой колонны позволяет снизить влияние шумов и обеспечивает повторяемость формы записи, а спуск скважинного зонда в полость буровой колонны сразу же

по окончании бурения значительно сокращает время работ на скважине. Использование буровой колонны в качестве обсадных труб сокращает затраты на проведение работ и обеспечивает безопасность используемых технических средств. Возможность применения поверхностного невзрывного источника исключает случаи травматизма и смертельные случаи, нередко сопровождающие взрывные работы.

Таким образом, изучение ВЧР методом прямого МСК в комплексе с МПВ позволяет своевременно и с минимальными затратами корректировать оптимальную глубину возбуждения и повысить качество полевых материалов.

В третьей главе рассмотрены результаты исследования возможности применения новых технических решений для повышения качества и производительности сейсморазведочных работ в российских условиях.

Исследована возможность применения поверхностного импульсного гидропневматического источника ГПИ-2 (ООО «ИМПАЛССЕЙС»), имеющего все шансы занять свою нишу в линейке поверхностных импульсных источников при проведении полевых сейсморазведочных работ. Источник ГПИ-2 сравнивался с широко используемыми в сейсморазведке поверхностными невзрывными источниками: импульсным электромеханическим КЭМ-4 («ГЕОТЕК Сейсморазведка») и вибрационным NOMAD-65 (Sercel, Франция). Выполнено сравнение интенсивности источников и получаемых волновых полей как при выполнении работ методом наземной сейсморазведки, так и при вертикальном сейсмическом профилировании.

Показано, что у источника ГПИ-2 хорошие перспективы внедрения в практику сейсморазведочных работ. Он незначительно проигрывает вибрационному источнику NOMAD-65 по отношению сигнал/шум, динамической выраженности и прослеживаемости отражений, но обладает преимуществами импульсного возбуждения и обеспечивает глубинность исследования до 2 км. По сравнению с импульсным источником КЭМ-4 источник ГПИ-2 является более мощным (в 1,5 – 2 раза) и обеспечивает получение более качественных временных разрезов (рисунок 3).

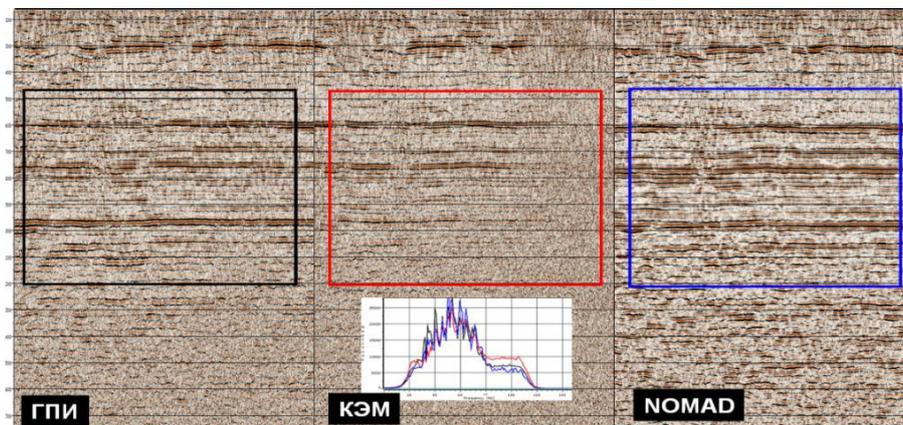


Рисунок 3 - Сопоставление временных разрезов МОГТ-2D и амплитудных спектров для источников ГПИ-2, КЭМ-4 и NOMAD-65 (выполнена нормировка амплитуд)

Исследованы возможности и впервые в отечественной практике внедрены в производство бескабельные системы регистрации, дающие возможность установки

оборудования в труднодоступных местах и сохранения от вырубки значительных лесных массивов, а также обеспечивающие повышение производительности и качества при работах в эксклюзивных зонах. Преследовались две цели: исследование различных систем сбора данных с автономных блоков и исследование различных способов приема колебаний. В первом случае одновременному исследованию подверглись две системы – «слепая» GSR производства «OYO Geospace» (США) и «полуслепая» Unite производства «Sercel» (Франция), которые сопоставлены с кабельной системой FDU («Sercel»). Во втором случае исследовались группирование сейсмоприемников GS-20DX и прием одиночным высокочувствительным сейсмоприемником GS-1.

Исследованы возможности и внедрена в производство новейшая модификация гибридной полевой телеметрической сейсмической системы Sercel-508XT, которая способна выполнять регистрацию в рамках любой методики полевых работ до миллиона каналов. Исследование проведено в рамках 3D-проекта в сложных условиях труднодоступной горно-лесистой местности Урала на юге Башкирии путем сравнения с системой SN 428XL. Выявлены основные технические преимущества и некоторые недостатки системы Sercel-508XT. Так, система Sercel-508XT обеспечивает более высокий уровень защиты от электрических наводок и электростатических помех (вызываемых «сухими грозами» и хаотически возникающими электромагнитными импульсами – рисунок 4).

На оборудовании SN 428XL электростатическая наводка, как правило, выбивает целый сегмент профиля (рисунок 4а). В системе Sercel-508XT тракты регистрации и передачи информации развязаны, электростатическая наводка проявляется на сейсмограммах только в виде высокочастотной помехи по всем каналам (рисунок 4б), что позволяет легко отфильтровать её на начальной стадии обработки.

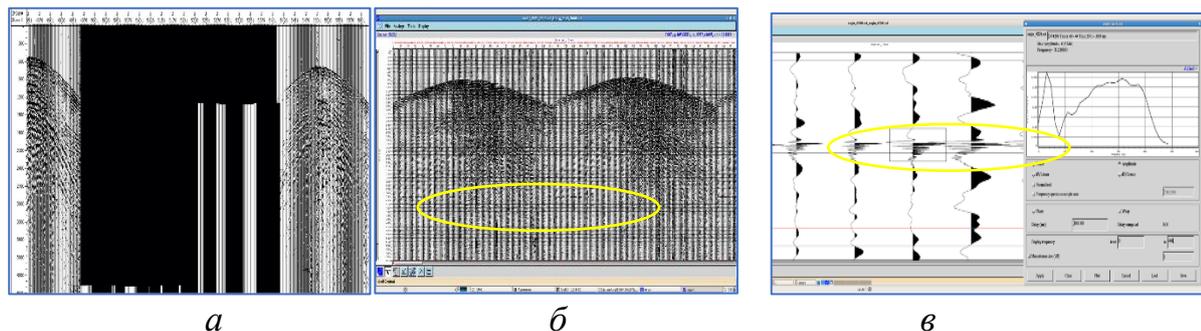


Рисунок 4 - Проявление электростатической наводки в волновом поле:
 а – запись с SN 428XL; б – запись с Sercel-508XT; в – наводка на записи с Sercel-508XT

Установлено, что гибридная телеметрическая система Sercel-508XT действительно является самой совершенной системой регистрации, поднимающей процесс регистрации сейсмических данных на качественно более высокий уровень. Использование в архитектуре элементов как кабельной, так и бескабельной технологий обеспечивает возможность регистрации в реальном

времени, в непрерывном режиме без пауз в работе, в любых районах проведения работ.

В четвертой главе обосновывается второе защищаемое положение. Рассмотрены особенности вибрационного метода и высокопроизводительных методик вибрационной сейсморазведки, причины ухудшения качества и существующие методы решения проблемы наложения свип-сигналов. Зарубежные методы защищены патентами, их использование связано со значительными финансовыми затратами, закупкой отдельного обрабатывающего комплекса и зависимостью от иностранных компаний. Кроме того, использование всех перечисленных методов основано на обработке колоссального объёма данных по сложным алгоритмам и вследствие этого влечет существенное увеличение затрат времени на обработку. Предложен новый эффективный метод удаления корреляционных помех от одновременной работы нескольких групп вибраторов, основанный на различии частот возбуждения и обеспечивающий независимость от импортных методик. В отличие от известных методов удаление гармонических помех производится еще до свёртки - на стадии обработки виброграмм с использованием обычных цифровых фильтров с изменяющимися во времени граничными частотами.

Характер изменения частоты накладываемых свип-сигналов известен, для линейного частотно-модулируемого сигнала изменение частоты во времени t происходит по зависимости

$$f(t) = f_{нач} + \beta \cdot t = f_{нач} + (f_{кон} - f_{нач}) \cdot t / T, \quad (1)$$

где $f_{нач}$ и $f_{кон}$ – начальная и конечная частоты свип-сигнала, β – скорость нарастания частоты; T – длительность сигнала. Поэтому накладываемые свип-сигналы прогнозируемы и различаются по частоте в один и тот же момент времени на

$$\Delta f = \beta \cdot t_{slip} \cdot (\pm n),$$

где t_{slip} – время задержки запуска slip time; n – порядковый номер пункта возбуждения, считая от основного, со знаком плюс для предшествующих возбуждений и со знаком минус для последующих.

Очевидно, что на виброграмме при отсчете времени от начала возбуждения все частоты выше определяемых зависимостью (1) являются помехами от предыдущего возбуждения. Эти высокочастотные помехи от предыдущего возбуждения могут быть удалены из записи фильтром низких частот (LP - low-pass). Чтобы избежать искажений, связанных с краевыми эффектами фильтрации, целесообразно границу фильтра LP принимать равной не величине текущей частоты возбуждения (1), а несколько выше, например на середине между частотами предыдущего и выделяемого пунктов возбуждения (рисунок 5). Изменение во времени граничной частоты такого фильтра f_{LP} будет определяться зависимостью

$$f_{LP}(t) = f_{нач} + (f_{кон} - f_{нач}) \cdot (t + t_{slip} / 2) / T \quad (2)$$

при $t \leq T$, далее граничная частота остается неизменной. Выбор такой граничной частоты фильтра LP позволяет избавиться от помех, вызванных всеми предыдущими возбуждениями, так как частоты возбуждений пунктов с еще более ранним возбуждением будут еще выше.

В момент начала записи виброграммы второго пункта возбуждения помехи от последующего третьего пункта отсутствуют. Они появятся через интервал времени, равный slip-time. Устранение влияния последующего возбуждения

выполняется аналогичным образом, но с использованием переменного во времени фильтра высоких частот (НР - high-pass). Как и в случае устранения помех предыдущих возбуждений, граничную частоту фильтра НР целесообразно сместить на середину частот между выделяемым и последующим пунктом возбуждения. Изменение во времени граничной частоты такого фильтра $f_{НР}$ будет определяться зависимостью

$$f_{НР}(t) = f_{нач} + (f_{кон} - f_{нач}) \cdot (t - t_{slip}/2) / T \quad (3)$$

при $t \leq T + t_{slip}/2$, далее граничная частота остается неизменной. Выбор граничной частоты фильтра НР на середине между частотами соседних пунктов возбуждения позволяет избавиться от помех, вызванных всеми последующими возбуждениями, так как частоты более поздних возбуждений будут еще ниже.

Смещение граничной частоты фильтра НР также позволяет сохранять волны, пришедшие со значительным запаздыванием от момента возбуждения – до $t_{slip}/2$. Комбинация фильтров LP и НР позволяет построить переменный по времени полосовой фильтр (ВР - band-pass), который обеспечивает защиту как от высокочастотных помех предыдущих пунктов возбуждения, так и от низкочастотных помех последующих пунктов возбуждения. Частотно-временная диаграмма фильтра ВР изображена на рисунке 5.

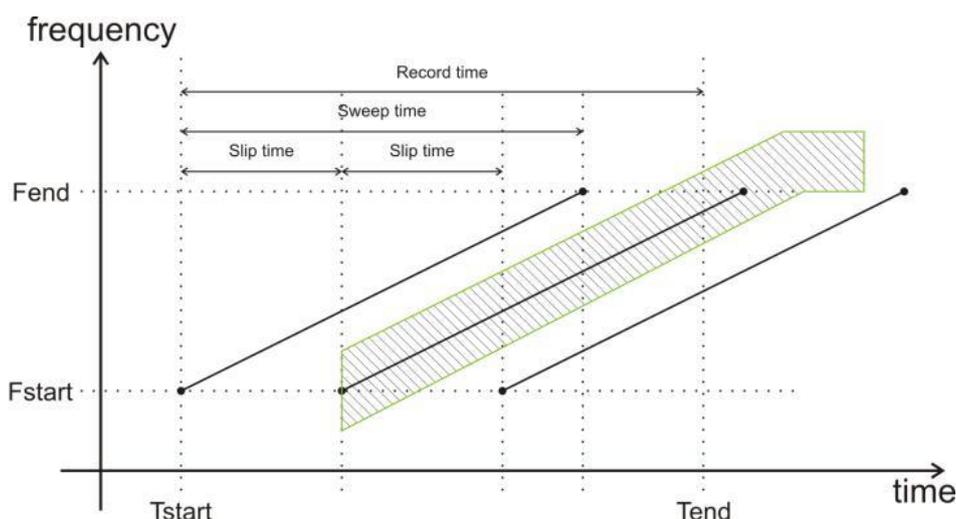


Рисунок 5 - Частотно-временная диаграмма удаления помех от наложения свип-сигналов методом следящей фильтрации (область пропускания заштрихована)

Несмотря на то что предложенный метод является упрощенным и не учитывает изменение времен распространения сигналов от разных групп вибраторов до данного пункта приема (малых по сравнению со slip-time), расширение полосы пропускания следящего фильтра до середины между частотами соседних пунктов возбуждения, то есть до

$$\Delta f = \beta \cdot t_{slip}$$

позволяет без заметных искажений выделять виброграмму отдельного пункта возбуждения. На рисунке 6 проиллюстрирован результат фильтрации виброграммы в интервале 9,5-11с, когда в режиме Slip-sweep начинает работать группа вибраторов следующего пункта возбуждения и продолжается работа вибраторов на предыдущем пункте (slip-time – 8с).

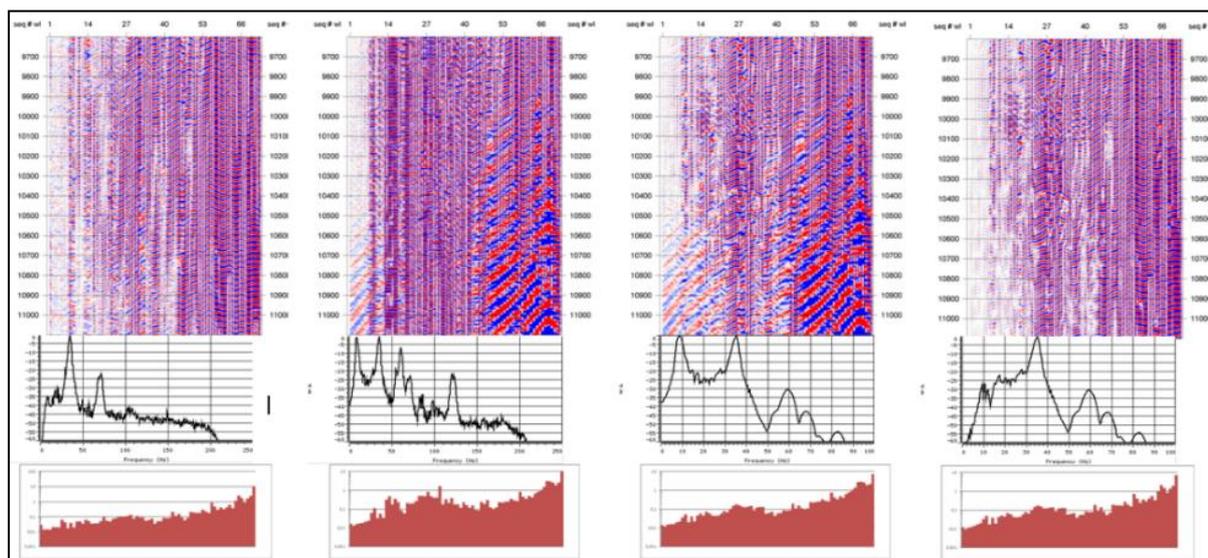


Рисунок 6 - Виброграммы, АЧХ и гистограммы амплитуд до и после применения полосового фильтра

а) отдельное возбуждение (без помех); б) в режиме Slip-sweep с помехами от соседних ПВ; в) после применения фильтра LP; г) после применения фильтра HP.

Идеальные фильтры с резким переходом от области пропускания к области подавления имеют слишком сложную конструкцию оператора фильтра, что увеличивает время обработки, приводят к появлению нежелательных краевых искажений (колебаний Гиббса) и пропускают заметную часть сигнала в область подавления. Чтобы избежать этих недостатков фильтры конструируют с плавным переходом от области пропускания к области подавления. Параметрами таких фильтров являются четыре граничные частоты f_1 , f_2 , f_3 и f_4 . Граничные частоты f_1 и f_4 должны быть равны $f_1 = f_{HP}$, $f_4 = f_{LP}$. Граничные частоты области полного пропускания f_2 и f_3 выбирают исходя из симметричности частотной характеристики фильтра и выполнения условия

$$(f_3 - f_2) \geq \Delta f_{omp} + 2\beta,$$

где Δf_{omp} - одновременно регистрируемый диапазон частот отраженных волн, определяемый разницей времен прихода отражений от самого верхнего (t_{01}) и самого нижнего (t_{0n}) целевых горизонтов на данной площади

$$\Delta f_{omp} = \beta \cdot (t_{0n} - t_{01}).$$

Экспериментально доказано, что разработанный метод позволяет эффективно проводить очистку виброграмм от помех соседних пунктов возбуждения как раннего, так и позднего включения (рисунок 7). Дополнительно следящая фильтрация подавляет микросейсмы и промышленные шумы, выходящие за границы частотного диапазона фильтра. В связи с тем что переменная во времени фильтрация является традиционной процедурой обработки и реализована во всех программных комплексах полевой обработки сейсмических данных, метод не требует привлечения материальных затрат на дополнительное оборудование и сокращает время обработки.

По результатам опытных работ показано, что с использованием следящей фильтрации виброграмм метод Slip-sweep можно применять даже в условиях

густонаселённой и промышленно развитой части России с высоким уровнем промышленных помех. В настоящее время разработанный метод следящей фильтрации активно применяется в АО «Башнефтегеофизика» при проведении полевых сейсморазведочных работ методом Slip- sweep.

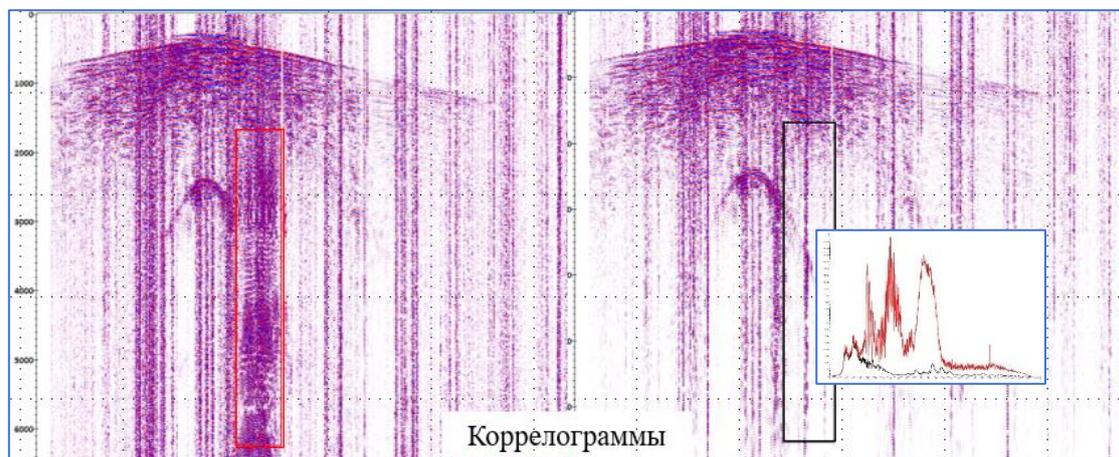


Рисунок 7 - Коррелограмма до и после следящей фильтрации виброграммы

В пятой главе обосновывается третье защищаемое положение. Переход на новую ступень технологии сейсморазведки повлечёт за собой усложнение производства полевых работ и необходимость контроля огромного количества параметров для своевременного принятия мер по обеспечению качества и производительности работ. Однако, практически все используемые в настоящее время методики контроля качества полевых работ не обеспечивают полноценного контроля технологии производства сейсморазведочных работ, своевременного выявления и устранения причин потери качества, выявления и устранения узких мест в технологии выполнения работ, сдерживающих их производительность.

Для решения этой проблемы в процессе диссертационных исследований разработана единая для всех полевых партий система контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ (СКК), включающая базу оперативно пополняемых данных о всех параметрах полевых работ и систему прикладных программ, обеспечивающих получение всеобъемлющей текущей информации как по отдельным полевым отрядам в полевой партии, так и по всем полевым отрядам и партиям в головном офисе геофизической компании.

База данных обеспечивает сбор и хранение параметров полевых работ. Она функционирует с использованием программной оболочки общераспространенной системы «1С» и имеет иерархическую структуру: участок (площадь) работ – профиль - пикет. Перед началом отработки каждого участка администратором создаётся проект, который открывает доступ к базе данных пользователю - полевой партии. Обмен информации с пользователем осуществляется по сети интернет, что обеспечивает удаленный доступ.

В каждой полевой партии в камеральной группе полевого вычислительного центра (ПВЦ) создается рабочее место для входа в базу данных. В процессе выполнения сейсморазведочных работ все параметры, скачиваемые из полевого оборудования, передаются в режиме реального времени на сейсмостанцию и

через нее в ПВЦ. Ежедневно после окончания производственной смены по каждому полевому отряду (топографическому, буровзрывному, вибрационному, сейсмическому) из этих накопленных за смену данных геофизик ПВЦ формирует в виде электронных таблиц в формате Excel информацию для базы данных. Полученная информация экспортируется в базу данных, при этом она автоматически переводится из Excel во внутренний формат базы данных (BIG DATA). Система управления базой данных выполняет контроль корректности ввода информации. Процесс автоматизирован и занимает не более одного часа.

В базе данных все введенные параметры сортируются по общему признаку в последовательности: название участка (площади) работ, номер профиля, номер пикета. Сотрудникам партии доступны визуализация и анализ информации только по базе данных своей партии. Специалистам головного офиса в г. Уфа доступна информация по всем полевым партиям. Таким образом осуществляется второй уровень контроля как качества выполнения полевых работ, так и хода их выполнения и достигнутой производительности.

По окончании полевых работ часть базы данных, относящаяся к выполнению работ на данном участке, изымается, копируется на внешний носитель и отправляется на архивное хранение (для возможности использования впоследствии).

В процессе исследований выяснен полный перечень параметров, извлекаемых из полевого оборудования, и для ввода в базу данных отобраны те из них, которые представляют ценность для анализа производительности и качества работ.

Развитие системы предусматривает возможность включения новых инструментов анализа по результатам их опробования в реальных проектах полевых партий. К настоящему времени разработаны более пятидесяти прикладных программ. Для удобства поиска и использования все прикладные программы систематизированы в блоки по направлению анализа: по производительности работ, по параметрам работы вибраторов, по параметрам погружения заряда, по атрибутам количественной оценки качества сейсмограмм, по категориям брака, по коэффициенту качества и отображению выполненных работ на карте. Каждый отдельный инструмент анализа представляет отчет по определенному набору параметров.

В системе предусмотрена возможность анализа большого разнообразия причин брака или снижения коэффициентов качества. При оценке причин брака используются: атрибуты количественной оценки качества сейсмограмм, параметры работы вибраторов (при вибрационном способе возбуждения), параметры погружения заряда (при взрывном способе возбуждения) и другая информация о выполнении работ. Использование подробной классификации браков, сопоставление с фамилиями исполнителей и применяемым оборудованием позволяют оперативно и точно выявлять основные причины появления брака.

Пример отображения информации для контроля допущенных браков по технологии (по людям - сотрудникам буровзрывных бригад) приведен на рисунке 8. В правой части диаграммы показан перечень причин брака, отмеченных

разным цветом. Диаграмма показывает количество конкретного типа брака по каждому исполнителю.

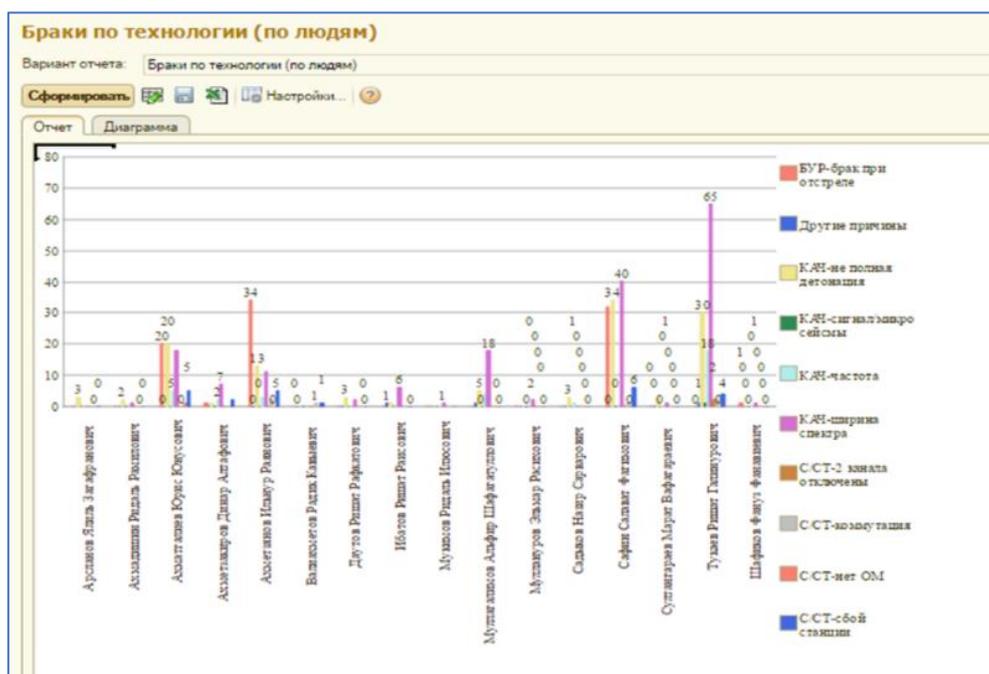


Рисунок 8 - Контроль допущенных браков по взрывникам (или бурильщикам)

Для оптимизации процесса контроля и сокращения затрат времени на обобщенный анализ созданы результирующие диаграммы Ганта, характеризующие производительность и качество выполняемых работ по всем партиям и отрядам.

В АО «Башнефтегеофизика» за период эксплуатации ССК (с 2016 г.) количество забракованных физических наблюдений по Дирекции разведочной геофизики уменьшилось с 5-6% до 2-3% и продолжает стабильно снижаться, что обеспечивает значительный рост производительности и экономической эффективности работ. На рисунке 9 проиллюстрирована тенденция уменьшения общего количества браков при бурении по месяцам по всем партиям, использующим взрывной способ возбуждения, и их доля в выполненном объеме работ в процентах. Процент брака снизился с 6-6,9% до 2,7-3%. Рост количества забракованных ПВ объясняется тем, что с каждым годом неуклонно растут общие объёмы работ (с 2016 г. объёмы работ увеличились с 40000 до 150000 ПВ за сезон). Пробелы на диаграмме приходятся на месяцы межсезонья.

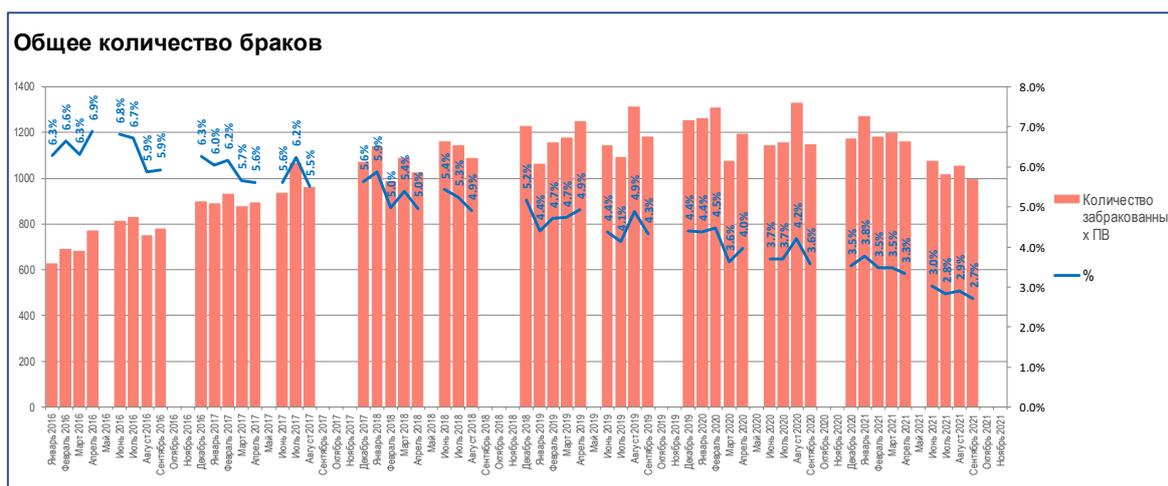


Рисунок 9 - Тенденция снижения брака при бурении, начиная с января 2016 г.

Сохранение и систематизация максимального объема полученной информации являются базисом для внедрения искусственного интеллекта в производство полевых сейсморазведочных работ с целью оптимизации различных параметров как текущих, так и планируемых последующих работ на соседних площадях в похожих сейсмогеологических условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для повышения точности определения параметров зоны малых скоростей разработан метод МСК, основанный на комплексировании прямого МСК в шнековой колонне и метода преломленных волн, позволяющий повысить точность за счет использования двух дополнительных критериев: минимального времени вступлений и смены фазы первой волны на подошве ЗМС.

2. Исследована возможность применения новых технических решений для повышения качества и производительности сейсморазведочных работ. Показано, что гидропневматический источник ГПИ-2 незначительно проигрывает вибрационному NOMAD-65 по отношению сигнал/шум, динамической выраженности и прослеживаемости отражений на глубинах до 2 км. «Полуслепую» бескабельную систему регистрации Unite целесообразно использовать как дополнение к кабельной в эксклюзивных зонах, где затруднена размотка кабельной системы, а «слепою» систему GSR - автономно, так как параметры регистрирующего канала отличаются от других систем. Использование одиночных сейсмоприемников обеспечивает максимальные преимущества бескабельных систем (мобильность и малые размеры установки) и повышает разрешающую способность сейсмических данных. Гибридная телеметрическая система Sercel-508XT поднимает процесс регистрации сейсмических данных на качественно более высокий уровень, однако в максимальной комплектации на российском рынке она пока не востребована.

3. Разработана методика подавления помех при вибрационных работах по высокопроизводительной методике Slip-sweep, основанная на фильтрации виброграмм с изменяющимися во времени граничными частотами (следящей фильтрации). Методика позволяет эффективно проводить очистку виброграмм от помех соседних пунктов возбуждения как раннего, так и позднего включения и

дополнительно подавляет микросейсмь и промышленные шумы, выходящие за границы частотного диапазона фильтра.

4. Создана система контроля качества и мониторинга полевых сейсморазведочных работ, обеспечивающая двойной уровень тотального контроля работ (в полевой партии и в головном офисе). Система включает базу оперативно пополняемых данных о всех параметрах полевых работ и систему прикладных программ, позволяющих автоматизировать процесс систематизации всей имеющейся информации и реализовать мгновенное извлечение огромного объема информации в удобном для анализа виде. Это обеспечивает разработку оперативных мероприятий по уменьшению брака полевых сейсморазведочных работ, позволяет выявлять и устранять узкие места в технологии выполнения работ и ведет к значительному росту производительности и экономической эффективности работ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты опубликованы в 20 научных трудах, получено два патента на изобретения.

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. **Гафаров Р.М.** Slip-sweep – метод высокопроизводительной сейсморазведки без потери качества получаемых данных в условиях центральной части России // Приборы и системы разведочной геофизики. 2012. № 1. С. 62-66 (вклад автора 100%).

2. **Гафаров Р.М.** Опытные работы по испытанию полевых бескабельных систем регистрации сейсмических сигналов // Геофизика. 2012. № 4. С. 58-64 (вклад автора 100%).

3. **Гафаров Р.М.** Опытные работы по испытаниям полевых бескабельных систем GSR (GEOSPACE) и UNITE (Sercel) // Приборы и системы разведочной геофизики. 2012. № 2. С. 46-55 (вклад автора 100%).

4. **Гафаров Р.М.** Применение следящей фильтрации при обработке данных Slip-sweep // Геофизика. 2012. № 4. С. 47-53. (вклад автора 100%)

5. **Гафаров Р.М., Муртаев И.С., Лицкий В.П., Хакимов Р.Т.** Сейсморазведочные работы МОГТ 3D с использованием бескабельной сейсморегистрирующей системы GSR // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. № 4. С. 30-38 (вклад автора 25%).

6. Череповский А.В., **Гафаров Р.М.** Весовое суммирование как редактор нестационарных помех в невзрывной сейсморазведке // Геофизика. 2013. №2. С. 70-73 (вклад автора 50%).

7. **Гафаров Р.М., Ягудин И.Р.** В решении проблемы обеспечения качества полевых данных нет мелочей // Приборы и системы разведочной геофизики. 2016. № 1. С. 48-50. (вклад автора 50%)

8. **Гафаров Р.М., Ягудин И.Р., Денисенко Н.В.** О первых результатах опытной эксплуатации сейсмосистемы 508ХТ в АО «Башнефтегеофизика» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2016. № 4. С. 43-49 (вклад автора 34%).

9. Селезнев В.А., **Гафаров Р.М.**, Михеев С.И., Экомасов С.П., Барбиери Паоло, Ягудин И.Р., Иванов Д.В. Новые результаты полевых испытаний импульсного гидропневматического источника сейсмических волн ГПИ-2 // Приборы и системы разведочной геофизики. 2016. № 1. С. 62-70 (вклад автора 15%).

10. Ахметшин И.Н., **Гафаров Р.М.**, Сираев И.А. Сейсморазведка. Испытание временем // Геофизика. 2017. № 3. С. 9-13 (вклад автора 34%).

11. **Гафаров Р.М.**, Дагаев И.Л., Крамаренко С.Ю. Методические приемы по изучению ВЧР методом прямого и обращенного МСК // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. № 1. С. 69-78 (вклад автора 34%).

12. **Гафаров Р.М.**, Сираев И.А., Экомасов С.П., Барбиери Паоло. Гидропневматический источник (ГПИ-2) – новый поверхностный источник возбуждения сейсмических колебаний // Геофизика. 2017. № 3. С. 14-23 (вклад автора 25%).

13. Акуленко А.С., **Гафаров Р.М.** Первый опыт применения технологий машинного обучения для прогноза глубин заложения сейсмического заряда при планировании и проведении полевых сейсморазведочных работ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2021. № 4. С. 20-32 (вклад автора 50%).

14. **Гафаров Р.М.**, Сираев И.А., Денисенко Н.В., Ягудин И.Р., Идиятов Р.Х. Система контроля качества полевых сейсморазведочных работ // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2021. № 6(354). С. 34-41 (вклад автора 20%).

15. **Гафаров Р.М.**, Денисенко Н.В., Идиятов Р.Х., Ягудин И.Р., Ахтямов Р.А. Усовершенствование технологии полевых сейсморазведочных работ и мониторинга производства с целью повышения качества и экономической эффективности // Геофизика. 2022. № 4. С. 135-142 (вклад автора 20%).

16. Денисенко Н.В., Акуленко А.С., **Гафаров Р.М.**, Ахтямов Р.А. Перспективы применения малогабаритного импульсного порохового источника при сейсморазведочных работах МОГТ и изучении ВЧР методом прямого МСК // Геофизика. 2022. № 4. С. 75-82 (вклад автора 25%).

17. Идиятов Р.Х., Сираев И.А., **Гафаров Р.М.**, Ахтямов Р.А. Опыт проведения сейсморазведочных работ высокопроизводительным методом slip-sweeper в Арктическом регионе // Геофизика. 2022. № 4. С. 117-121 (вклад автора 25%).

18. Ягудин И.Р., **Гафаров Р.М.**, Сираев И.А., Ахтямов Р.А. Влияние нелинейных искажений на качество полевых данных в вибрационной сейсморазведке // Геофизика. 2022. № 4. С. 58-63 (вклад автора 25%).

19. Акуленко А.С., **Гафаров Р.М.**, Сираев И.А. Анализ эффективности технологий подавления эффектов наложения гармонических искажений, возникающих при выполнении полевых сейсморазведочных работ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 01(76). С. 15-27 (вклад автора 34%).

20. **Гафаров Р.М.**, Идиятов Р.Х. Сейсмический вибрационный источник «БАТЫР». Техническое решение в условиях международных санкций // Приборы и системы разведочной геофизики. 2024. № 01(80). С. 7-15 (вклад автора 50%).

Патенты на изобретения

1. Способ определения границ ВЧР методом прямого МСК в комплексе с методом преломленных волн: патент на изобретение № 2690068 Рос. Федерация / Сираев И.А., **Гафаров Р.М.**; заявитель и патентообладатель АО «Башнефтегеофизика». № 2018117833; заявл. 14.05.1919; опубл. 30.05.1919 (вклад автора 50%).

2. Способ получения коррелограмм высокого качества при проведении полевых сейсморазведочных работ методом slip-sweep: Евразийский патент на изобретение № 043732 / **Гафаров Р.М.**, Акуленко А.С., Семашев А.Т.; заявитель и патентообладатель ООО НПЦ «ГЕОСТРА» № 202293004; заявл. 17.11.2022; опубл. 16.06.2023 (вклад автора 34%).