

ISSN 2074-8906

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

ЯНВАРЬ-МАРТ

1/2020

Издается с 2002 г.

ТЕМА НОМЕРА:



Проектные технологии в геологоразведке

ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

О проектах сверхплотной сейсморазведки в горах Кавказа и в Северном Китае

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

СОВЕРШАЕТ ПЕРЕВОРОТ В СТОИМОСТИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

работы ведутся
вдвое быстрее

на 50% уменьшается
количество рабочих бригад
и техники на проекте

на 50% снижена
операционная
стоимость проекта

IGU-16 / IGU-16HR



IGU-16HR 3C



IGU-BD3C-5



IAU-19



ВЫСОКОПЛОТНУЮ СЕЙСМОРАЗВЕДКУ ТЕПЕРЬ МОЖНО ДЕЛАТЬ ДЕШЕВО!

«ВКонтакте»



Первый в мире интеллектуальный
сейсмический датчик
Высокоплотная и экономичная
сейсморазведка — теперь это возможно

Email: marketing@dtcc.asia
Tel: +86-10-60844158
Website: www.smartsolo.com.ru/www.dtcc.biz

Общие глобальные поставки

300,000
каналов

ТЕМА НОМЕРА:**Проектные технологии в геологоразведке****СОДЕРЖАНИЕ:****Наши партнеры**

Логотипы организаций, финансово участвующих в издании этого
номера журнала 4

КОЛОНКА РЕДАКТОРА**Уважаемые коллеги и читатели!**

Главный редактор журнала Д.Н.Слонов 5

НОВОСТИ РЫНКА

Пост-релиз III Международной геолого-геофизической конференции и выставки:
ГеоЕвразия-2020. 6

Новые достижения в технологии наземных сейсморазведочных работ

Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. 7

ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ**ТНГ-Групп - так не работал еще никто**

Мустафин И. Р., Ильтуганов Л. Т. 14

Комплексирование модификаций метода ВСП при изучении кимберлитовых тел в Якутии

Ошкин А.Н., Шехтман Г.А., Игнатьев В.И., Гончаров Е.М. 18

Рекорды производительности на объекте 3D в Джимсаре (уезд в Чанцзи-Хуэйский автономный округ СУАР, КНР) с интеллектуальным сейсмическим датчиком SmartSolo.

Youli An 28

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**Контроль качества в современных бескабельных регистрирующих системах**

Абдулвалиев М.Т., Тиссен А.П., Череповский А.В. 31

Широкий спектр применения сейсмосистемы "SCOUT-HT" в сложных орогидрографических условиях

Гнатюк А.И., Тарасов В.Н., Тарасов Н.В., Цукерман И.Б. 41

К вопросу о группировании вибраторов в горных условиях

Кострыгин Ю.П., Фокин С.А. 45

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Расчет соотношения сигнал-помеха различными программными комплексами и сравнение результатов

Баландин П.В., Копылов М.А. 50

Результаты тестирования алгоритмов глубинной миграции сейсмических данных, полученных в пределах Мраковской депрессии, Республика Башкортостан.

Акуленко А.С., Калинин А.Ю., Ляпин Н.В., Иванов П.Д. 55

НАШИ ПАРТНЕРЫ



Приборы и системы разведочной геофизики.

Общероссийский научно-технический ежеквартальный журнал. Издается с 2002 г.

Главный редактор:

Д.Н. Слонов

Координатор проекта:

С.А. Матвеев

Обложка и оформление:

Д.В. Мокроусов

Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редакция может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов. Контакты с авторами статей ведутся через редакцию.

Редакционная коллегия:

Н.П. Алелюхин,
к.т.н. А.В. Белоусов,
к.т.н. С.В. Горбачев,
д.г.-м.н. В.Я. Воробьев,
д.т.н. Г.Н. Гогоненков,
С.В. Гурьев,
к.т.н. В.А. Детков,
д.т.н. А.П. Жуков,
Б.В. Запорожец,
д.г.-м.н. С.И. Михеев,
к.т.н. О.М. Сагайдачная,
к.т.н. Н.В. Тарасов,
д.т.н. Г.Я. Шайдуров,
д.т.н. Г.А. Шехтман,
д.т.н. М.Б. Шнеерсон.

Корректор:

И.Э. Дурова

Вёрстка:

Д.В. Мокроусов

Учредитель:

СРО МОО ЕАГО

Издатель:

ООО «ПСРГео»



Адрес издательства:

г. Саратов. Ул.Осипова, 1
Телефон +7-987-822-68-37

Тираж отпечатан в
типографии ООО
«Формат»
Тел. +7 (8452) 39-33-77
Тираж: 300 экз.

Подписано в печать:

07.04.2020

Дата выпуска:

21.04.2020

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций за номером ПИ № 77-7906 от 27.04.2001 г.
ISSN: 2074-8906
Web-сайт: psrgео.ru

Уважаемые коллеги и читатели!

Мы сделали темой номера «Проектные технологии в сейсморазведке». Заявляя управленческую тему, мы ждали, что наши авторы поделятся своим опытом интересных организационных решений, позволивших добиться успеха в сложном проекте. Каждый проект уникален и нужны опыт и знания организационных процессов в их взаимосвязи. И чем сложнее и «тоньше» решаемые задачи, тем важнее не упустить ни одной мелочи.

Проект 2D, выполненный компанией ТНГ-Геосейс на Северном Кавказе по сверхплотной методике, о котором мы рассказываем в этом номере, в полной мере отвечает нашей задумке. Проект потребовал и технических, и организационных решений, ставших по-настоящему инновационными.

В других статьях был больше сделан акцент на оборудование и технологии, которые дают геофизикам возможность проявить организационное творчество.

Все больше проектов делается с использованием бескабельных систем – об этом в информации китайских коллег компании SmartSolo и в аналитическом обзоре, специалистов холдинга Геотек-Сейсморазведка.

Рады, что несмотря на трудности, саратовские разработчики продолжают создавать новое оборудование, позволяющее выходить на смелые проекты с надежным инструментом. О комбинации кабельного и бескабельного оборудования отечественного производства в материалах СКБ СП (г. Саратов).

Тенденции развития геофизического рынка и технологий представлены в публикациях, посвященных конференции ЕАГО «ГеоЕвразия 2020» и выставке-конференции в Омане.

Мы не будем анонсировать все публикации номера, они, право, заслуживают внимательного прочтения. И мы благодарны всем нашим авторам, откликнувшимся на

приглашение к сотрудничеству с возрожденным журналом «Приборы и Системы разведочной геофизики» в это сложное время.

А время действительно непростое – и ладно бы только очередной кризис подбирался, так ведь еще напасть в виде COVID-19 требует мобилизации сил и ресурсов, не давая спокойно работать. А еще погода тоже добавляет свои яркие краски в труд сейсморазведчиков.

Общаясь с коллегами, мы приняли решение следующий номер посвятить теме ранней весны. Приглашаем поделиться мыслями о том, чего нам ждать от природы, как минимизировать риски невыполнения проекта в связи с укорачивающимся год от года зимним сезоном. Какие есть средства и аппаратура, помогающие в решении этих задач. И главное, какие организационные действия помогут геофизикам встречать весну во всеоружии.

Приглашаем наших друзей и партнеров к участию в номере на тему.

«Когда весна придет – не знаю»

Наши координаты psrgeo@mail.ru

Главный редактор журнала
«Приборы и системы разведочной геофизики»



Слонов
Дмитрий
Николаевич

GEO Eurasia 2020

Пост-релиз III Международной геолого-геофизической конференции и выставки: ГеоЕвразия-2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. 3-6 февраля 2020 г., г. Москва, ЦМТ. www.gece.moscow

6 февраля завершила свою работу III Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «ГеоЕвразия-2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». Организатором мероприятия выступило ООО «ГеоЕвразия» (www.geoeagu.com). Площадкой для проведения мероприятия уже третий год стал Центр Международной торговли на Краснопресненской набережной г. Москвы. Помимо этого, в 2020 году отдельные выездные мероприятия проходили в Технопарке Сколково, а также в Институте физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта.



В 2020 году количество зарегистрированных участников превысило 1100.

За четыре дня работы конференции делегаты смогли прослушать 215 технических докладов, посетили три выездных семинара, и четыре дискуссионные сессии («круглых стола»). На трехдневной выставке имели возможность показать себя и свои достижения 29 компаний-экспонентов.

3 февраля на пленарной сессии с приветствиями и пожеланием успешной работы форума выступили заместитель руководителя федерального агентства по недропользованию О.С. Каспаров, вице-президент Российского Геологического Общества, председатель общественного Совета РОСНЕДРА Е.Г. Фаррахов, председатель программного комитета, зам. декана геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова М.Ю. Токарев, председатель организационного комитета, исполнительный директор Группы ИГТ Д.Д. Агапитов. Научную программу пленарной сессии открыл А.П.Афанасенков (АО «Росгеология») с докладом «Вклад АО «Росгеология» в освоение недр Евразии: «перспективы развития». А.П.Тиссен (ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка») представил результаты компании в развитии новых сейсморазведочных технологий. Представители компании Яндекс. Облако (О.Коверзнев) и ООО «Сейсмостек» (Д.Мосяков) представили новые технологии в обработке сейсмических данных в докладе «Яндекс Облако (цифровизация) «5 признаков того, что вам точно не нужны внешние облака». Обсуждались вопросы путей увеличения эффективности реализации междисциплинарных проектов в интегрированной среде, представленные А.К.Базанов (ООО «ГридПоинт Дайнамикс»). Завершилась пленарная сессия докладом К.Ю.Богачёва (Rock Flow Dynamics) на тему «Повышение эффективности компании при комплексном моделировании месторождений от сейсмики до поверхностных сетей».

По докладам и представленной информации можно сделать вывод о происходящей научно-технической революции в технике и технологии, связанной с практически безграничными возможностями вычислительных систем.

На официальном сайте www.gece.moscow Вы можете ознакомиться с материалами прошедшего мероприятия, а также подписаться на рассылку новостей о будущих конференциях «ГеоЕвразия»

Новые достижения в технологии наземных сейсморазведочных работ (по материалам рабочего совещания SEG, 5 – 7 ноября, Muskat, Oman)

■ Жуков А.П., Шнеерсон М.Б.

Очередное рабочее совещание SEG Workshop 2019 прошло в ноябре 2019 г в Омане под девизом «Новые достижения в технологии наземных сейсморазведочных работ» (New Advances in Land Geophysical Acquisition Technologies). В работе совещания приняли участие представители геофизических компаний, работающих на Аравийском полуострове и прилегающих к нему районах. Методические и отчасти геологические результаты проведенных и проводимых сейсмических исследований отражены в представленных на совещание 55 докладах, знакомство с содержанием которых позволяет получить представление о технико-методическом уровне работ и направлениях их развития, что определили интерес к материалам совещания и послужило основанием для составления настоящего обзора.

По своему содержанию доклады могут быть подразделены на следующие три группы:

- планирование съемок;
- технология полевых работ и направления ее развития;
- автоматизация полевых работ и перспективы ее практического использования.

1. Планирование и автоматизация планирования съемок

Идеальная сейсмическая съемка предусматривает равномерное распределение по площади работ ее основных параметров (вынос, азимут, кратность и др.). Однако географические, топологические и другие факторы практически всегда исключают возможность приме-

нения регулярных систем и делают необходимым переход на деформированные, как правило, более сложные нерегулярные системы. Это положение нашло отражение в представленных на совещании докладах.

Так, например в [1] приведены результаты автоматической реорганизации исходной регулярной сети, позволившей учесть особенности местности и получить квази-равномерное распределение параметров съемки с расстояниями между линиями ПВ 75 м. и точками ПВ 25 м. В [2] отмечается, что стандартные сейсмические партии не отвечают современным требованиям по производительности и стоимости работ. Им соответствуют многоканальные партии, способные работать с большим (до 50) числом вибраторов и приемных каналов (порядка 50 000) и реализовывать системы наблюдений с расстояниями между линиями и пунктами возбуждения и приема колебаний, соответственно, 100 и 25 м для обеспечения высокой пространственной разрешенности записей, с большими активными расстановками сейсмоприемников (до 25 000 приемных каналов), сверхвысокой (до 2 400) кратностью и выносами до 6 000 м. Критерием оптимальности может служить положение о том, что расстояния между пунктами возбуждения (ПВ) и приема (ПП) должны быть меньше, чем половина минимальной длины волны (волны с наибольшей кажущейся скоростью) [3]. На практике это условие не всегда выполняется, и расстояния между ПВ и ПП выбирают больше оптимальных. При проектирова-

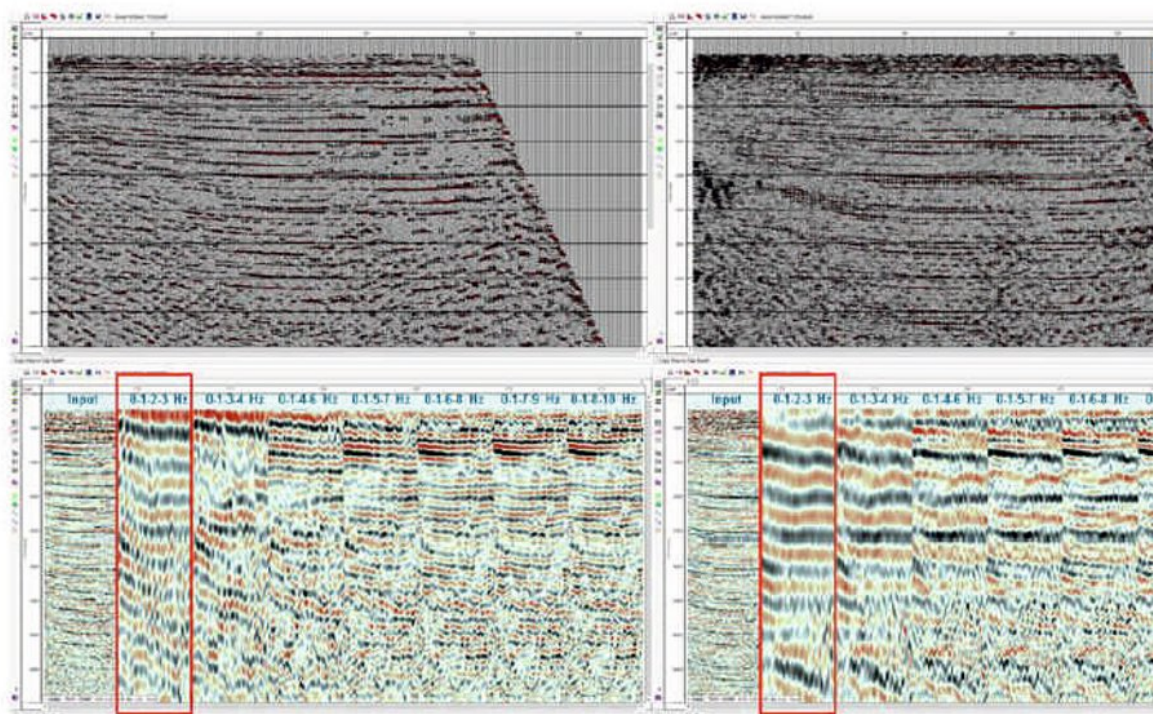
нии систем наблюдений можно пользоваться двумя критериями оптимальности, которые предусматривают: задание плотности наблюдений, которая позволяет получить наилучшее качество изображений или задание требуемого качества изображений, которое при минимальной стоимости геометрии позволит получить материалы, удовлетворяющие критериям качества полевых материалов. Оценка оптимальности методики полевых работ в наземной сейсморазведке может также основываться на минимизация времени, требуемого «К» продавцам для посещения «М» объектов. При этом вибраторы рассматриваются, как продавцы, а пункты возбуждения как объекты. Разработанная авторами программа TSP позволяет оптимизировать перемещения вибраторов, и она опробована в предположении возбуждения колебаний 8 вибраторами на площади с 20 пунктами возбуждения (ПВ).

2. Технология полевых работ и направления ее развития

Технологические схемы проведения полевых работ наземной сейсморазведки освещены в серии докладов, и они, во многом, определяются используемыми техническими средствами. Очевиден переход на применение широкополосных, плотных и сверхплотных съемок с использованием современных средств возбуждения, приема и регистрации сейсмических колебаний.

До последнего времени в сейсморазведке 3D и 4D наибольшее применение имели кабельные системы передачи данных от сейсмоприемников на сеймостанцию [4]. Они позволяют получать материалы в реальном масштабе времени, контролировать их качество, но обладают определенными недостатками, затрудняющими производство работ и снижающими их производительность. Стремление преодолеть эти ограничения

▼ Рис. 1. Фрагменты временных разрезов и трасс в узком диапазоне частот, полученные со стандартным (слева) и модернизированным вибраторами (справа).

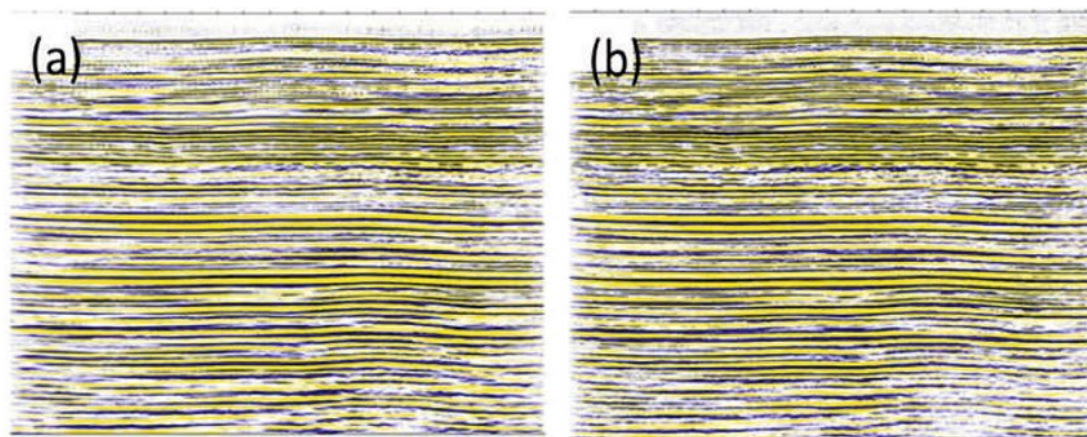


привели к появлению бескабельных систем, позволяющих упростить размещение приемных устройств на местности и повысить производительность работ, что в ряде случаев является решающим при выборе оборудования. С повышением качества оборудования применение получили «слепые системы», исключающие текущий контроль качества регистрируемых записей, но позволяющие существенно снизить затраты времени на прием и регистрацию полевых записей. Тем не менее, полный переход на слепые системы пока не очевиден. Развитие приемных систем в наземной сейсморазведке авторы связывают со снижением численности сейсмопартий, автоматизацией стандартных рабочих процедур, увеличением памяти и повышением плотности наблюдений.

В [5] на примере материалов, полученных с модернизированным, низкочастотным вибратором, (рабочий диапазон от 1,5 – 2 Гц) показаны возможность и эффективность широкополосного возбуждения колебаний. На рис. 1 приведены фрагменты временных разрезов, полученных со стандартным и низкочастотным вибратором, наглядно иллюстрирующие эффективность нового вибратора. Следует однако отметить, что переход на эффективное возбуждение низких частот потребовал модернизацию вибратора и системы его управления и контроля, направленной на снижение уровня гармоник

Фирма PDO предложила новую технологию полевых работ, названную «ультра-высокая производительность работ» (UNP). В 2017 г эта технология была применена в кабельном варианте «время – расстояние» PDO [6], которая предусматривала независимую работу мульти-групп вибраторов. Для управле-

ния системой (UNP) была разработана дополнительная цифровая система, обеспечивающая контроль в режиме реального времени и высокую скорость передачи данных. В [7] обосновывается идея уплотнения систем наблюдений и переход на системы 5 x 5 м с одиночными приемными и излучающими устройствами. В [8] приведен пример успешной, независимой, несинхронной работы группы из 24 вибраторов. При этом одна подгруппа из 12 вибраторов генерировала «удлиненный по низким частотам» dwell sweep полосой 1,5 – 12 Гц, а другая подгруппа также из 12 вибраторов – свип 6 – 96 Гц. В обоих случаях длина свипа была 12 с. Максимальная достигнутая производительность работ составила 65000 ПВ за 24 часа, что в три раза больше стандартной. На рис. 2 приведены фрагменты двух временных разрезов, полученных по стандартной и новой технологии полевых работ. Продолжается переход на применение нодальных систем. Так опыт работ фирмы PDO [9] показал, что использование нодальных систем позволяет повысить производительность работ на 30 % за счет увеличения дневного времени работ и лучшей их организации. В будущем ожидается переход на «ультра-высокую производительность полевых работ» (UNP) по децентрализованной системе наблюдений с трехкратным увеличением плотности трасс и кратности с гибкой приемной системой и полным азимутальным освещением площади. Рис. 3 наглядно иллюстрирует рост производительности полевых работ при использовании новых технических средств. Заслуживает внимания доклад [10], посвященный результатам работ на Р и S волнах на малоамплитудной газовой залежи, перекрытой газо-содержащими отложениями. Одна-



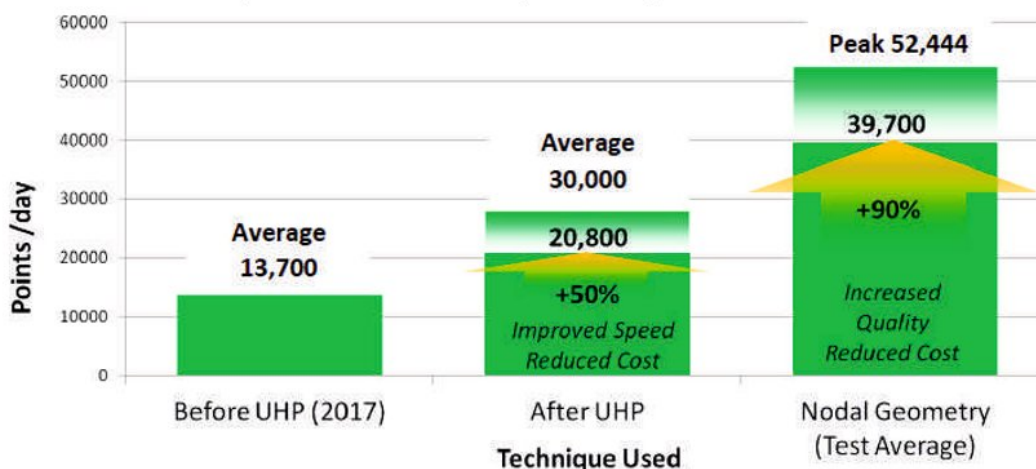
▲ Рис. 2. Сравнение стандартных (a) и разделенных (b) данных.

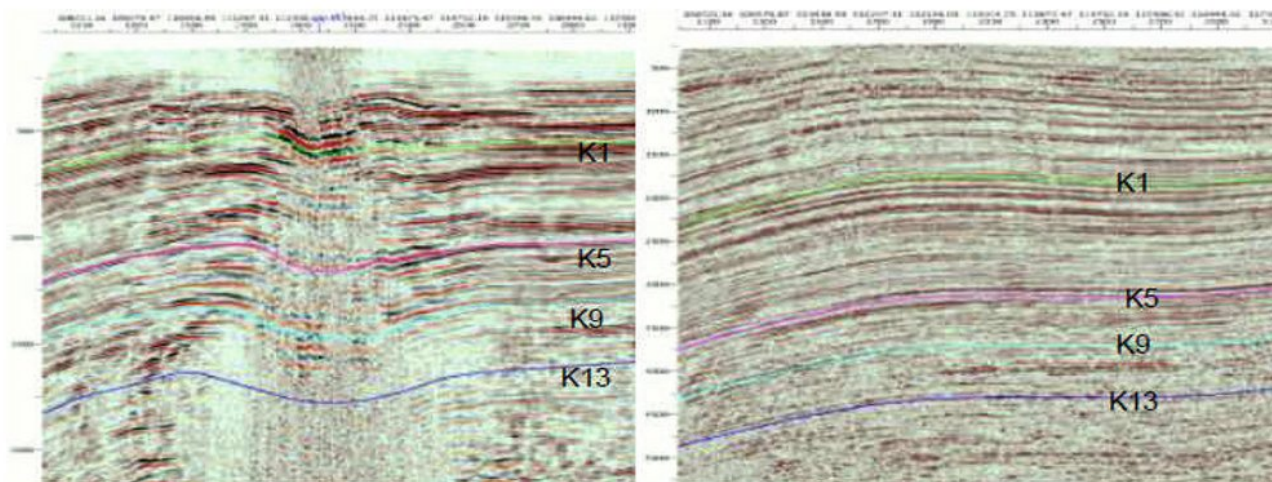
ко, при использовании поперечных волн возникают определенные проблемы, связанные с необходимостью обеспечения устойчивой регистрации поперечных волн SH–SH и определением статических поправок на этих волнах. Успешный пример использования поперечных волн приведен на рис. 4. Определенные сложности применения тяжелых вибрационных источников в пустыне послужили основанием для использования более простых импульсных источников [11]. Так фирма PJPSL (Precision impulse production seismic limited) разработала портативный импульсный источник для работы на твердых грунтах (рис.5). В апреле 2019 компания работала с PDO для оценки применимости и эффективности этой

системы на площади 25 x 10 км. Кроме того, этот источник успешно использовался при мониторинге скважины на одном из месторождений в Омане. В докладе отмечается, что источник прост и легко управляем.

Нефтяные поля Западной Канады приурочены к районам с неблагоприятными оро-гидрофизическими условиями, ограничивающими применение стандартных вибрационных источников. В этих районах оказалось эффективными высоко-плотные системы наблюдений с возбуждением группами относительно маломощных, малогабаритных импульсных так называемых PintPoint (булавочно-точечных) источников колебаний. В [12] приведены краткое описание этих

▼ Рис. 3. Рост дневной производительности работ с применением UHP и нодальных систем.





▲ Рис. 4. Сравнение материалов, полученных на продольных P-P и поперечных S-S волнах.

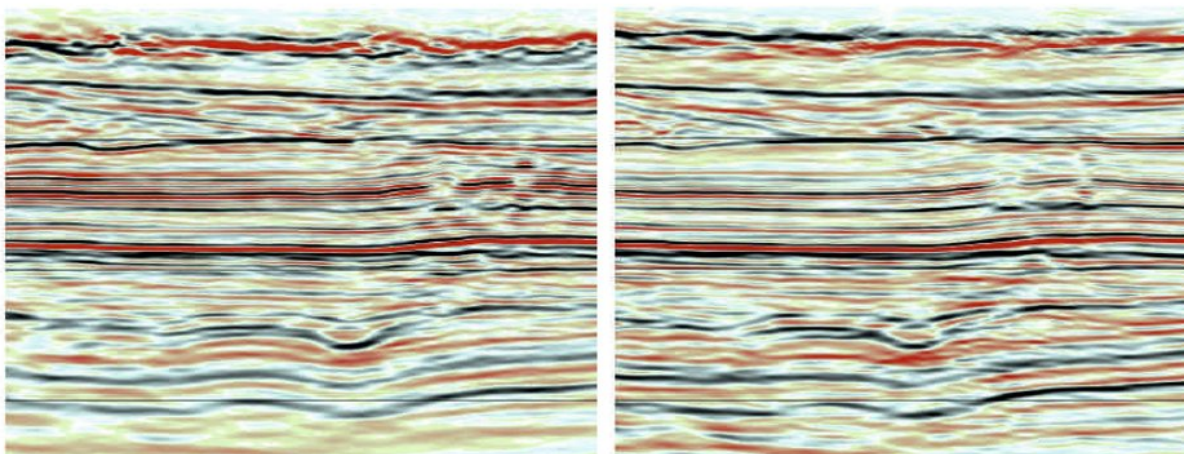


▲ Рис. 5. Портативный импульсный источник.

работ и пример, иллюстрирующий высокое качество получаемых временных разрезов и даже их некоторое преимущество по сравнению с материалами вибрационной сейсморазведки (Рис. 6)

Практика последних лет показывает, что увеличение плотности наблюдений (трасс) приводит к реальному повышению качества получаемых материалов и изображений [13]. Появление новых нодальных приемных систем сделало возможным переход на ультра-плотные системы наблюдений (UHD с числом трасс более 100 млн/км², и это направ-

▼ Рис. 6. Временные разрезы, полученные с вибратором (слева) и булавочно-точечным (PinPoint) источником (справа).



ление в сочетании с ростом числа одновременно работающих источников колебаний и возможным применением многокомпонентных систем будет развиваться. Фирма ВР предложила последовательность процедур, ориентированных на повышение эффективности применения ультра-плотных съемок. Она предусматривает: на стадии проектирования - создание модели съемки и тестирование возможных вариантов отработки площади и используемого оборудования; во время полевых работ – контроль качества материалов и его текущая обработка на ВЦ. По мнению фирмы в будущем можно ожидать увеличение плотности наблюдений до 1 триллиона трасс на км².

3. Автоматизация полевых работ и перспективы ее практического применения

При полевых работах в сложных поверхностных условиях определенные трудности возникают с их проведением, размещением оборудования и его перемещением на местности. Так например в пустынных условиях осложнения возникают из-за песчаных бурь, больших перепадах температур и «ураганных помех», которые ведут к существенному снижению производительности работ. Одним из путей решения этой проблемы является автоматизация и роботизация полевых работ. Эти вопросы нашли отражение в докладах сделанных на совещании. В [14] предлагается автоматизировать работы по размещению сейсмического оборудования по площади и перейти на использование систем с повышенной защищенностью от помех. Авторы отмечают, что автоматизация производства является основой повыше-

ния производительности работ, имеющего важное значение в современной сейсморазведке при использовании высокоплотных систем наблюдений. Первый шаг в этом направлении рассмотрен в [15]. Показано, что действие вибратора может быть подразделено на четыре стадии: поднятие плиты, переезд на следующий ПВ, опускание плиты и возбуждение колебаний. Часть из этих операций уже автоматизированы, и можно ожидать быстрого завершения работ по полной автоматизации работы вибратора, включая заезд на пункт возбуждения. Результаты первых экспериментов по беспилотному управлению вибраторами показали, что оно позволило повысить точность их позиционирования и на 23% уменьшить время на переезды. В [16] рассмотрен один из возможных путей полной автоматизации наземных сейсморазведочных работ. Он предусматривает размещение на площади съемки «коверной» расстановки приемных устройств, возбуждение колебаний заданным числом беспилотных автономных механических установок и регистрацию колебаний с последовательной передачей записей на ВЦ.

Литература

1. Automated real-time path planning for land seismic survey field design (Автоматическое в реальном времени планирование наземных сейсмических съемок М. Caporal, G. Blacquièrre, C. Tsingas).
2. Land seismic survey design for High Channel Counts crews (Проектирование наземной съемки для многоканальных партий, N. K. Yazami, Van C. Do).

3. Optimum seismic acquisition design (Оптимальное проектирование сейсмических съемок G. Blacquire, S. Nakayama).

4. What do we expect from a Land Acquisition System? (Что мы ожидаем от наземной сейморазведки? S.Valla, D. Boucard, N. Tellier).

5. New Advances in Vibroseis Source Technology (Новые достижения в технологии вибрационной сейморазведки Z. Wei, J. Criss).

6. High Productivity Acquisition and Deblending (Высокая производительность и разделение Z. Mugang1, i. Peiming1, . Y. Charles, Q. Zhongping1, W. Wenchuang).

7. Where are the reflections hiding in single-sensor land data? (Где находятся отражения в одноканальных наземных данных A.Bakulin, I. Silvestrov, D. Neklyudov)

8. Dispersed Source Array: A novel broadband acquisition methodology (Распределенная расстановка источников: новая широкополосная методология работ C. Tsingas, M.S. Mubarak, A. AlShuhail).

9. Blended Acquisition Potential Unlocked With Nodal Systems (Смешанная технология с нодальными системами M. Al Hosni, Y. E. Taha, F. Clow).

10. P-wave and S-wave joint seismic exploration (С мешанная сейморазведка на Р и волнах Z., Deng Z. Zhang, D. lieqian, W. Yongguo).

11. Highly Portable Impulsive Source to Open New Areas for Exploration and Optimise Development and Production, (Малогабаритный импульсный источник для открытых новых участков, для разведки, развития и добычи W. Davie, M. Al Hosni, F. Clow).

12. PinPoint: nimble source technology for high density seismic data acquisition with near-zero environmental impact,

(Булавочно-точечная (PinPoint) гибкая технология работ для получения высокоплотных данных при близко к нулевому воздействию на среду Châtenay, P. Thacker).

13. Impact, opportunities and challenges of a new generation of Ultra-High Density seismic (Новая ультра-высоко-плотных сейсмических систем A. Ourabah, A. Châtenay, P. Thacker).

14. Adaptive Real-Time Path Planning of Seismic Sources (Адаптивное планирование работ источников A.Bader1, Mohamed).

15. A significant step toward source automation with Vibrator Auto-Guidance (Значительный шаг в сторону автоматизации вибраторов с авто-управлении A.Maugè, G. Ollivrin, P.Sicot, N.Tellier, H. Al Zayer)

16. METIS: Automating land seismic with unmanned vehicles and real-time wireless recording (Metis: автоматизированный наземный сейморазведочный комплекс с беспилотными передвигающимися механизмами и бескабельной регистрацией волн T.J. Browaeys), B. Pagliccia, F. Adler, J. Archer, K. Elder).

ТНГ-Групп - так не работал еще никто. О сверхплотной сейсморазведке в отрогах Главного Кавказского хребта.

- Мустафин И. Р., ТНГ-Геосейс
- Ильтуганов Л. Т., ТНГ-Геосейс

Каждый геологоразведочный проект уникален. Но при этом сегодня практически нет проектов, не имеющих в большей или меньшей степени аналогов. Тем интереснее рассказать о проекте, действительно уникальном и для нашей страны, и для всей мировой сейсморазведки.

Сверхплотная система наблюдения.

Компания Роснефть уже шесть лет ведет работы на Северном Кавказе по уникальной методике наблюдения 2D. Система наблюдения – 2000 активных каналов, пункты приема расположены через 5-10 метров, пункты возбуждения – через 10-20 метров. Полученная кратность позволяет в последующем иметь возможность лабораторного группирования для создания интерференционной системы любой сложности для подавления волн-помех.

Зная геологическое строение района исследования, понимая, какие объекты здесь есть, сверхплотные профили размещаются очень тщательно. Чтобы ответить на конкретный вопрос – где находится разлом, как замыкается выявленный ранее геологический объект, как выглядит поднадвиговая зона и т.д., профиль 2D высокой плотности, располагается ортогонально региональному наклону отражающих границ, а так же строго прямолинейно.

Работы по такой методике ведутся в предгорьях Кавказа не один год – и в

Ингушетии, и в Дагестане, и в Краснодарском крае. Профили прокладываются поперек рельефных элементов, но ортогонально к геологическим объектам, убирая возможные боковые волны-помехи. Вот только как ни старались сейсморазведчики, выполнявшие такие работы ранее, линии приема всегда были или недостаточно прямолинейны, или источники возбуждения не могли встать на проектные пикеты.

Как результат – получалось облако глубинных точек, из которых обработчикам приходилось «вырезать» профили нужного направления, резко снижая кратность выборки. Сама идея сейсморазведки высокой плотности не реализовывалась в полном объеме.

Эта ситуация не могла не огорчать заказчика, видевшего в плотной сейсмике большие перспективы.

Как получить по-настоящему сверхплотную систему наблюдения?

Компания РН-Краснодарнефтегаз предложила провести исследования по сверхплотной методике наблюдения в продолжение работ, начатых еще в 2014 году, в горных отрогах Главного Кавказского хребта в Абинском районе Краснодарского края.

Семь профилей, общей протяженностью 60 километров были проложены поперек рельефных элементов строго ортогонально геологическому простиранию глубинных горизонтов в меридио-



▲ Рис. 1. Северные отроги Главного Кавказского хребта. Абинский район, Краснодарский край.

нальном простирании. Перепады высот вдоль одного профиля достигали 250 метров, углы наклона дневной поверхности – до 40 градусов.

Но сложный рельеф – еще не все трудности, поджидавшие геофизиков.

Практически вся площадь приходилась на лесные массивы. Кавказские горы, заросшие буком, грабом и другим ценными реликтовыми деревьями, относятся к особо охраняемой территории, любые порубочные работы здесь запрещены (Рис.1).

Выбор источника возбуждения стал главным вопросом реализуемости данного проекта. Учитывая невозможность рубки леса, для прохождения виброисточников и другой тяжелой техники, заказчик предложил сейсморазведчикам самим выбирать источник возбуждения между взрывным и не-

взрывным. Но требования к размещению источника в проектных точках были установлены очень жесткие.

Решение идти в тендер на проект, не имеющий аналогов в мире, принималось нелегко. Компания ТНГ-Групп, заслуженно имеющая статус одного из лидеров отрасли, такое решение приняла.

Руководство компании, для понимания всех сложностей предстоящего проекта на предтендерной стадии обеспечило проведение детальной рекогносцировки и проработку возможных технических решений для выполнения задач заказчика. Свой выбор геофизики остановили на взрывном типе источника.

Понимая, что по залесенным горам громоздкая техника не пройдет, стали подбираться переносимые модульные буровые станки.



▲ Рис.2,3. Мобильные буровые установки, использованные на горном проекте ТНГ-Групп.

Как бурить скалы?

Переносных станков для скважин глубиной 10-15 метров существует много. Вот только бурить легкими станками, весом 50-60 кг можно лишь породы относительно простые в бурении. Необходимо было искать иные технические решения.

Такие решения были реализованы на базе китайских буровых установок типа НТ-30А. Совместно с заводом изготовителем штатные установки дорабатывались для бурения в условиях кавказских гор. Специалисты ТНГ-Групп, имеющие опыт работы с самым разнообразным буровым оборудованием, предложили создать модификацию блочной буровой установки для работы в горных условиях с продувкой.

Буровые установки, состоят из шести элементов, каждый из которых весом до 60 кг. На демонтаж и монтаж установки требуется не больше 40 минут. Переноска осуществима силами буровой бригады в количестве 5 человек. Бурение скальных пород осуществляется с использованием мощного компрессора, входящего в состав мобильной установки.

Суточная производительность на один станок в горных условиях составила от

четырёх до шести скважин глубиной 15 метров в породах 5-6 категории бурения.

Средняя суточная производительность для всех партий, учитывая невозможность опережающего бурения и необходимость всех работ бурения-зарядки-регистрации в течении одного светового дня, составила 60 фн.

Каждая бригада имела план, выполнявшийся неукоснительно. Недобуривание всего одной скважины могло бы привести к срыву работы партии в целом. Однако за весь проект не было сорвано ни одного рабочего дня.

Организация работы партии ТНГ-Геосейс.

Без слаженной работы не только бурового отряда, но и всей партии в целом проект был бы невыполним.

Коллектив, работающий вместе годами, стал залогом успеха проекта.

Несмотря на то, что каждый профиль раскладывался от начала до конца, от работы наладчиков оборудования зависело многое. Время регистрации составляло всего 2-3 часа. Несмотря на отсутствие техногенных препятствий обеспечить работоспособность регистрирующей системы было непросто.

Сейсмообрудование требовало постоянного контроля и наладки в связи с большим количеством животных, нарушающих целостность кос. Лисы, кабаны, олени и другие представители кавказской фауны делали и этот элемент геофизического конвейера непростым.

Правильно расставить наладочные бригады для подготовки регистрации к нужному моменту в условиях изрезанного рельефа было очень непросто. Но и здесь обошлось без сбоев.

Геологический результат и результат работы для ТНГ-Групп.

Главным критерием успешности любого проекта становится удовлетворенность заказчика. В результате работы были получены материалы, полностью соответствующие проектному заданию. Работа выполнена в срок и без инцидентов. И перспективы дальнейших исследований этой методикой по всему Северному Кавказу видятся весьма хорошо.

Компания ТНГ-Групп еще раз подтвердила свою готовность к проектам любой сложности. Гибкость организационной системы и адаптивность под требования заказчика позволяют готовить партию к решению конкретного технического задания, независимо от его сложности.

Подробнее об авторах



Мустафин
Ильфат Ришатович

генеральный директор
ТНГ-Геосейс



Ильтуганов
Ленар Талгатович

главный инженер
ТНГ-Геосейс

Комплексирование модификаций метода ВСП при изучении кимберлитовых тел в Якутии

- Ошкин А.Н., Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова и ООО «Неоген»
- Шехтман Г.А., Институт инновационных инженерных технологий РУДН
- Игнатъев В.И., ООО «Геодавайс»
- Гончаров Е.М., ПАО АК «АЛРОСА»

Опытнo-методические работы методом ВСП проводили на участке расположения Сюльдюкарского кимберлитового тела. Применяли разные методики прямого ВСП: азимутальное ВСП из 6 азимутов и непродольное ВСП (НВСП) из системы разноудаленных пунктов возбуждения (ПВ). Кроме того, использовали обращенное ВСП при возбуждении колебаний в скважине спаркером и регистрации колебаний на земной поверхности. Для всех модификаций метода ВСП, использованных в работах, исследованы волновые сейсмические поля, полученные на каждой из компонент в локальных системах координат XYZ и PRT. После выделения продольных и обменных отраженных волн путем лучевой миграции были получены изображения среды в виде глубинных разрезов. Сопоставление между собой разрезов, полученных для разных азимутов и разных участков окрестностей кимберлитового тела, позволило сделать важные методические выводы. Установлено, что присутствие фрагментов кимберлитового тела проявляется на разрезах и в волновых сейсмических полях резким ухудшением прослеживаемости осей синфазности, расщеплением поперечных волн, а также появлением на глубинных разрезах сдвигов, предположительно свидетельствующих о наличии тектонических нарушений.

Введение

Значительная часть неразведанных территорий Якутской алмазоносной провинции перекрыта трапповыми отложениями, мощностью в десятки метров. Традиционные методы поиска и локализации кимберлитовых трубок – потенциальных источников алмазов – в таких условиях перестают работать, поэтому встает в полный рост задача выбора нового метода, информативного в описанных геологических условиях.

Одной из альтернатив представляется метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП), располагающий довольно обширным арсеналом разных модификаций, позволяющих взяться и за поиски алмазов.

Первые опытнo-методические работы методом ВСП, результаты которых освещаются ниже, были проведены в 2019 году на территории Ыгыаттинского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции в районе трубки Сюльдюкарской, открытой и изученной в

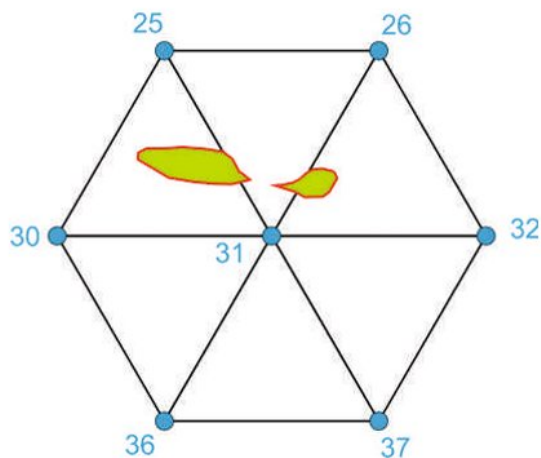
2015 году. Эта трубка, прорывающая карбонатные породы нижнего палеозоя и перекрытая песчаными отложениями верхнего палеозоя мощностью около 30–40 м, состоит из двух сопряженных блоков размерами порядка 40х100 и 30х40 метров. Зона рудопроявления наклонена с падением на север. В результате сейсморазведочных работ МОГТ-3D на трубке Сюльдюкарская была околонтурена зона, совпадающая, с учетом угла падения, с контурами кимберлитов, а также были выделены неконтрастные в других геофизических полях разнонаправленные малоамплитудные тектонические нарушения [1]. Перед работами ВСП основная ставка была сделана на выявление участков с хорошей корреляцией отражающих границ и граничащих с ними участков с плохой корреляцией, предположительно перспективных на кимберлиты.

В комплекс модификаций, выбранных для проведения описываемых работ, входили прямое и обращенное ВСП с

отработкой профильных и азимутальных систем наблюдений [2].

Методика работ

Схема расположения скважин и профилей относительно кимберлитового тела приведена на рис. 1. Скважины расположены по треугольной сетке, имитирующей разрабатываемый процесс поиска кимберлитовых трубок. По линиям между скважинами располагались либо наземные пункты приема (вертикальные сейсмоприемники), либо пункты возбуждения, в зависимости от тестируемой модификации ВСП. В ходе съемки получались сведения как по лучам, пересекающим кимберлитовое тело, так и по «пустым» лучам на южной половине изучаемой площадки, которые в данном случае выполняли роль контрольных.



▲ Рис. 1. Схема расположения скважин и профилей. Номерами указаны скважины.

Азимутальное ВСП было выполнено с целью опробования возможностей поиска объектов вокруг поисковой скважины и определения направления трещин во вмещающих породах. При этом зонд GStreamer-P размещали в центральной скважине 31. Прием колебаний осуществляли вдоль всего интервала скважины с шагом 4 м. Пункты возбуждения (ПВ) располагались на

поверхности вблизи скважин 25, 26, 30, 32, 36, 37. Таким образом, азимуты между соседними ПВ относительно регистрирующей скважины отличались на 60° . Общее количество азимутов составило 6. Возбуждение выполнялось посредством вертикального удара кувалдой по металлической плашке.

Непродольное ВСП выполнялось с целью изучения влияния на волновое поле кимберлитовых тел и зоны дробления вокруг них. Для всех скважин были получены сейсмограммы с наземных ПВ, располагавшихся с шагом 10 м по линиям между скважинами. Всего в работе использовалось одновременно до 4-х скважинных зондов GStreamer, размещенных в разных скважинах, что сокращало время съемки.

Обращенное ВСП выполнялось с целью повысить разрешающую способность исследований, так как сигнал, генерируемый спаркером, был в разы более высокочастотным, чем при возбуждении кувалдой. Возбуждение проводилось в каждой скважине электроискровым спаркером, а регистрация велась на поверхности вдоль линий между скважинами с шагом 5 м.

Для всех видов ВСП шаг исследований в скважине составлял 4 м как для ПВ, так и для ПП. Глубины скважин изменялись в диапазоне от 100 до 126 м.

Технические средства

В работах использовали зонды ВСП, погружные источники и источники питания для них, разработанные в ООО «Геодевайс». Кроме того, для возбуждения колебаний применяли строительную кувалду весом до 8 кг.

Электроискровой источник Pulse предназначен для возбуждения продольных волн в водонаполненных скважинах при выполнении межскважинного сей-

смического просвечивания (МСП) и ВСП. Работа источника Pulse обеспечивается накопителем энергии семейства Jack.

Накопитель Jack-5000HP3.0 генерирует короткий высоковольтный электрический импульс с энергией до 5 кДж, который обеспечивает формирование ионизированных парогазовых полостей высокого давления на электродной группе электроискрового источника Pulse, помещенной в контейнер с солёной водой.

Регистрацию колебаний проводили геофонами GS-20DX с собственной частотой 10 Гц (производство ООО «Геоспейс Технолджис Евразия», г. Уфа). Они обладают частотной характеристикой, обеспечивающей равномерность в полосе частот 10-250 Гц. Помимо них, при полевой съемке применялись более современные геофоны GS-One, обладающие значительно большей чувствительностью, чем GS-20DX.

Трёхкомпонентный зонд GStreamer-P предназначен для выполнения работ ВСП и межскважинного сейсмического просвечивания. Количество модулей в зонде – 8. В качестве чувствительных элементов в каждом модуле используется три ортогонально расположенных геофона GS-One. Прижим модулей обеспечивался посредством раздувания пневматической линии, воздействующей на прижимной рычаг каждого прибора зонда.

В качестве регистрирующей аппаратуры для производства сейсморазведочных работ использовали 96-канальные сейсмостанции ЭЛЛИСС-3 (производство ООО «Геосигнал», г. Москва).

Обработка и интерпретация данных

Граф обработки включал следующие процедуры: ориентацию трехкомпонентных записей по прямой продольной

волне; разделение волн по направлениям подхода; миграцию записей волн разного типа и класса с использованием ориентированных компонент в системах координат X, Y и Z, а также P, R и T; миграцию трехкомпонентных записей по следящей компоненте отраженных волн. Для увязки волн на сейсмограммах ВСП и глубинных разрезах, полученных путем миграции, в интерактивном режиме использовали систему «двух курсоров», позволяющую отождествлять на мониторе фрагменты волнового поля и разреза.

Особенности волновых полей в разных модификациях метода ВСП

Азимутальное ВСП. При предварительной обработке записей, полученных в скв. 31 из разных ПВ, расположенных на практически одинаковых расстояниях, равных 250 м от исследуемой скважины, оказалось возможным связать изменения волновых полей не с изменением выноса ПВ, а с изменением условий формирования волн.

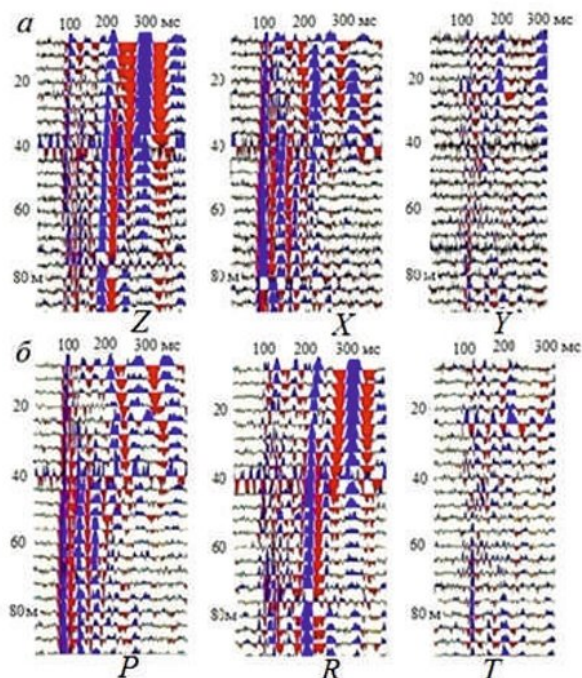
На рис. 2 показаны волновые поля, полученные в локальных системах координат XYZ и PRT с ПВ25, расположенного вблизи скв.25.

Можно видеть, что на компонентах Y и T наблюдаются одни и те же особенности: резкое ослабление интенсивности проходящей продольной волны и невысокий уровень низкочастотных волн с субвертикальными осями синфазности, прослеживаемых в верхних 40 м скважины. Эти волны могут быть результатом расщепления более интенсивных поперечных волн, регистрируемых на близких временах на компонентах Z и P, а также X и R. Не исключено, что отчасти они представляют собой поверхностные волны Лява, затухающие с глубиной. Наиболее сильными на компонентах Z и R выглядят волны, предположительно связанные с

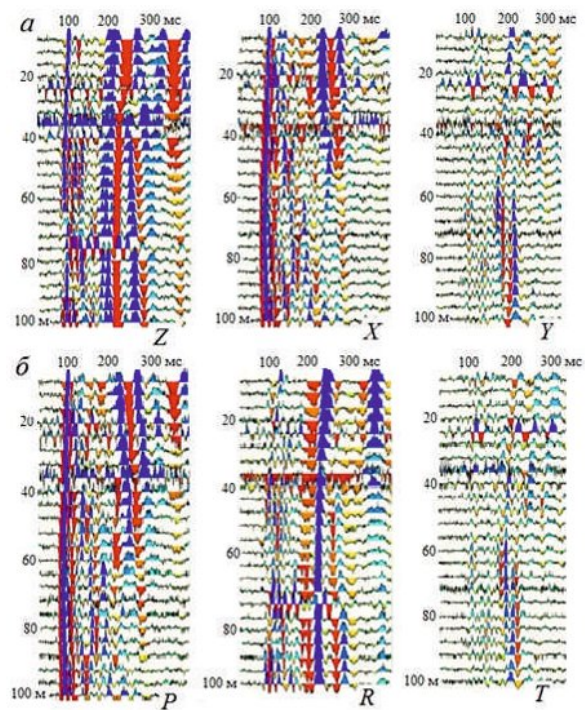
отражениями от границ ниже забоя. Прямая продольная волна одинаково интенсивной является на компонентах X и P, что вполне согласуется с теорией.

На рис. 3 показаны волновые поля, полученные в локальных системах координат XYZ и PRT с ПВ26, расположенного вблизи скв.26. Наиболее существенным отличием волновых полей с данного ПВ от волнового поля с ПВ25, описанного выше, состоит в резком усилении низкочастотных, предположительно поперечных, волн на компонентах R и T. Существенно, что в нижней половине вертикального профиля на компонентах Y и T эти волны преобладают по интенсивности. В остальном волновые поля с ПВ25 и ПВ26 сходны между собой.

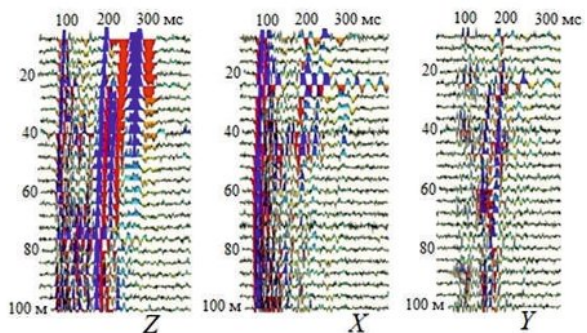
На рис. 4 показаны волновые поля, полученные с ПВ30, расположенного вблизи скв.30. Видно, что с ПВ30 поперечные волны на Y-компоненте прослеживаются практически вдоль всего вертикального профиля. При этом их интенсивность стала выше, чем на ком-



▲ Рис. 2. Волновые поля на компонентах XYZ (а) и PRT (б), наблюдаемые в скв. 31 с ПВ25.



▲ Рис. 3. Волновые поля на компонентах XYZ (а) и PRT (б), наблюдаемые в скв. 31 с ПВ26.



▲ Рис. 4. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ30.

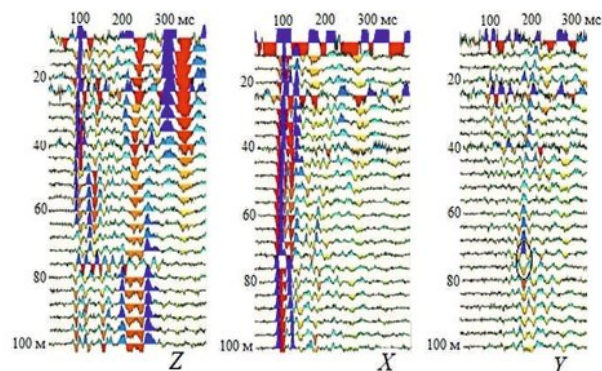
поненте X. Становится возможным фазовое прослеживание поперечных волн на Y-компоненте. Оказывается, что их спектральный состав выше, чем у близких по временам регистрации поперечных волн на компоненте R, а время прихода – заметно меньше. Это приводит к выводу о том, что на Y-компоненте регистрируется более быстрая и более высокочастотная поперечная волна по сравнению с поперечной волной на R-компоненте. Таким образом, имеет место расщепление попереч-

ных волн на две волны – быструю и медленную. При этом быстрая волна поляризована, как известно, в плоскостях симметрии, в данном случае ими могут быть субвертикальные трещины.

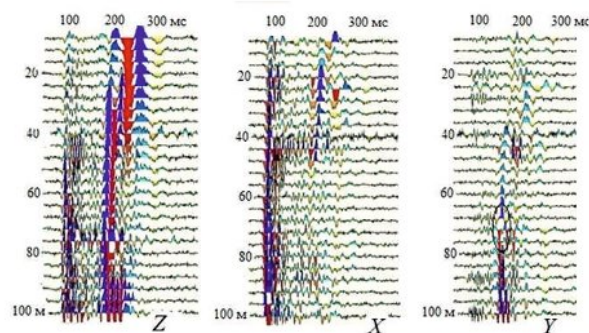
При переходе к ПВ32 (рис. 5) прослеживаемость поперечной волны на Y-компоненте улучшается, она отчетливо протягивается вдоль всего вертикального профиля, при этом количество фаз в волне уменьшается. В интервале глубин 72-76 м наблюдается смена полярности SH-волны. Причина этого состоит, возможно, в различии направления подхода SH-волн в разных частях вертикального профиля, обусловленном механизмом расщепления поперечной волны в сложно построенной среде. Все другие особенности волнового поля аналогичны описанным выше, с других ПВ.

При возбуждении колебаний с ПВ36 (рис. 6) поперечная волна, наблюдаемая на Y-компоненте, в нижней половине вертикального профиля становится гораздо сильнее, чем в верхней его части. Полярность волны в интервале глубин 68-72 м становится противоположной. С ПВ32 аналогичный эффект уже наблюдался, причина этого, вероятно, такая же.

Волновые поля, наблюдаемые с ПВ37 (рис. 7), в средней части вертикального



▲ Рис. 5. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ32. Овалом показана область смены полярности волны на у-компоненте.

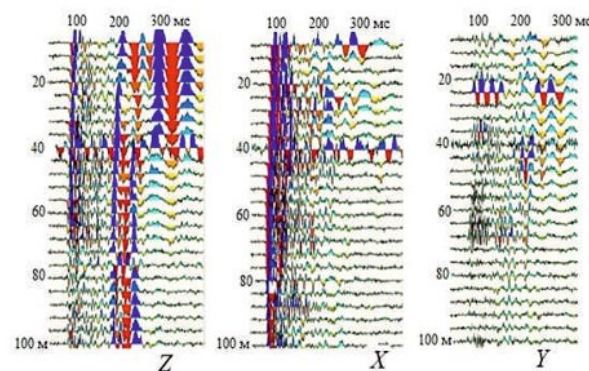


▲ Рис. 6. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ36. Овалом показана область смены полярности волны на у-компоненте.

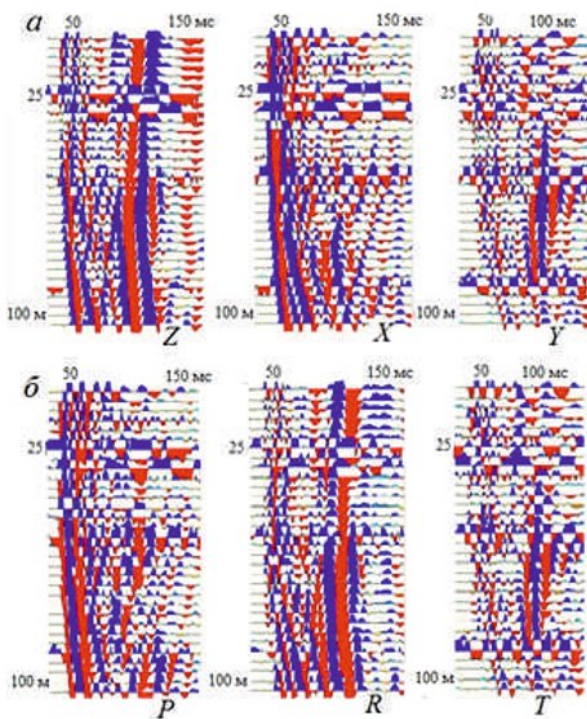
профиля (в интервале глубин 36-68 м) искажены высокочастотными многофазными колебаниями. Скорее всего, это помехи технического характера, вызванные паразитными колебаниями скважинных приборов, плохо прижатых к стенке скважины. На Z-компоненте уровень этих помех невелик, а регулярные волны прослеживаются довольно отчетливо, также как и с ПВ36.

Скв. 25 была отработана с пунктов возбуждения (ПВ), расположенных в направлении на скв. 31. На рис. 8 приведены примеры волновых полей для удаления ПВ, равного 112 м.

Основные особенности этих волновых полей состоят в следующем. На Y- и T-компоненте глубже 30 м прослеживается довольно интенсивная поперечная волна, близкая по времени регистрации к более сильной поперечной волне,



▲ Рис. 7. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ37.

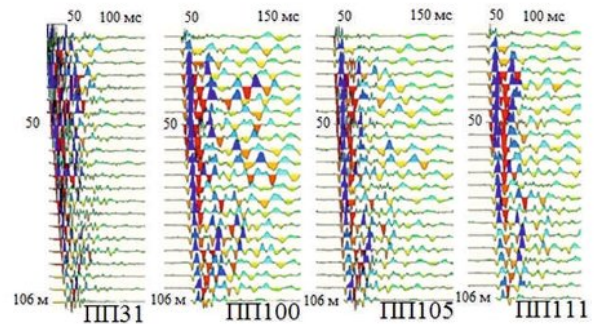


▲ Рис. 8. Волновые поля на компонентах XYZ (а) и PRT (б), наблюдаемые при ВСП в скв. 25 из ПВ112.

наблюдаемой на компонентах Z и R. На Z- и X-компонентах на фоне падающих волн уверенно намечаются продольные и обменные отраженные волны, приуроченные к границам, расположенным выше и ниже забоя скважины. Кроме того, на X- и R-компонентах наблюдаются обменные проходящие PS-волны с обменом P-волны на S-волну на глубине около 50 м. Обменные отраженные волны на компоненте X прослеживаются лучше, чем на компоненте R.

Обращенное ВСП

При возбуждении колебаний в скв. 26 пункты приема (ПП) были расположены в направлении на скв. 31. На рис. 9 приведены примеры волновых полей для разных удалений ПП – 31 м, 100 м, 105 м и 111 м. На фоне слабо регулярных волн можно уверенно проследить отраженные волны, приуроченные к границам, расположенным в нижней части скважины и под ее забоем. Однако прослежива-



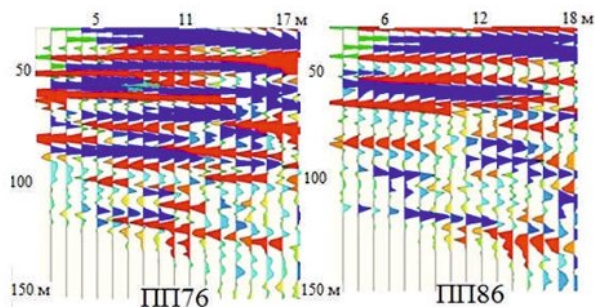
▲ Рис. 9. Сейсмограммы обращенного ВСП в скв. 26 для разных пунктов приема.

ются эти отражения лишь в нижней части вертикального профиля.

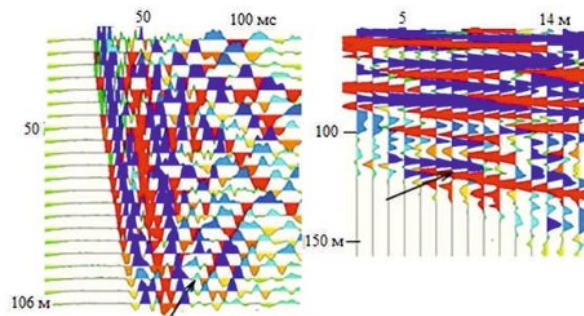
Формирование изображений среды

Для формирования изображений среды путем лучевой миграции использовали отраженные продольные и отраженные обменные PS-волны.

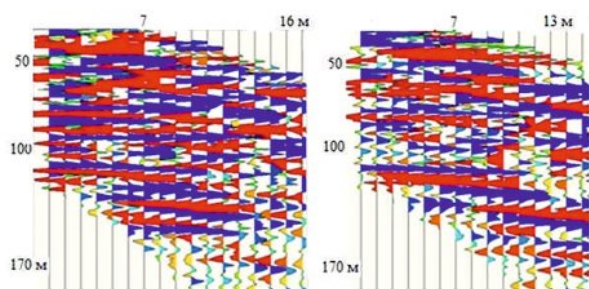
При обращенном ВСП миграцию выполняли по каждому пункту приема (ПП) после подавления падающих волн. Глубинные разрезы, полученные для разных ПП на продольных отраженных волнах в скв. 26, похожи между собой (рис. 10): выше 100 м границы на разрезах залегают субгоризонтально, а на больших глубинах – с резким наклоном в сторону от скважины. Эти наклонные границы вызвали большое сомнение в части их достоверности. В итоге был сделан обоснованный вывод о том, что это ложные границы, сформированные обменными отраженными волнами. На рис. 11 стрелками показаны обменные отраженные волны на сейсмограмме ВСП и ложные наклонные границы, полученные при миграции записей на отраженных продольных волнах. Миграция тех же записей на обменных отраженных волнах устраняет эти ложные границы с глубинных разрезов (рис. 12): наклоны глубоких границ в направлении от скважины сохраняются, однако величина углов наклона существенно мень-



▲ Рис. 10. Глубинные разрезы на отраженных РР-волнах при обращенном ВСП в скв. 26, ПП76 и ПП86.



▲ Рис. 11. Пример формирования ложных границ из РS-волн. Стрелками на сейсмограмме слева показаны обменные отраженные волны, а справа – ложные границы скв. 26, ПП76.

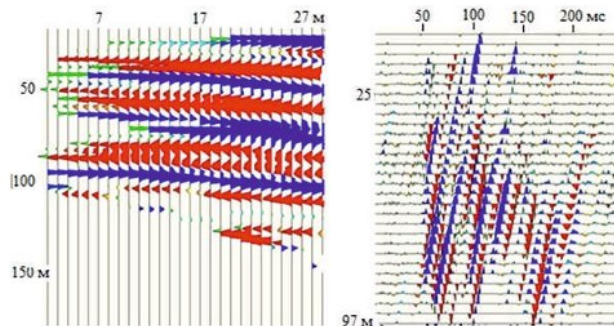


▲ Рис. 12. Глубинные разрезы на отраженных РS-волнах при обращенном ВСП в скв. 26, ПП76 (слева) и ПП86 (справа).

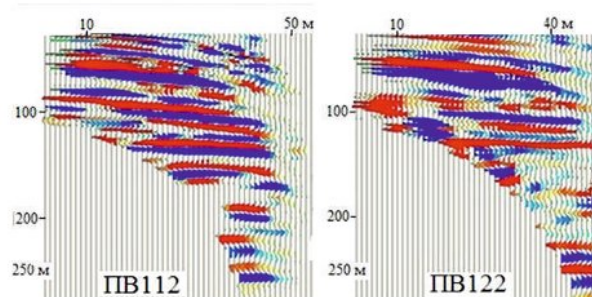
ше. Сходные результаты получены на РS-волнах в скв. 37.

Изображения среды при прямом ВСП.

На рис. 13 показаны сейсмограмма ВСП с выделенными продольными отраженными волнами и глубинный разрез, полученный путем лучевой



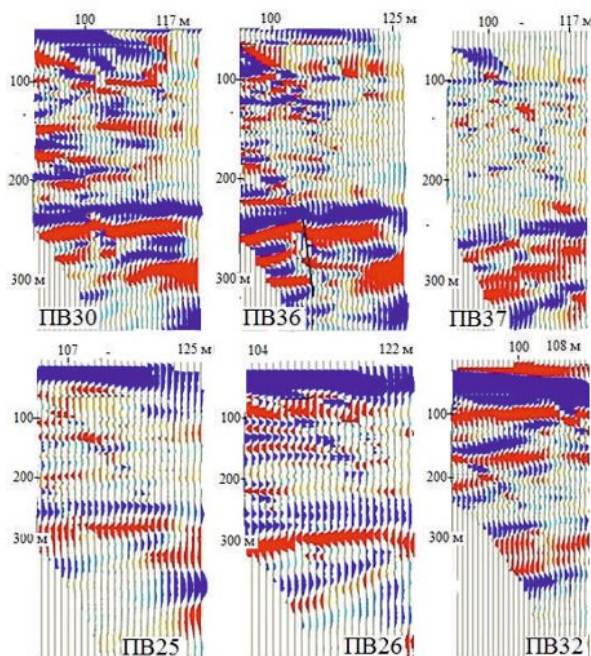
▲ Рис. 13. Глубинный разрез НВСП на РР-волнах (слева) и сейсмограмма НВСП с выделенными восходящими волнами (справа). Скв. 25, ПВ132.



▲ Рис. 14. Глубинные разрезы НВСП по РР-волнам, полученные при НВСП в скв. 25.

миграции этой сейсмограммы. Этот результат получен при обработке скв. 25 с ПВ132, расположенного на расстоянии 132 м в направлении скв. 31. Можно видеть, что границы в покрывающей толще залегают субгоризонтально, с небольшим наклоном в сторону от скважины. Глубинные разрезы, полученные при разных выносах ПВ, сравнимы между собой по качеству и информативности (рис. 14).

На рис. 15 представлены примеры глубинных разрезов, полученных при азимутальном ВСП на Z-компоненте в скв.31 с ПВ, расположенных вблизи скважин 30, 36, 37, 25, 26 и 32. Можно видеть, что залегание границ в пределах исследованной толщи субгоризонтальное, но при этом вполне уверенно намечаются тектонические нарушения (одно из них указано на разрезе, полученном с ПВ36). Эти разрезы были получены при миграции записей на Z-компоненте.



▲ Рис. 15. Глубинные разрезы на продольных отраженных волнах, полученные в скв. 31 с разных ПВ.

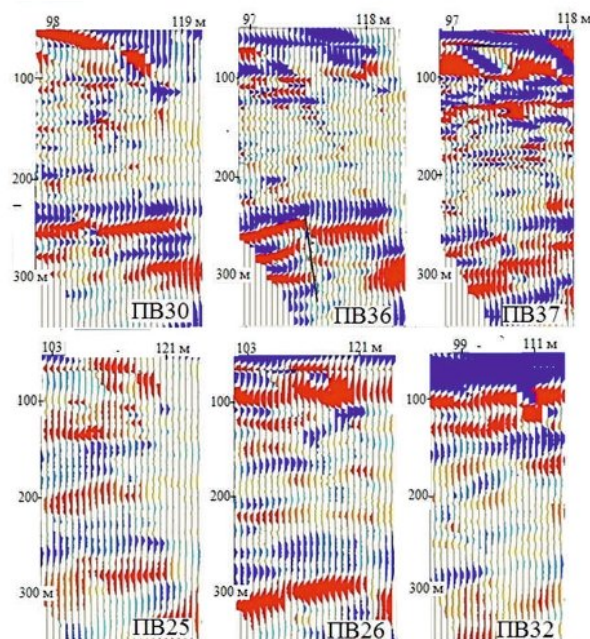
Приведенные в нижнем ряду на этом же рисунке глубинные разрезы с ПВ25, ПВ26 и ПВ32 по качеству гораздо ниже, наверняка из-за расположения линий ПВ-скважина через тело кимберлита.

Аналогичные результаты наблюдаются при миграции на продольных отраженных волнах по следящей компоненте (см. рис. 16, где расположение глубинных разрезов аналогичное).

Изменения кинематических параметров при азимутальных наблюдениях

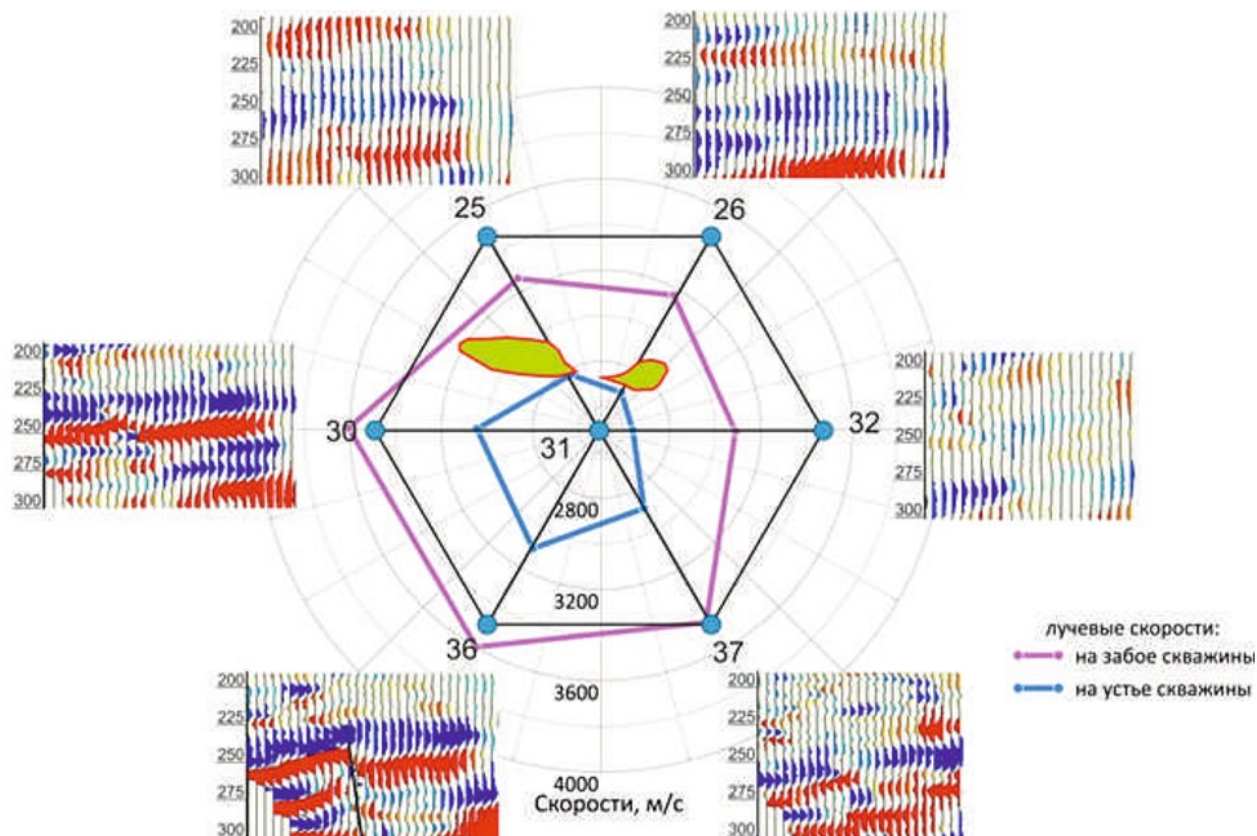
Выше при рассмотрении волновых полей азимутального (кругового) ВСП в скв. 31 были детально описаны особенности поляризации волн, представляющие интерес при решении вопроса о направлении преобладающей трещиноватости окружающей среды. Полученные в скв.31 записи были использованы также для изучения изменения лучевых скоростей вокруг исследуемой скважины.

Годографы первых вступлений, полученные с каждого из ПВ, уверенно разби-



▲ Рис. 16. Глубинные разрезы на продольных отраженных волнах, полученные на следящей компоненте в скв. 31 с разных ПВ.

ваются на две группы. Рассчитанные по этим годографам лучевые скорости позволили получить диаграмму, аналогичную «розе трещиноватости» (рис. 17). Эта диаграмма имеет резко асимметричный вид: минимум лучевых скоростей наблюдается в направлении на северо-восток от скв.31. Это направление связано, очевидно, с тектоническими нарушениями в покрывающей толще и разуплотнением среды. Минимальную скорость на такой диаграмме предположительно можно связывать с направлением, ортогональным к плоскостям преобладающей трещиноватости. В этом же примерно направлении наблюдается минимум интенсивности поперечных волн, регистрируемых на побочной (т.е. тангенциальной) компоненте, в наших обозначениях – это компоненты Т и Y. В этих же направлениях отмечается потеря корреляции отражений в сейсмограммах отраженных волн азимутального ВСП.



▲ Рис. 17. Диаграммы лучевых скоростей и глубинные разрезы азимутального ВСП на отраженных РР-волнах.

Выводы

1. Впервые проведенные в Якутской алмазоносной провинции в районе трубки Сюльдюкарской работы в модификациях прямого и обращенного ВСП позволили положительно оценить информативность метода при исследованиях в условиях месторождения кимберлитов.

2. Кимберлитовые тела в волновом сейсмическом поле, наблюдаемом в методе ВСП, проявляют себя в виде резкого нарушения корреляции волн, расщеплении поперечных волн и сильной зависимости поляризации поперечных волн от интервала наблюдений в скважине.

3. На глубинных разрезах НВСП, полученных на продольных и обменных отраженных волнах, присутствие кимберлитовых тел проявляется резким

ухудшением корреляции сейсмических границ, угловыми несогласиями, а также присутствием тектонических нарушений.

4. Полученные результаты свидетельствуют о взаимосвязи расщепления поперечных волн с моделью среды, которая существенно меняется с глубиной.

Выполненные опытно-методические работы ВСП позволили дополнить сведения о кимберлитовой трубке Сюльдюкарская: по всей видимости на глубинах более 150 м (глубина бурения) тело уходит на восток, что обуславливает потерю корреляции отраженных волн и резкое понижение лучевых скоростей в направлении на скв. 32.

Литература

1. Бояров В.М., Гончаров Е.М., Егоров Г.С. Результаты применения высокоразрешающей сейсморазведки 3D на кимберлитовых телах Якутской алмазоносной провинции// Инженерная и рудная геофизика 2018 — Алматы, Казахстан, 23-27 апреля 2018 г.

2. Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование. - М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2017. - 284 с.

Подробнее об авторах



Ошкин
Александр Николаевич

К. ф.-м. н, ассистент
Геологического факультета
МГУ имени М. В. Ломоносова,
Гендиректор ООО "Неоген".



Шехтман
Григорий Аронович

Д. т. н., ведущий научный
сотрудник Института
инновационных
инженерных технологий
РУДН.



Игнатьев
Владимир Иванович

Коммерческий директор
ООО "Геодевайс".



Гончаров
Евгений Михайлович

Начальник отдела
экспертизы и методологии
Управления минерально-
сырьевой базы
АК "АЛРОСА" (ПАО).

Рекорды производительности на объекте 3D в Джимсаре (уезд в Чанцзи-Хуэйский автономный округ СУАР, КНР) с интеллектуальным сейсмическим датчиком SmartSolo.

■ Youli An, главный геофизик, DTCC

В ноябре 2019 года начаты работы на объекте сейсморазведки 3D в Джимсаре. Партия исполнителя проекта использовала в работе 53 000 интеллектуальных сейсмических датчиков SmartSolo. В активной расстановке было 18 000 каналов – 30 приемных линий с максимальным удалением 8 729 метров.

Общая площадь исследования составила 1289,98 км², площадь проектной кратности - 677,36 км². Общее количество пунктов возбуждения - 518258. Возбуждение осуществлялось несколькими группами виброустановок (всего на объекте было использовано 15 источников EV56) работавших по системе SLEEP-Sweeper. Вся работа продолжалась 72 дня.

Благодаря применению большого количества одиночных датчиков, средняя суточная производительность на проекте составила 7198 фн. При этом максимальной производительности, которой удалось достигнуть была 9 200 фн в сутки.

Джимсар расположен в восточной части северного подножия гор Тянь-Шань в Синьцзян-Уйгурском автономном районе. Климат умеренно-континентальный с коротким и жарким летом и долгой и суровой зимой. Во время выполнения работ температура колебалась от нуля до минус тридцати градусов Цельсия.

На площади исследования были: крестьянские наделы, общественные леса, пустыни, луга и водохранилища. Особое внимание уделялось закладке сейсмоприемника с погружением максимально глубоко и тщательно. Уже в



▲ Рис. 1. SmartSolo размещается на льду и сельхозугодьях.

декабре на водохранилище и заболоченной части территории сформировался лед. Для установки оборудования использовались ручные электробуры, позволявшие готовить отверстия для сейсмодатчиков.

Вес одного прибора составляет 1,1 кг, что позволяет одному рабочему переносить до 20 приемников, обеспечивая их надежную установку.

Интеллектуальный сейсмический датчик SmartSolo имеет раздельный дизайн. Основной корпус и батарейный блок могут быть разделены, зарядка аккумулятора и загрузка могут выполняться одновременно, что повышает эффективность работы, экономя время.



▲ Рис. 2. Слева-направо: обрабатываемые земли; водохранилище; болото.

Ежедневно переустанавливалось 4500-5000 датчиков, одновременно меняя аккумуляторные батареи и скачивая сейсмические данные, формируя сейсмограммы и анализируя полученный материал. Работа с таким количеством оборудования завершалась в течение 5 часов, что позволяло устанавливать весь объем интеллектуальных датчиков в те же сутки. После загрузки данных специалисты SmartSolo проводили работу по разбивке данных в соответствии с SPS, проверяя данные ПВ и параметры регистрации, чтобы убедиться в работоспособности всех датчиков и отсутствии пропусков регистрации.

Небольшие габариты и небольшой вес, интеллектуального датчика SmartSolo не

только повышает скорость размещения и переустановки оборудования, обеспечивая конвейерность съемки, но и снижает риски HSE. Отсутствие кабеля предотвращает электромагнитные помехи, вызванные утечкой на кабеле.

В зависимости от рельефа и условий размещения датчиков, использовалось смещение и сгущение точек приема. Особое внимание при сборе данных и контроле качества уделялось именно этим зонам, где получение материала могло быть осложнено

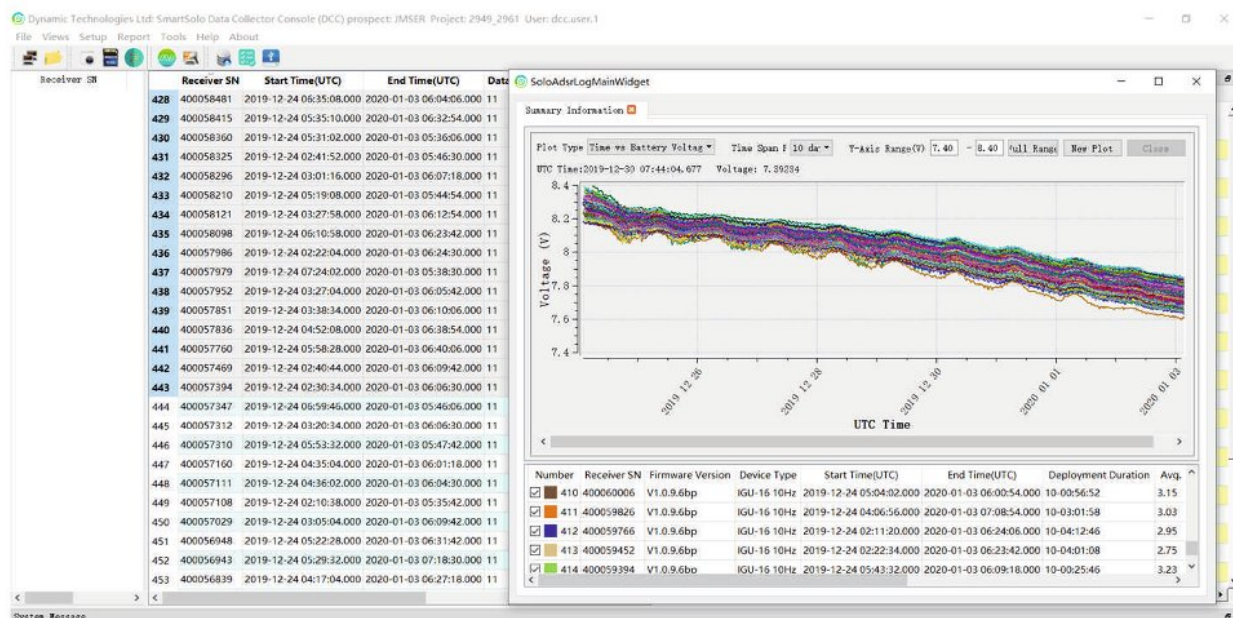
Объект сейсморазведки 3D в Джимсаре в 2019 году является первым объектом SmartSolo, который выполненным в северном Китае.



▲ Рис. 3. Станция сбора, упавшая в ледяную пещеру, была восстановлена и снова развернута на льду.



▲ Рис. 4. Условия эксплуатации периферийных устройств SmartSolo.



▲ Рис. 5. Специалисты SmartSolo завершают разбивку данных в соответствии с SPS.

О компании Dynamic Technologies (DTCC)

DTCC является международным высокотехнологичным предприятием, специализирующимся на продукции сейсмического оборудования мирового класса. Она объединяет исследования, производство и продажу сейсмического оборудования позволяя выполнять объекты высокой плотности.

DTCC был основан в 1999 году в Канаде. Штаб-квартира компании и центр исследований и находятся в Шэньчжэне. Центры маркетинга и технического обслуживания расположены в Пекине и Северной Америке, а две производственные базы расположены в Дунгуане, Гуандуне в Китае.

Основные продукты DTCC серии SmartSolo включают IGU-16, IGU-16HR 3C, IGU-BD3C-5 и IAU-19, интеллектуальный модуль внешней сейсмической съемки, запущенный в 2019 году, который может использоваться в любой среде.

Продукты и услуги DTCC были использованы более чем в 40 странах мира при реализации сейсморазведочных проектов, обслуживая глобальных гигантов геофизической индустрии. DTCC является партнером BGP - первого предприятия на рынке сейсморазведочных исследований, на долю которого приходится 80% мирового рынка интеллектуального оборудования для сейсморазведки в мире.

Контроль качества в современных бескабельных регистрирующих системах

- Абдулвалиев М.Т., технический директор НТЦ, ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Тиссен А.П., вице-президент по науке ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Череповский А.В., главный специалист НТЦ, ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»

В последние 10-12 лет бескабельные системы регистрации всё шире применяются при наземных сейсмических исследованиях, особенно в Западном полушарии и в Австралии. В России кабельные регистрирующие системы по-прежнему доминируют, и это связано не только с природно-климатическими условиями, но и с консервативным отношением Заказчиков сейсморазведочных работ к контролю качества сейсмических данных в реальном времени. Несмотря на то, что в последние десятилетия сейсморазведка пережила несколько технологических революций, благодаря которым количество регистрируемых каналов и плотность наблюдений (в количестве трасс на 1 кв.км съемки 3D) увеличились на два-три порядка, критерии приемки исходных данных и оценки их качества до сих пор не пересмотрены, что тормозит дальнейшее развитие наземной сейсморазведки и снижает ее экономическую эффективность. В статье анализируются различные подходы к контролю качества в современных бескабельных системах.

Введение

Как известно, сейсмические исследования, как эффективное средство поисков и разведки месторождений полезных ископаемых в осадочном чехле, начали выполняться еще в 20-е и 30-е годы прошлого века. За десятки лет скачкообразного развития наземной сейсморазведки был разработан и внедрен в производство целый ряд методов и технологий полевых работ, к важнейшим из которых можно отнести цифровую регистрацию данных, методику общей глубинной точки (МОГТ), площадные системы наблюдения (3D), многоволновую сейсморазведку (МВС) и т.д. [3]. Наиболее быстро растущим показателем было количество каналов, регистрируемых одной сеймостанцией. К началу нашего столетия этот показатель вырос от нескольких десятков до нескольких тысяч, а на отдельных проектах — до нескольких десятков тысяч. В последние три-четыре года тенденция к повышению плотности наблюдений 3D только усиливалась, и перспектива применения до 1 миллиона каналов в одной наземной мега-партии становилась все реальнее [4].

Соответственно, общая длина соединительных кабелей для передачи сейсмических данных неуклонно увеличивалась и достигала сотен км. Логистика в мега-партиях (или сверхмногоканальных партиях) стала очень сложной, поскольку общий вес наземной электроники измерялся десятками тонн, а для ее перевозки, установки и поддержания функционирования были необходимы сотни людей и тяжелые транспортные средства, что ограничивало производительность полевых работ и приводило к высоким операционным затратам.

Разработка бескабельных регистрирующих систем стала очередной технологической революцией, открывшей широкие возможности не только для снижения веса наземной электроники и сокращения численности наземных сеймопартий, но и для принципиального пересмотра традиционных методик полевых работ и критериев оценки качества исходных данных. В первую очередь, переход на бескабельную регистрацию сейсмических данных стал возможен благодаря появлению дешёвых и высокочувствительных приёмников сигналов глобальных навигационных

спутниковых систем (ГНСС), среди которых наибольшей популярностью обладает американская GPS и российская ГЛОНАСС. При этом ГНСС-приёмники в автономных модулях бескабельных систем, как правило, предназначены не для определения координат (поскольку точность, требуемая для сейсморазведочных работ, обеспечивается дифференциальной спутниковой системой, такой как DGPS), а для синхронизации записываемых отсчётов сейсмических трасс. Это ключевой момент, который открыл дорогу автономной регистрации данных с использованием неограниченного количества каналов.

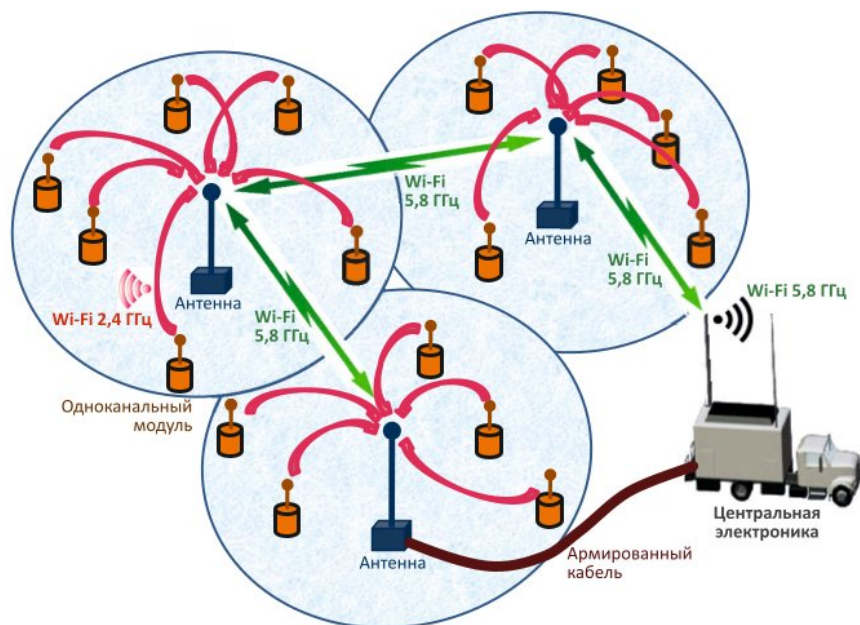
Радио вместо кабелей?

Конструкторы первых бескабельных систем стремились сохранить главное преимущество кабельных регистрирующих систем, а именно возможность передачи сейсмических данных в реальном времени на «центральную электронику», где оператор или супервайзер могли вручную или с помощью автомати-

зированных программных средств оценить качество каждой исходной сейсмограммы и, если нужно, внести коррективы в ход сейсморазведочных работ.

Для беспроводной передачи сейсмических данных предпочтение было отдано сетям на основе технологии Wi-Fi, использующей гигагерцовые частоты. Такой подход к сбору данных, впервые предложенный в 2002 году шотландской компанией VibTech, назвали «сотовой сейсмикой» [8]. Предполагалось, что антенны, поставленные с определенным шагом в пределах приемной расстановки, будут собирать данные в своих «сотах» на частоте 2,4 ГГц, а затем передавать накопленные массивы данных – но уже на частоте 5,8 ГГц, обладающей гораздо более высокой пропускной способностью, – на центральную электронику (рис.1). Необходимо отметить, что из-за ограниченного радиуса действия технологии Wi-Fi, на площади работ 3D необходимо устанавливать и перемещать десятки антенн и источники

▼ Рис. 1. Схема беспроводной передачи данных в реальном времени по технологии «сотовая сейсмика». Для передачи больших массивов данных может использоваться как Wi-Fi на частоте 5,8 ГГц, так и армированные кабели.



их питания, что требует привлечения дополнительного персонала с соответствующей квалификацией.

Кроме того, в условиях гористой и лесистой местности радиус надежной радиосвязи в гигагерцовом диапазоне очень трудно спрогнозировать перед началом полевых работ. Чтобы избежать потери времени на подбор шага установки антенн способом «проб и ошибок» непосредственно в ходе выполнения полевых работ, нужен подготовительный этап, на котором тщательно изучаются возможные помехи для радиосвязи и выделяются основные типы препятствий (леса и парки, города и деревни, сельскохозяйственные угодья, эстакады и мосты), их контуры и средняя высота. Для построения точной цифровой модели местности и районирования радиопомех может понадобиться воздушная съёмка LIDAR (оптико-механическое сканирование местности лазерным излучением).

Важен также правовой аспект, мало обсуждаемый в геофизической литературе. Если во многих странах можно беспрепятственно создавать сети Wi-Fi там, где новые пользователи не мешают ранее зарегистрированным пользователям и экстренным службам (скорая помощь, пожарная служба и т.п.), то в Российской Федерации на организацию сетей Wi-Fi за пределами зданий и производственных территорий накладываются серьёзные ограничения. Решение Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) от 29 февраля 2016 г. № 16-36-03 позволяет использовать оборудование беспроводных локальных сетей малого радиуса действия стандартов IEEE 802.11b, 802.11g, 802.11n с эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью (ЭИИМ) не более 100 мВт вне закрытых помещений в диапазоне частот 2400-2483,5 МГц без оформления отдельных решений ГКРЧ и разрешений на исполь-

зование радиочастот или радиочастотных каналов. Однако требуется зарегистрировать используемые радиоэлектронные средства (РЭС) в том случае, если высота установки РЭС превышает 10 м от поверхности земли. В каждом федеральном округе России имеется филиал Радиочастотного центра, который обеспечивает надлежащее использование радиочастотных каналов, радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств гражданского назначения.

Наиболее известными бескабельными системами, пригодными для «сотовой» сейсмологии, являются UNITE компании Sercel и Hawk компании Inova. Хотя эти регистрирующие системы применялись при выполнении десятков небольших производственных съёмок 3D, главным образом в Северной Америке, Великобритании и Австралии, радиотелеметрия не доказала своих преимуществ перед традиционными кабельными системами, особенно при выполнении крупных съёмок 3D. Несмотря на спад интереса к «сотовой сейсмологии» в последние годы, такой подход заложен в новой нодальной бескабельной системе RT3, разработанной компанией Wireless Seismic и ориентированной на выполнение высокоплотных проектов 3D с сокращённым интервалом между каналами (не более 25 м).

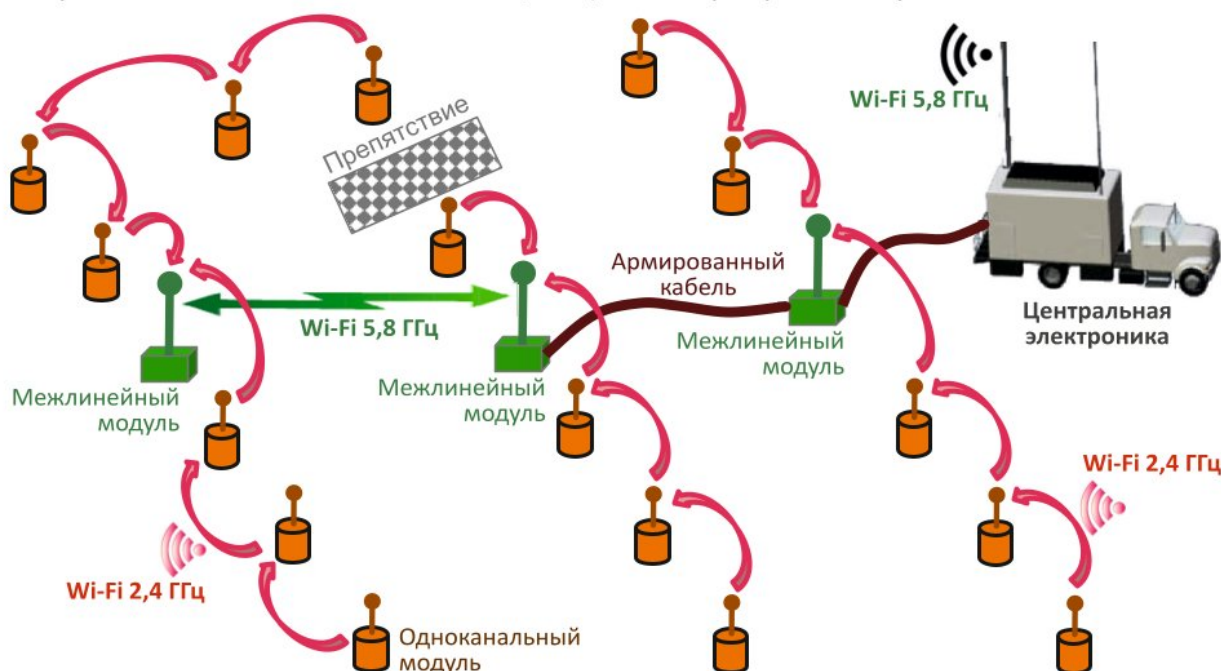
Особняком стоит радиотелеметрическая бескабельная система METIS, которая разрабатывается компанией Wireless Seismic по заказу нефтяной компании Total [7]. Модули DART этой бескабельной системы предполагается сбрасывать с мультикоптеров, зависающих над соответствующими пунктами приёма, а для передачи данных и «статусов» планируется использовать «радио нового поколения», обеспечивающее надёжную связь в условиях густой растительности или пересечённого рельефа.

Уже эксплуатируемые в настоящее время бескабельные системы RT2 компании Wireless Seismic и SCOUT-HT компании СКБ СП работают по другому принципу: в ней конструкторы прибегли к последовательной передаче данных от модуля к модулю по технологии Wi-Fi на частоте 2,4 ГГц. По сути, это радиорелейная связь, которая по определению не может обеспечить режим реального времени из-за ретрансляции постепенно увеличивающегося массива сейсмических данных. Массивы данных, накопленные на каждой линии приема, далее передаются на центральную электронику либо с помощью направленных антенн (на частоте 5,8 ГГц), либо по поперечному оптоволоконному кабелю, как в случае традиционной кабельной сейсморазведки (рис.2). Расчеты показывают, что общая задержка передачи данных на центральную электронику при количестве активных каналов от 5 до 10 тысяч и при межлинейной бескабельной передаче может составлять несколько минут, что неприемлемо для партий 3D с высо-

копроизводительными вибрационными и импульсными источниками. Кроме того, для ретрансляции накопленных массивов данных между линиями приема необходимо устанавливать высокие направленные антенны (7-8 метров и выше) с тремя-четырьмя фиксирующими растяжками, что довольно затруднительно в условиях узких просек и глубокого снежного покрова. Растяжки охватывают большую площадь и создают препятствия для проезда техники и прохода людей.

Неуклонное увеличение количества регистрируемых каналов при высокоплотных съемках 3D, многократное повышение кратности ОГТ и плотности трасс на 1 кв.км в результирующих массивах данных привели к тому, что традиционный контроль качества каждой исходной сейсмограммы на деле обесценился или даже потерял смысл. Действительно, визуальный контроль исходных данных совершенно невозможен в высокопроизводительных мега-партиях, где каждые 10 секунд регистрируется 20, 50 или даже

▼ Рис.2. Схема беспроводной передачи данных от модуля к модулю с использованием технологии Wi-Fi на частоте 2,4 ГГц. Накопленные массивы данных могут передаваться по Wi-Fi на частоте 5,8 ГГц или по армированному кабелю.



100 тысяч каналов. Это прежде всего справедливо для вибропартий, работающих по таким методикам как Slip-Sweep, HFVS и ISS, при которых исходные записи частично или полностью перекрываются во времени, и привычный контроль качества таких полевых материалов невозможен.

Что касается автоматизированных средств контроля качества исходных данных – таких как расчет средней или доминирующей частоты записи в заданном временном окне или расчет среднеквадратических амплитуд записи в одном или нескольких временных окнах (и, как опция, оценка затухания энергии сейсмической записи) – то они способны обнаружить аномальные записи в реальном времени, но... остановка партии и повторная отработка бракованного пункта возбуждения будет вряд ли целесообразной. Как показано при производственных вибросейсмических работах на Северном склоне Аляски, где в 2012 году плотность наблюдений была повышена в 6 раз и впервые превысила 3 миллиона трасс на кв. км, хорошее пространственное квантование волнового поля позволяет эффективно применять процедуры шумоподавления [9]. Даже такие интенсивные помехи, как морозобойные трещины и шум от вездеходов легко отфильтровываются на этапе обработки с помощью различных сортировок данных, при которых упомянутые помехи выглядят как случайные во времени и/или в пространстве.

Слепая регистрация сейсмических данных

Описанные выше ограничения и трудности с достижением устойчивой радиосвязи в гигагерцовом диапазоне, особенно в условиях пересечённого рельефа местности и густого и высокого леса, натолкнули конструкторов на

мысль отказаться от передачи сейсмических данных в реальном времени. Высокая надёжность современных автономных регистрирующих систем позволяет выполнять «слепые» сейсмические съёмки 3D при полном отсутствии беспроводной связи. Но в этом случае супервайзеры заказчика и сами исполнители полевых работ ничего не знают о состоянии вынесенных на профили автономных модулей (нодов) и не получают сейсмических данных для контроля качества в реальном времени.

Полный отказ от радиосвязи позволил разработать более дешёвые и более компактные бескабельные регистрирующие системы, такие как GSR/GSX компании Geospace Technologies, ZLand компании FairfieldNodal и SmartSolo компании DTCC, которые и стали наиболее востребованными в Западном полушарии и в Австралии в последние годы. Многолетний опыт эксплуатации этих «слепых» систем показал, что доля вышедших из строя каналов не превышает 1%. К этому же классу бескабельных регистрирующих систем относится разрабатываемая в ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» нодальная система «Открытие» [1, 2].

Особенность современной наземной сейсморазведки в США и некоторых других странах Америки заключается в том, что там выполняется много «спекулятивных» сейсмических съёмок (чаще всего на сланцевый газ и сланцевую нефть), при которых подрядчики по своей инициативе отрабатывают те или иные перспективные территории с целью продать обработанные массивы данных заинтересованным нефтегазовым компаниям. В модели «спекулятивной» съёмки нет места супервайзеру, поэтому ни постоянный, ни периодический контроль уровня шума окружающей среды и качества полевых данных не обязательны или, по крайней мере, не критичны.

Если контроль интенсивности помех окружающей среды всё же требуется, то уровень микросейсм в пределах приемной расстановки иногда оценивается косвенно – например, по силе ветра, измеряемого анемометрами. Известно, что цифровые анемометры применялись в этих целях в Мексике при производственных съёмках 3D с бескабельной системой UNITE компании Sercel.

В случае необходимости прямого контроля уровня микросейсм и оценки качества сейсмических данных в процессе регистрации сейсмических данных «слепыми» бескабельными системами, известны различные решения, выбираемые в зависимости от предпочтений Заказчиков и подрядчиков и имеющегося у них оборудования. А именно, основная «слепая» регистрирующая система дополняется следующим образом:

- на одном или нескольких участках площади работ автономные модули дублируются такими же модулями. Продублированные модули снимают и доставляют для чтения данных на базу партии каждый день или несколько раз в день в отличие от модулей в основной расстановке, где данные могут автономно регистрироваться в течение нескольких недель. Естественно, этот вариант не обеспечивает непрерывного мониторинга регистрируемых сейсмических данных;

- вспомогательная кабельная система 2D из нескольких десятков или первых сотен каналов. Раскладывается, как правило, поперёк основных приёмных линий и обеспечивает все меры контроля качества в реальном времени, но только в выбранном месте приёмной расстановки;

- вспомогательная радиотелеметрическая система из нескольких десятков или первых сотен модулей RT2. Модули устанавливаются, как правило, компак-

тно на одной из приёмных линий вблизи сейсмостанции (в пределах действия антенны Wi-Fi).

Все эти три варианта мониторинга шума окружающей среды и контроля качества сейсмических данных в действительности применялись при крупных производственных съёмках 3D со «слепыми» системами. Например, в Боливии применялось сразу две вспомогательные регистрирующие системы: 160 радиотелеметрических модулей RT2 недалеко от базы партии и продублированные (снимаемые каждый день) автономные модули GSX, установленные на 5 участках дальних приёмных линий с такими же модулями [6].

На 81-й ежегодной конференции и выставке EAGE в Лондоне, состоявшейся в июне 2019 года, представители компаний BP и Роснефть выступили с докладом об успешном завершении многолетнего проекта «Гепард» и разработке собственной «слепой» бескабельной системы с компактными и удивительно легкими нодами (весом 150 г). В этом докладе декларируется, что при высокой надёжности регистрирующего оборудования и высокой плотности наблюдений 3D нет необходимости в контроле качества сейсмических данных в реальном времени [5]. В то же время отмечено, что слепая регистрация не подходит для маленьких сейсмопартий, в которых «паранойя контроля качества в реальном времени» объясняется использованием небольшого количества каналов, их высокой стоимостью и низкой плотностью наблюдений, не позволяющей применять статистические методы подавления помех на этапе обработки данных.

Контроль функционирования полевых модулей

В тех случаях, когда Заказчик разрешает применение «слепых» регистрирующих систем и не требует контроля качес-

тва исходных записей и оценки уровня микросейсм, для обеспечения бесперебойных и высокопроизводительных полевых работ самому подрядчику очень важно знать, как функционируют автономные модули, установленные на площади работ, и находятся ли они вообще на своих пунктах наблюдения в данный момент...

Некоторые производители современных бескабельных систем «пошли навстречу» подрядчикам и снабдили свои автономные модули той или иной возможностью периодического или непрерывного контроля «статусов», то есть параметров регистрации и функционирования полевых модулей. Чаще всего для беспроводного контроля «статусов» используются хорошо известные технологии Wi-Fi и Bluetooth, но в компании

Geospace Technologies отдали предпочтение технологии Zigbee (Табл.1).

К параметрам регистрации, которые проверяются или задаются, как правило, одновременно при установке модулей на свои пункты приема, относятся: шаг дискретизации, антиалиасинговый фильтр, усиление и временной интервал записи данных (если полевые работы ведутся не в круглосуточном режиме). К параметрам функционирования модулей относятся: уровень сигнала ГНСС (GPS и/или Глонасс), напряжение аккумулятора и ожидаемый срок его работы, температура внутри модуля, наклон сейсмоприемника, заполненность твердотельной памяти и, наконец, интенсивность микросейсм.

Известны два подхода к контролю параметров функционирования моду-

▼ Табл. 1. Способы передачи данных и «статусов» полевых модулей в современных бескабельных системах/

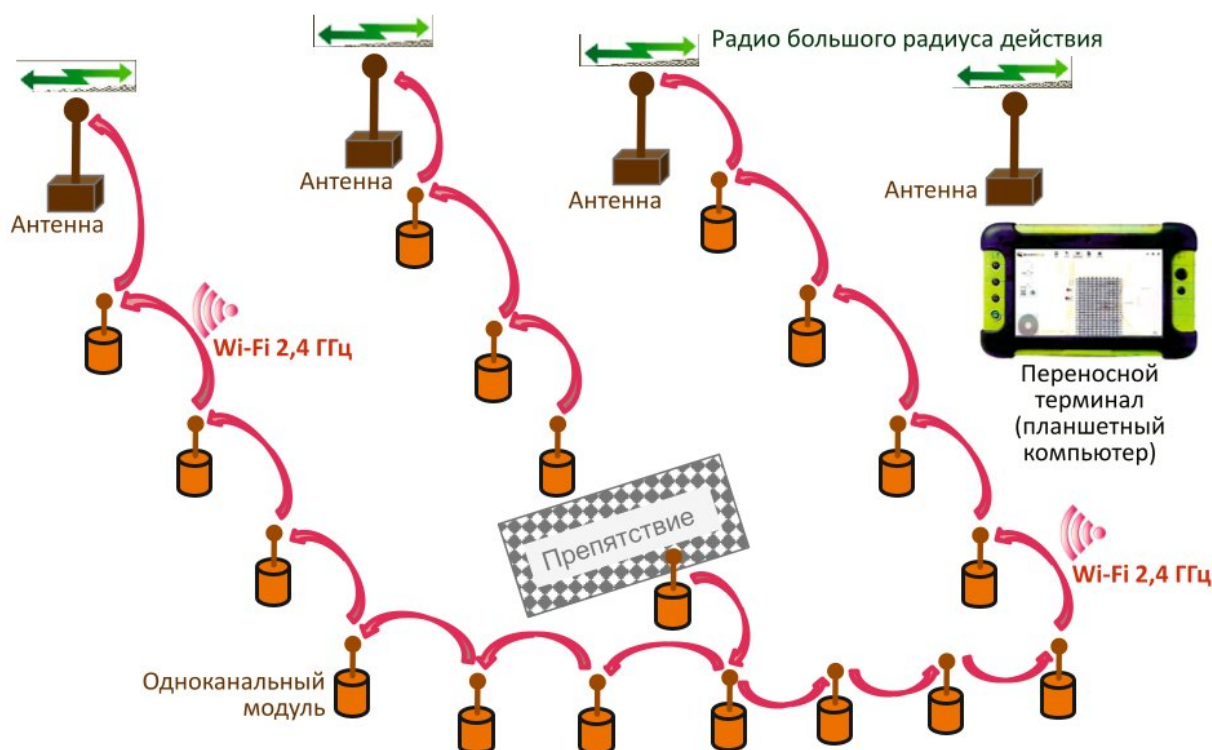
Разработчик / производитель	Название регистрирующей системы	Реальное время		Локально; периодически		На базе партии	
		Передача данных	Передача статусов	Передача данных	Передача статусов	Передача данных	Передача статусов
Wireless Seismic	RT2; RT3	Wi-Fi	Wi-Fi				
СКБ СП	SCOUT HT	Wi-Fi	Wi-Fi				
TOTAL / Wireless Seismic	METIS	Радио	Радио				
Sercel	WTU-508		Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi	
Sercel	WiNG		Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi	Контакт	
DTCC	SoldMesh		Wi-Fi		Wi-Fi	Контакт	
СКБ СП	SCOUT			Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi	
ГЕОТЕК Сейсморазведка	Открытие			Wi-Fi	Wi-Fi	Контакт	
GTI	NRU-1C				Bluetooth	Контакт	
INOVA	Quantum				Bluetooth	Bluetooth	
Geospace Technologies	GCL				Zigbee	Ethernet	
FairFieldNodal	Zland II					Контакт	Контакт
Geospae Technologies	GSR; GSX					Контакт	Контакт
DTCC	SmartSolo					Контакт	Контакт
BP / Schlumberger	Nimble					Оптика	Оптика

лей: периодический и постоянный. Периодический контроль может осуществляться локально с помощью любого работника сейсморпартии, не обладающего специальной квалификацией. Ему достаточно пройти или проехать вдоль линий наблюдения с планшетным компьютером или обычным смартфоном. Параметры функционирования модулей передаются по Wi-Fi или Bluetooth и впоследствии считываются и анализируются на базе партии. В последние годы несколько производителей бескабельных систем, таких как GSX (Geospace Technologies) и NuSeis (GTI), тестируют применение винтокрылых дронов, снабженных автопилотом и планшетным компьютером. Но такое решение подходит далеко не для всех природно-климатических условий. Например, в условиях холодного климата аккумуляторы дрона должны иметь подогрев для

обеспечения достаточно большой длительности полета (1,5–2 часа), что делает такой воздушный контроль приемной бескабельной расстановки довольно сложным технологически и дорогостоящим.

Другой подход к контролю функционирования «слепых» бескабельных систем – снабдить все модули гигагерцовой беспроводной связью для последовательной передачи «статусов» от одного модуля к другому по линиям приема. В этом случае на концах приемных линий необходимо установить антенны с собственными источниками питания для передачи накопленных на линиях «статусов» на планшетный компьютер по радиосвязи большого радиуса действия (до 10 км). По такой схеме (рис.3) обеспечивается контроль бескабельной приемной расстановки в реальном времени. Необходимо иметь в виду, что энергопот-

▼ Рис.3. Схема беспроводной передачи «статусов» (параметров функционирования одноканальных модулей и интенсивности микросейсм) от одного модуля к другому по технологии Wi-Fi. Для передачи накопленных «статусов» на переносной терминал используется радио большого радиуса действия.



ребление значительно увеличивается при передаче статусов, и время работы встроенных в модули аккумуляторов сокращается примерно в два раза.

Впервые описываемая возможность передачи «статусов» в реальном времени появилась в 2017 году в бескабельной системе WTU-508 компании Sercel, где была использована собственная технология XT-Pathfinder. Но теперь подобная функция появилась в других нодальных системах, таких как WiNG компании Sercel и SmartSolo компании DTCC (Табл.1).

В первом квартале текущего года в ходе опытно-методических работ с нодальной бескабельной системой «Открытие», разработанной компанией «ГЕОТЕК Сейсморазведка» [1, 2], был проверен способ периодического сбора «статусов» с помощью переносных устройств, использующих технологию Wi-Fi. Хотя периодический контроль «статусов» с использованием наземных или воздушных транспортных средств нам представляется наиболее практичным и перспективным, в планах наших НИОКР стоит также разработка модификации нодальной системы «Открытие» с возможностью непрерывного мониторинга параметров функционирования приемной расстановки.

Заключение

Бескабельные регистрирующие системы завоевывают всё большую популярность в мировом масштабе, особенно в Западном полушарии и в Австралии, где «слепая» сейсмика не встретила сопротивления со стороны заказчиков сейсморазведочных работ, и наиболее популярными регистрирующими системами стали GSR/GSX компании Geospace Technologies, ZLand компании FairfieldNodal и SmartSolo компании DTCC. В нашей стране «слепая» сейсмика пока вызывает недоверие у большинства заказчиков, вследствие чего наиболее популярной бескабельной системой на сегодняшний день является RT2 компа-

нии Wireless Seismic. В этой системе регистрируемые сейсмические данные передаются на центральную электронику в (почти) реальном времени.

В то же время, обширная мировая практика применения бескабельных систем показала, что современная электроника обладает очень высокой надежностью, и процент вышедших из строя автономных модулей не превышает 1% даже после нескольких лет эксплуатации. Надежность бескабельных систем позволяет отказаться от функции передачи сейсмических данных в реальном времени и контроля их качества, в первую очередь при выполнении высокоплотных проектов 3D. Отказ от функции передачи данных в реальном времени позволяет разработать более дешевые и простые в обращении бескабельные системы, позволяющие многократно повысить плотность сейсмических наблюдений без существенного увеличения затрат. С учетом этого тренда мы разрабатываем собственную нодальную систему «Открытие» как с возможностью периодического локального сбора «статусов», так и с функцией их непрерывного беспроводного контроля.

Переход на «слепые» сейсмические съемки вызовет принципиальные изменения в работе супервайзеров. В сейсмпартиях со «слепыми» бескабельными системами супервайзеры будут переключать свое внимание на соблюдение предписанных Заказчиком технологий полевых работ и на достижение высокой культуры труда (и в частности, на обеспечение высокого качества установки узлов бескабельных регистрирующих систем).

Литература

1. Абдулвалиев М.Т., Тарасов Н.В., Агафонов В.М. Бескабельная сейсмостанция «Открытие» с молекулярно-электронными геофонами как замена импортных сейсмических станций на передовом технологическом уровне. – Материалы рабочего совещания и

выставки по привлечению предприятий ОПК России к изготовлению геологоразведочного оборудования в рамках программы диверсификации. – Геленджик, АО «Южморгеология», 26-27 сентября 2019 г.

2. Тиссен А.П. Результаты ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» в развитии новых сейсморазведочных технологий. – Геолого-геофизическая конференция и выставка «Геоевразия-2020», Москва, 3–6 февраля 2020 г.

3. Череповский А.В. Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Издание второе, дополненное. – Москва, ЕАГЕ Геомодель, 2017. – 252 с.

4. Череповский А.В. Миллион каналов в наземной сейсморазведке: актуально или нет? – Тезисы 6-го международного семинара «Геофест-2019», Истра, 9–12 июля 2019 г.

5. Manning T., Stone J., Ourabah A. et al. Could you use one million nimble channels? – 81st EAGE Conference & Exhibition, London, 3–6 June 2019.

6. Munoz P.A., Rodriguez L., Parrado R. et al., Operational challenges of nodal 3D seismic acquisition in the sub-Andean environments. – 77th EAGE Conference & Exhibition, Madrid, 1–4 June 2015.

7. Pagliccia B., Dalton K., Walker C. et al. METIS hits the ground in Papua New Guinea, a field-proof innovative method to revolutionize onshore seismic acquisition. – 80th EAGE Conference & Exhibition, 11-14 June 2018, Copenhagen, Denmark.

8. Smith J.F., 2006, How a new cable-less land seismic survey acquisition system was born. – First Break, Vol.24, Feb.2006, p.79-81.

9. Winter O., Maxwell P., Schmid R., Watt H. High density, high productivity vibroseis acquisition on the Alaskan North Slope. – SEG 83th Annual Meeting, Houston, 22–27 September 2013.

Подробнее об авторах



Абдулвалиев
Марат Талгатович

Технический директор НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. н. Автор и соавтор 15 изобретений, автор и соавтор более 40 научных статей и докладов, обладатель звания и нагрудного знака «Изобретатель СССР». Награжден 2 серебряными и 2 бронзовыми медалями ВДНХ за представленные научные разработки.



Тиссен
Артур Петрович

Вице-президент по науке компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. наук. Автор и соавтор более 10 научных статей и докладов, награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» 2 степени.



Череповский
Анатолий Викторович

Главный специалист НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. н. Автор и соавтор 36 научных публикаций и докладов, двух монографий по наземной сейсморазведке и англо-русского словаря по прикладной геофизике.

Широкий спектр применения сейсмосистемы "SCOUT-НТ" в сложных орогидрографических условиях

■ Гнатюк А.И., Тарасов В.Н., Тарасов Н.В., Цукерман И.Б. АО «СКБ сейсмического приборостроения» г. Саратов

Сейсмосистема «SCOUT» показала себя как надежный инструмент при выполнении как небольших 2D проектов, так и крупных 3D проектов с активной расстановкой более 20 линий приёма, а также при проведении мониторинга месторождений с контролем гидроразрыва пластов. Сейсмосистема «SCOUT» успешно работает в различных климатических условиях, в том числе при больших минусовых температурах (до минус 40 градусов) с полным сохранением заявленных технических характеристик. В рамках государственной программы по замещению импортного оборудования ООО "Газпром геологоразведка", АО "СКБ сейсмического приборостроения" и ООО "ТНГ-Ленское" в зимний период 2016-2017г. провели тестирование в производственном режиме по методике МОГТ 3D бескабельной сейсмосистемы "SCOUT" с применением автономных блоков в условиях низких температур и труднодоступного рельефа местности. В качестве источника использовался взрыв.

Сравнение сейсмотрасс, зарегистрированных сейсмосистемами «Sercel 428XL» и «SCOUT», показало их абсолютную фазовую идентичность, рисунок 1.

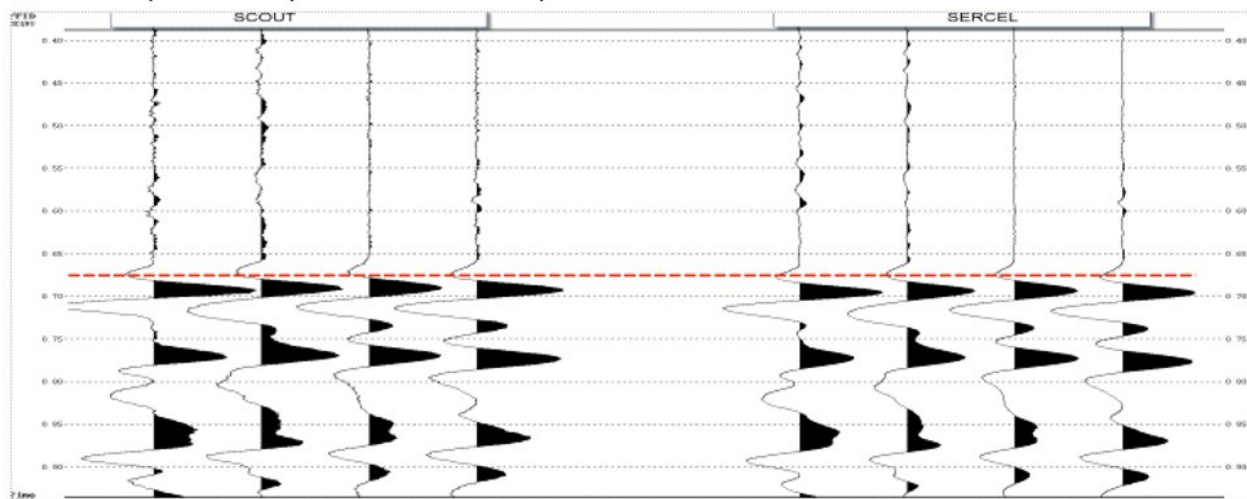
Рис.2 иллюстрирует идентичность атрибутов записей, полученных сейсмо-

системами Sercel и «SCOUT».

Одним из крупных проектов с использованием сейсмосистемы «SCOUT» является 3D проект в пустыне Сахара в Тунисе, выполняемый компанией «GEOSEIS SERVICES», где одновременно задействованы более 4000 каналов. В качестве источника возбуждения используется группа вибраторов «Nomad 65 NEO». В качестве системы управления вибраторами применена система «Force 3». Условия работ крайне тяжелы: это и температура окружающего воздуха выше плюс 50 градусов по Цельсию, и мощные электростатические разряды, генерируемые песчаными бурями, и резкие перепады температур в ночное время. Все используемое оборудование доказало свою надежность в столь непростых условиях.

На основе анализа результатов работ в данном проекте был разработан специальный алгоритм, который позволил в полной мере задействовать беспроводные интерфейсы системы и предложить заказчику возможность вести оперативный контроль расстановки с управляющего блока сеймостанции. На основании этого алгоритма организована передача данных посредством протокола

▼ Рис. 1. Фрагмент сравнения сейсмотрасс Sercel и Scout.





▲ Рис. 2. Сравнение атрибутов записей, полученных сейсмосистемой Sercel и сейсмосистемой «SCOUT».

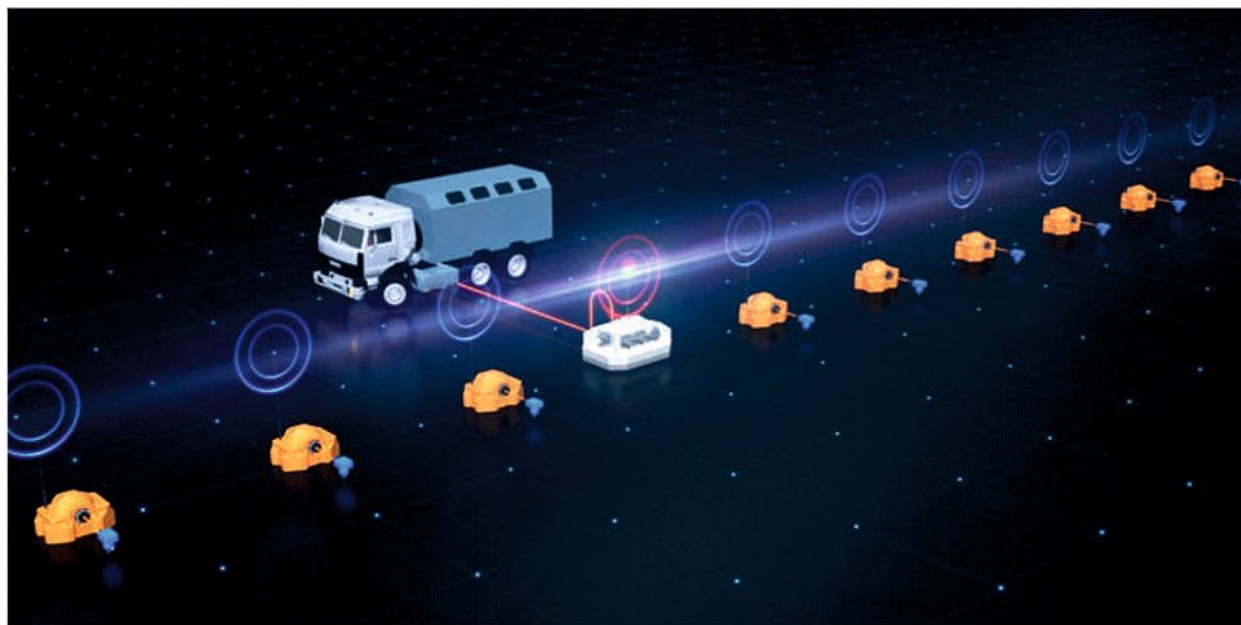
Wi-Fi между полевыми блоками (БАР) и управляющим компьютером через специальный блок коммутатора линии, что позволило получить оперативную информацию о состоянии всей расстановки, а также информацию для предварительной оценки качества полевого материала в реальном времени.

В случае нарушения связи по причине отказа какого-либо блока БАР в сети автоматически выполняется переход на

очередной блок БАР, однако это приводит к увеличению потребления электропитания от внутренних батарей блока. Для экономии питания введён в действие прерывистый опрос всей цепочки по запросу от управляющего компьютера.

По завершении расстановки блоков БАР и блока БКЛ (блок коммутатора линии), блоки выстраиваются в общей сети в направлении к станции и посредством кабеля, подключённого к блоку

▼ Рис. 3. Принцип организации передачи информации в линии. Каждая часть линии передает информацию в коммутатор, который затем передает ее в управляющий компьютер через кабель.





◀ Рис. 4. Внешний вид коммутатора линии с оптоволоконным кабелем длиной 330 м. Коммутатор обеспечивает прием, обработку и передачу информации с БАР каждой линии в управляющий компьютер.

коммутатора линии, передают информацию на управляющий компьютер. Оператор на мониторе видит всю расстановку и по команде может провести тестирование параметров и измерить уровень микросейсмов на профиле. Процесс регистрации проходит по программе, заданной на управляющем компьютере из входного SPS файла.

Для оперативного просмотра отдельных сейсмограмм оператор может по сигналам «Time-break», провести выборочное считывание «сырых» данных и построить сейсмограммы по каналам активной расстановки. При работе с виброисточником оператор собирает данные по всем накопленным виброграммам и на сервере получает сумму виброграмм или коррелограмм.

Сейсмосистема «SCOUT» полностью совместима с последним поколением систем управления виброисточниками, такими как FORCE 3 и GDS-II, что позволяет реализовывать самые современные методики проведения полевых работ, таких как Flip-Flop и Sleep-Sweeper.

Очередной проект с применением сейсмосистемы "SCOUT-HT" был реализован в Оренбургской области на участке Ирекский с целью построения его геолого-геофизической модели. В работе применялись виброисточники типа

«Волгарь» с системой синхронизации GDS-II.

Регистрация сейсмограмм сейсмосистемой выполнялась в непрерывном режиме, а группы виброисточников по радиоканалу передавали на сейсмосистему данные по КОМ (Командная отметка момента). Позиционирование виброисточников осуществлялось в процессе отработки ПВ с помощью навигационных систем GPS и Глонасс.

В процессе выполнения проекта регистрация проводилась несколькими линиями приёма кабельной расстановки и блоками «SCOUT», размещёнными по профилю с шагом 50м. По кабельной линии данные приходили на управляющий компьютер сейсмосистемы в реальном времени, а по бескабельным линиям передавался только статус расстановки. Сейсмические данные для построения сейсмограмм снимались с блоков во время перемотки. В конечном итоге проводилось построение сейсмограмм в формат SEG-D в не реальном времени. Однако программный комплекс, заложенный в управляющий компьютер для обеспечения контроля параметров бескабельных блоков, позволил в реальном времени контролировать статус всех блоков и состояние аккумуляторных батарей.



◀ *Рис. 5. Подготовка беспроводных блоков БАР к работе в полевом лагере.*

Внедрение в сейсмосистему «SCOUT» технологии оперативного контроля полевой расстановки с борта управляющего компьютера через беспроводную сеть позволяет существенно повысить гибкость и скорость выполнения полевых работ, сократить число задействованного персонала и свести к минимуму повторные отстрелы профиля. Непрерывная запись полевой информации во внутреннюю память гарантирует ее сохранность, а наличие возможности выборочной передачи информации позволяет существенно продлить срок автономной работы от встроенных батарей.

▼ *Рис. 6. Беспроводной блок БАР в работе на профиле.*



В настоящее время в сейсмосистеме "SCOUT" реализован принцип передачи данных статуса посредством WI-FI между блоками автономной регистрации.

Таким образом, решён вопрос обеспечения практически реального времени в процессе контроля блоков наземной расстановки, геофонов и аккумуляторных батарей, что значительно облегчает процедуру настройки полевого оборудования на профиле и, соответственно, повышает надёжность процесса регистрации геофизических данных.

Более двадцати компаний в мире оценили преимущества использования технологии SCOUT, в том числе и на проектах в Индии и Колумбии.

Литература:

1. Гнатюк А.И., Тарасов Н.В., Цукерман И.Б. «Современные технологии регистрации геофизической информации бескабельной телеметрической сейсморегистрирующей системой «SCOUT»/Приборы и системы разведочной геофизики 02 /2014 с.19-22.
2. Погрецкий А.В., Стрекалов А.Я., Житкевич Ю.Б., Родин Д.В., Механошин В.П. Опыт-но-методические работы по тестированию бескабельной сейсморегистрирующей системы «SCOUT»//Приборы и системы разведочной геофизики, 1/2017с.15-24

К вопросу о группировании вибраторов в горных условиях

■ Кострыгин Ю.П., Фокин С.А., ООО «Новоросморгео», г. Краснодар,

На современной стадии развития сейсмической разведки вопрос выбора оптимальных параметров группирования вибраторов сводится к определению максимально возможной базы группирования, при которой полоса пропускания амплитудно-частотной характеристики группы вибраторов для целевых отражений с минимальной кажущейся скоростью была бы согласована с шириной спектра регистрируемых целевых отражений.

Комплексная частотная характеристика группирования, как известно [1], определяется следующим выражением:

$$H(jw) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-[jwBn/v(N-1)]} \quad (1)$$

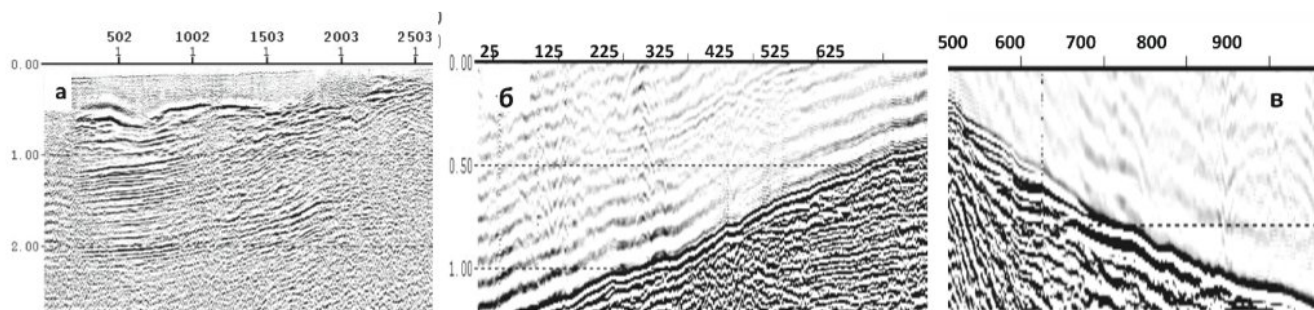
где B – база группирования вибраторов; N – количество вибраторов в группе; n – номер вибратора в группе; v – кажущаяся скорость волны, значения которой зависят, в частности, и от наклона дневной поверхности; w – циклическая частота.

Т.е. комплексная частотная характеристика группы вибраторов вычисляется путём прямого Фурье преобразования последовательности N импульсов Кронека, расставленных в соответствии с временными задержками, определяемыми соотношением $B \cdot n / v(N-1)$. Модуль комплексной характеристики соответствует амплитудно-частотной характеристике группирования. И, как уже отмечалось выше, оптимальная база группы вибраторов должна быть максимально протяжённой, однако при этом высокочастотные гармоники наиболее низкоскоростных целевых отражений не должны заметно ослабляться в результа-

те группирования. В относительно простых условиях целесообразность такой технологии выбора базы группирования очевидна и не вызывает сомнений.

В горных же условиях, как показывает практика, классическая технология по выбору параметров группирования с использованием выражения (1) требует некоторой коррекции. Физически это связано не только с наклоном дневной поверхности, но, как правило, в большей степени со сложной геоморфологией верхней части разреза (ВЧР). Так, на рис. 1 приведён фрагмент временного разреза, полученного с использованием вибросейсмического метода в горной части Ингушетии. В данном случае шаг между пунктами приёма составлял 3 м. Из рисунка можно видеть, что верхняя часть коренных пород представлена в конкретных условиях чрезвычайно сложными структурными формами, под влиянием которых и происходило формирование приповерхностной части разреза, включая и ЗМС. Именно по этой причине скоростная модель ВЧР в пределах горных участков во многих случаях достаточно резко меняет свои характеристики даже при незначительном перемещении по профилю, не превышающим 20–30 м. Указанное обстоятельство обуславливает дополнительные искажения возбуждаемых колебаний при группировании вибраторов в связи с увеличением значений расфазировки сигналов, возбуждаемых различными вибраторами, входящими в группу.

Так, на рис. 1, б приведены записи первых вступлений, зарегистрированных на различных участках горной части Ингушетии. Из рисунка можно видеть, что волны, преломлённые от подошвы ЗМС, характеризуются в конкретных



▲ Рис. 1. Типичные сейсмические записи, получаемые вибросейсмическим методом в условиях горной части Ингушетии. а – фрагмент временного разреза; б, в – примеры записей первых вступлений.

условиях многочисленными весьма резкими изломами годографов, что физически связано либо с усложнением геометрии подошвы ЗМС, либо с достаточно резкими изменениями вдоль профиля скоростной модели ВЧР.

С целью оценки реальных искажений сигнала группами вибраторов в сопоставлении с искажениями, определяемыми классическим путём посредством расчёта амплитудно-частотных характеристик группирования (1), в условиях горной части Ингушетии были выполнены специальные эксперименты. Колебания возбуждались 2-х элементной группой вибраторов NOMAD-65 на базе 10 м, 3-х элементной группой на базе 20 м и 4-х элементной группой на базе 30 м. Вибраторы располагались на горизонтальной площадке, регистрация колебаний осуществлялась одиночными сейсмо-

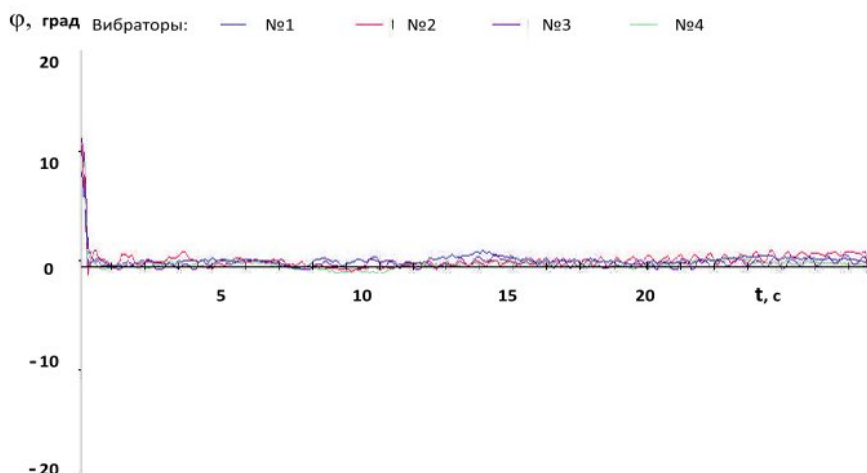


▲ Рис. 2. Рельеф местности в горной части Ингушетии, на участке проведения эксперимента.

приёмниками. Рельеф местности на участке проведения эксперимента показан на Рис. 2.

Для строгой оценки частотных искажений сигнала вследствие группирования, перед экспериментом была проведена профилактика вибраторов, позволившая уменьшить максимальные фазовые искажения в системе вибратор – грунт до 2-х градусов (рис. 3). Частотный диапазон

► Рис. 3. Результаты тестирования фазовых характеристик вибраторов NOMAD-65 №1, №2, №3 и №4, участвовавших в эксперименте.

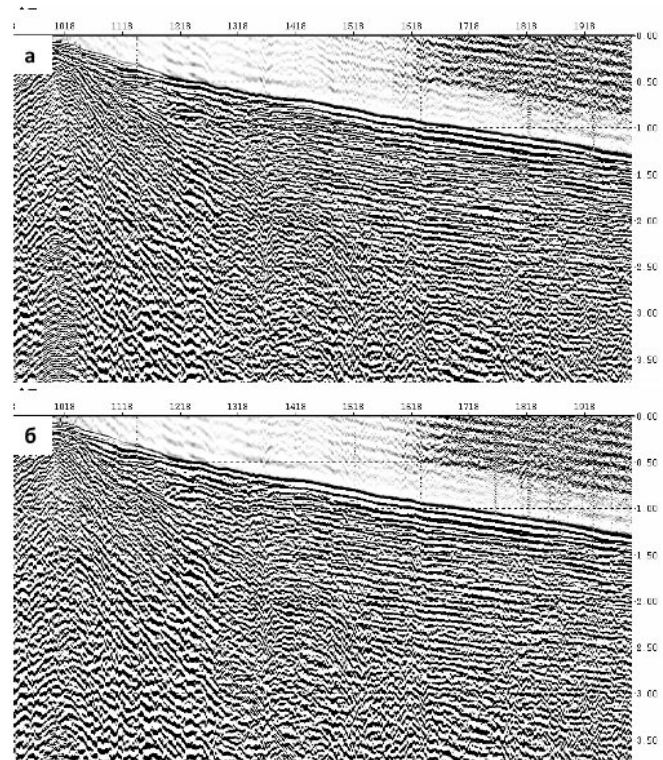


ЛЧМ-развёртки при тестировании равнялся 6–60 Гц, длительность сигнала 24 с.

На рисунке 4 сопоставлены коррелограммы, зарегистрированные с использованием 2-х элементного группирования вибраторов на базе 10 м и 3-х элементного группирования на базе 20 м. Результаты спектрального анализа данных сейсмограмм приведены на рис. 5. Окно анализа соответствовало временному интервалу 1,5–2,5 с и располагалось вне конуса доминирующих поверхностных помех. Кажущиеся скорости отражений в пределах окна анализа равнялись 3400 м/с.

Результаты классического анализа частотных искажений при группировании, к настоящему времени хорошо апробированному и заключающемуся в расчёте амплитудно – частотных характеристик группирования с использованием выражения (1), приведены на рис. 6. Из рисунка 6 можно видеть, что при кажущейся скорости отражений, равной 3400 м/с, переход от 2-х элементного группирования на базе 10 м к 3-х элементному группированию на базе 20 м гармоника на частоте 25 Гц должна ослабляться на $\approx 5\%$, гармоника на частоте 30 Гц на $\approx 6,25\%$, гармоника на частоте 35 Гц на $\approx 9,5\%$ и гармоника на частоте 40 Гц на $\approx 12\%$. Такие изменения динамики колебаний в практической работе имеют весьма несущественное значение.

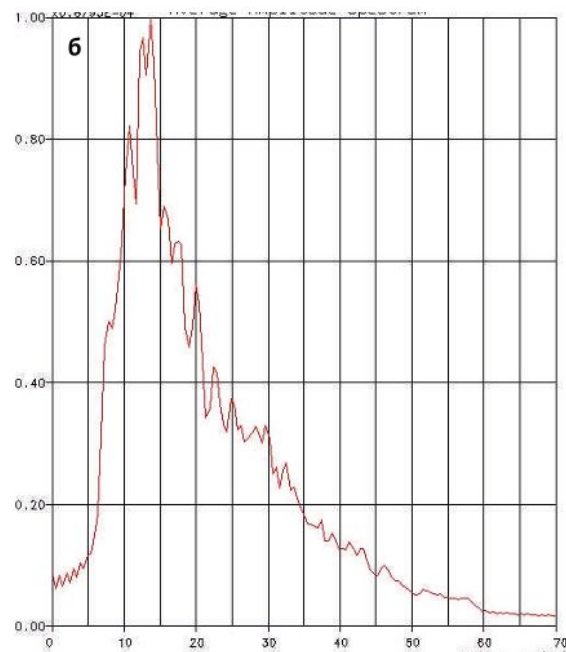
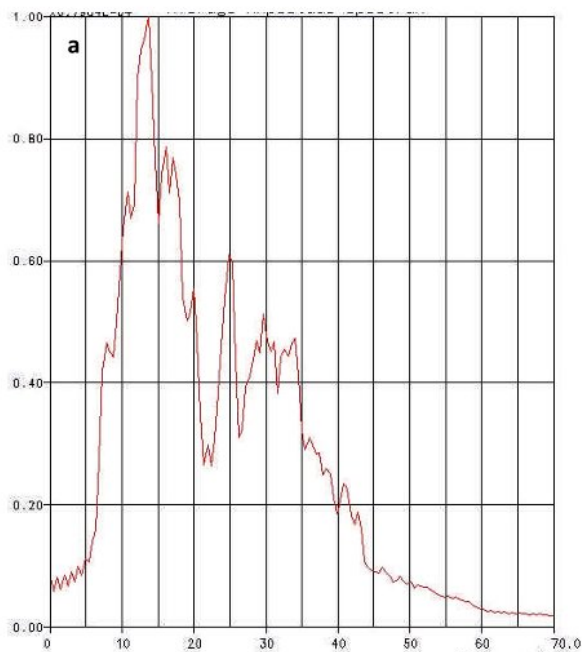
Реальные же изменения спектра отражений, которые на основании проведённого эксперимента мы наблюдали в горной части Ингушетии, были многократно более значительны. Так, при переходе от 2-х элементного группирования вибраторов на базе 10 м к 3-х элементному группированию на базе 20 м относительная спектральная плотность отражений на частотах 25 – 30 Гц уменьшилась



▲ Рис. 4. Коррелограммы, полученные при группировании 2-х вибраторов на базе 10 м (а) и 3-х вибраторов на базе 20 м (б).

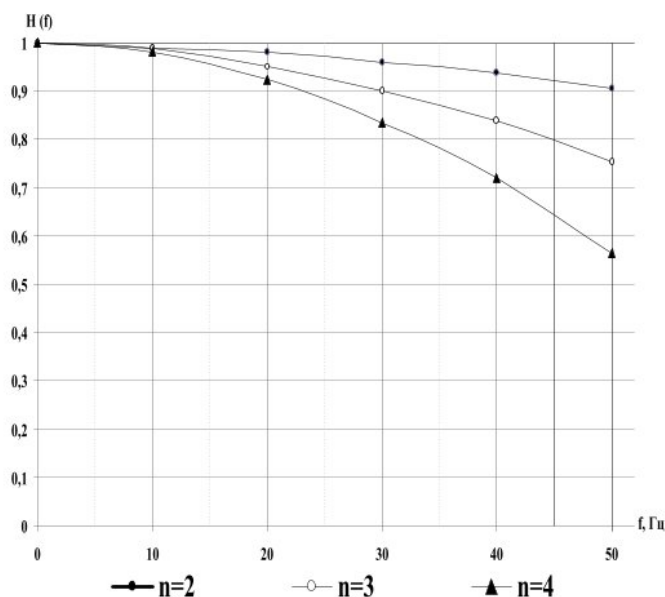
на 40%, на частоте 35 Гц на 47% и на частоте 40 Гц на 41%.

Аналогичная тенденция по результатам проведённого эксперимента наблюдалась и при переходе с 3-х элементного группирования вибраторов на базе 20 м к 4-х элементному группированию на базе 30 м. Так, в соответствие с теоретическими графиками, приведёнными на рис. 6, в результате такого перехода относительная спектральная плотность отражений на частоте 30 Гц должна уменьшаться на $\approx 8\%$, на частоте 35 Гц на 10% и на частоте 40 Гц на 14%. Т.е. изменения динамики колебаний, которые следовало бы ожидать на основании расчётов амплитудно-частотных характеристик группирования, весьма незначительные. Реально же по результатам проведённого эксперимента переход с 3-х элементного группирования вибраторов на 4-х элементное группирование привёл к заметному сужению спектра регистрируемых колебаний (см. рис. 7).

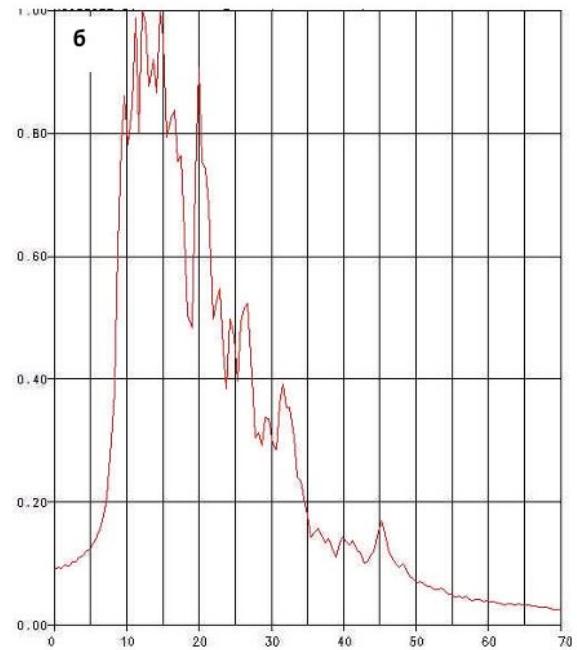
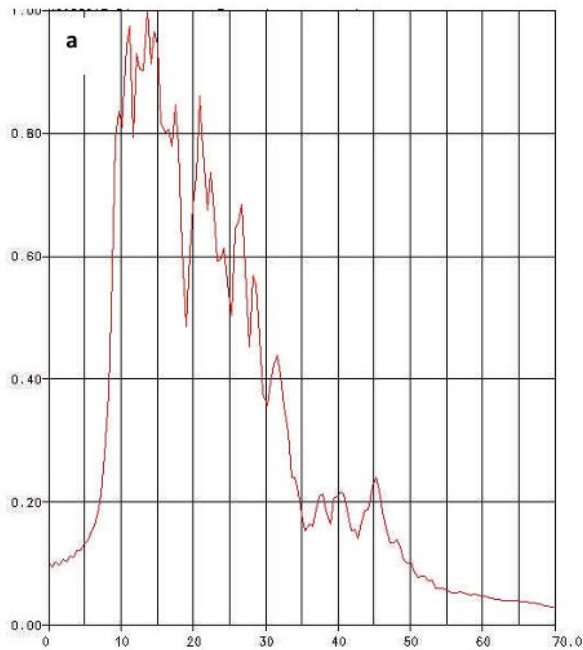


▲ Рис. 5. Сопоставление спектров отражённых волн, зарегистрированных с использованием группы 2-х вибраторов на базе 10 м и 3-х вибраторов на базе 20 м (ПР1, ПВ1051, $\Delta F=6-60$ Гц, $T=24$ с, $n_{\text{пак}}=6$, начальный скос 200 мс., конечный скос 500 мс., окно анализа 1,5-2,5 с, вне конуса доминирующих поверхностных помех); а – два вибратора на базе 10 м; б – три вибратора на базе 20 м

Таким образом, в горных условиях, вследствие более сложной геоморфологии и в связи с этим весьма изменчивой вдоль профиля скоростной модели верхней части разреза, увеличение базы группирования вибраторов приводит к более значительному ослаблению высокочастотных составляющих сигнала, по сравнению с тем, что можно было бы ожидать в условиях равнины. Поэтому, если в равнинных условиях в качестве оптимальной базы группирования целесообразно рассматривать базу, при которой полоса пропускания частотной характеристики группирования для целевых отражений с наименьшими кажущимися скоростями согласована с шириной спектра регистрируемых колебаний, то в горных условиях существует необходимость минимизации базы группирования вибраторов. Так, если группа излучателей состоит из 2-х вибраторов, то расстояние между излучающими



▲ Рис. 6. Графики амплитудно – частотных характеристик группирования при использовании 2-х вибраторов на базе 10 м; 3-х вибраторов на базе 20 м и 4-х вибраторов на базе 30 м, рассчитанные с использованием выражения (1) (кажущаяся скорость отражений 3400 м/с)



▲ Рис. 7. Сопоставление спектров отражённых волн, зарегистрированных с использованием группы 3-х вибраторов на базе 20 м и 4-х вибраторов на базе 30 м (ПР1, ПВ5194, $\Delta F=8-70$ Гц, $T=24$ с, $\text{пнак}=6$, начальный скос 200 мс., конечный скос 500 мс., окно анализа 1,5-2,5 с, вне конуса доминирующих поверхностных помех); а – три вибратора на базе 20 м; б – четыре вибратора на базе 30 м

ми плитами целесообразно ограничивать размерами транспортной базы установки, т.е. ≈ 10 м. При использовании же, например, 4-х элементного группирования, вибраторы целесообразно расставлять вдоль двух линий, параллельных профилю, сохраняя при этом базу группирования по профилю, равной около 10 м.

Литература

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И., 2006, Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 744 с.

Расчет соотношения сигнал-помеха различными программными комплексами и сравнение результатов

■ Баландин П.В., Копылов М.А. (ООО «Эвенкиягеофизика»), г. Красноярск

Вычисление значений атрибутов волнового поля при производстве полевых сейсморазведочных работ с применением различного программного обеспечения может приводить к расхождению в оценке качества данных и, в ряде случаев, к дополнительным затратам для исполнителя ГРП. В статье изложены результаты сравнения атрибута соотношение сигнал-помеха рассчитанного в программах Ami4, SPS-PC и Promax и предлагается вариант приведения различий в оценке качества к минимуму.

Немного о рассматриваемых комплексах.

Комплекс Ami4 предназначен для расчёта атрибутов волнового поля и оперативной оценки качества полевых данных, используется для экспресс-анализа супервайзерскими службами, целесообразно использовать в работе непосредственно на станции оператором.

Комплекс SPS-PC предназначен для цифровой обработки сейсморазведочных данных 2D и 3D, скважинных данных ГИС и ВСП.

Комплекс Promax это универсальный пакет обработки и интерпретации сейсморазведочных данных, наиболее часто используемый на полевых ВЦ.

Соотношение сигнал-помеха является основным атрибутом для оценки качества полевых сейсморазведочных данных. Наибольшее распространение получили два вида расчета амплитуд сигнала и микросейсм – средние значения и среднеквадратические.

Для гармонических колебаний:

$$A_{avr} = \frac{2}{\pi} A_{max}$$

$$A_{rms} = 0.707 A_{max}$$

Где, A_{max} - максимальное значение амплитуды, A_{avr} и A_{rms} - средние и среднеквадратические значения амплитуды соответственно.

Как видно из формул, средние и среднеквадратические значения амплитуд будут различаться, а соотношение сигнал-помеха, рассчитанное по одному из этих способов, останется неизменным.

Для расчета атрибутов были использованы два вида сейсмограмм – синтетические, с заданными параметрами (Табл. 1), и полевые.

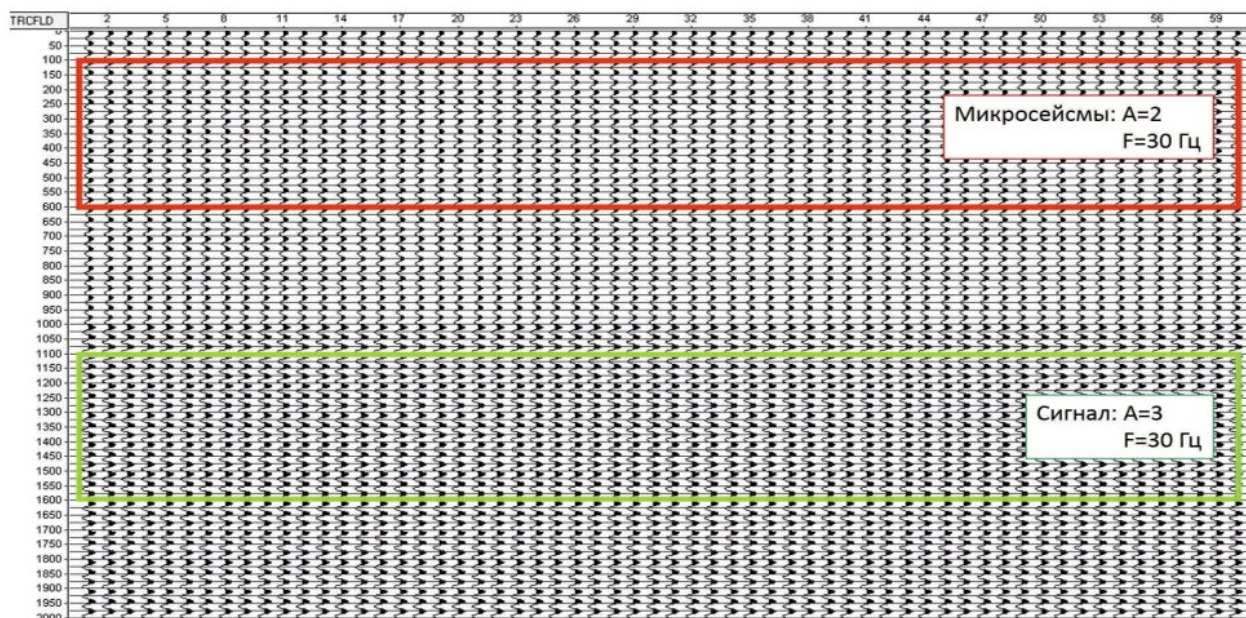
Атрибуты рассчитывались по всем трассам в окнах (рис. 1): сигнал (1100 – 1600 мс), микросейсм (100 – 600 мс). Результаты расчета приведены в Табл. 2.

Как видно из таблицы 2, программные комплексы Ami4 и SPS-PC выдают практически идентичные результаты при анализе синтетических сейсмограмм. Несущес-

▼ Табл. 1. Параметры синтетических сейсмограмм.

Область	Амплитуда	Частота, Гц	Шаг дискретизации, мс	Длина записи, сек	Время начальное, мс	Время конечное, мс	Количество трасс
Микросейсм	2	30	2	2	0	1000	60
Сигнала	3	30			1001	2000	

▼ Рис. 1. Синтетическая сейсмограмма, окна расчета сигнала и микросейсм.



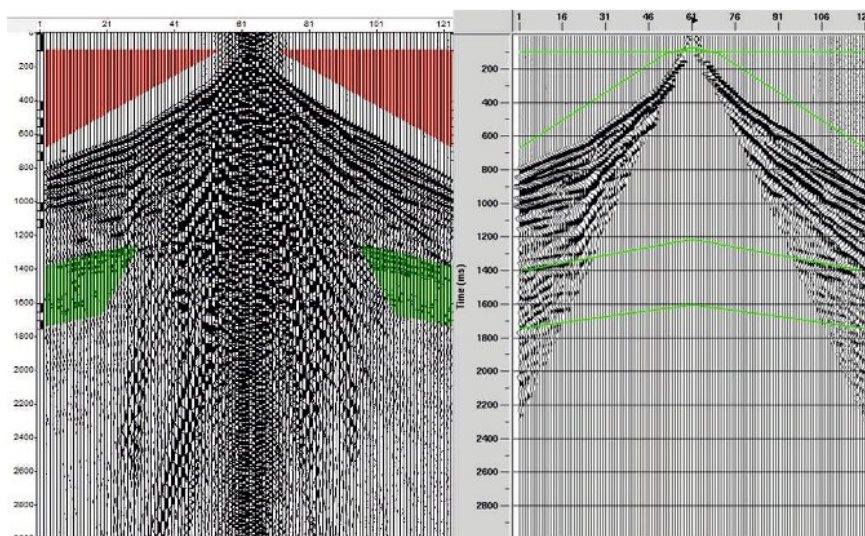
твенные различия в вычислениях амплитуд сигнала и микросейсм вероятнее всего связаны с точностью представления значений дискретов трассы в различном ПО зависящий от разрядности (коли-

чества знаков после разделителя целой и дробной части). Значения амплитуд сигнала, микросейсм, рассчитанные в Promax отличаются, а соотношение сигнал-помеха совпадает с заданным.

▼ Табл. 2. Атрибуты волнового поля (синтетические сейсмограммы), рассчитанные в разных программных комплексах.

Комплекс	Среднее			Среднеквадратичное		
	As	An	As/An	As	An	As/An
Ami4	1.90	1.27	1.50	-	-	-
SPS-PC	1.92	1.28	1.50	2.13	1.42	1.50
Promax	3.23	2.15	1.50	-	-	-

► Рис. 2. Пример полевой записи (Ami4 - слева, Promax - справа) с окнами расчета атрибутов (в SPS-PC окна расчета не отображаются).



▼ Табл. 3. Атрибуты волнового поля (полевые записи), рассчитанные в разных программных комплексах.

FFID	Ami4				SPS-PC				Promax			
	As	An	As/An	F дом, Гц	As	An	As/An	F дом, Гц	As	An	As/An	F дом, Гц
1	0.0043	0.0367	8.53	17.0	151.23	17.91	8.45	17.6	0.00359	0.00047	7.70	25.9
2	0.0050	0.0432	8.64	12.0	177.86	22.16	8.02	13.7	0.00543	0.00059	9.20	22.1
3	0.0051	0.0369	7.24	18.0	150.65	20.5	7.35	16.6	0.00379	0.00053	7.10	26.6
4	0.0046	0.0368	8.00	12.0	143.74	17.88	8.04	17.6	0.00355	0.00047	7.50	25.8
5	0.0060	0.0355	5.92	12.0	142.12	25.63	5.54	14.6	0.00392	0.00063	6.20	24.3

Далее, были рассчитаны атрибуты полевых записей (рис. 2), полученных на объекте в Восточной Сибири.

Атрибуты (только средние значения) рассчитывались по всем удалениям с отсечением конуса поверхностной волны. Поскольку в Promax невозможно отсечь участки окон расчета, попадающие в конус поверхностной волны, эти участки были подвергнуты процедуре мьютинга (Рис. 2). Результаты расчета приведены в Табл. 3. Значения соотношения сигнал-помеха изображены на (Рис. 3).

При расчете атрибутов полевых данных (Рис. 3) значение S/N отличается хотя при анализе синтетических данных соотношение сигнал-помеха оставалось неизменным для всех комплексов. Таким образом, различия в расчете S/N связаны с окнами расчета, задание формы кото-

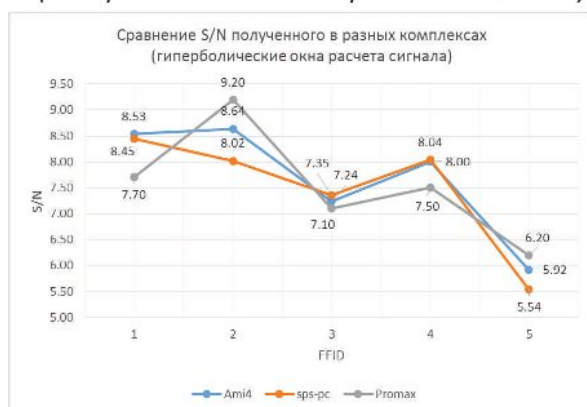
рых, в различных комплексах, организовано по-разному.

Очевидно, что, задавая прямоугольные окна с отсечением трасс по удалениям, мы получим максимально схожие результаты. Поскольку в SPS-PC процесс отсекания трасс по удалениям не реализован, воспользуемся треугольными окнами расчета микросейсм как показано на (рис. 2), а окна сигнала приведём к прямоугольному виду с отсечкой по конусу поверхностной волны (Рис. 4).

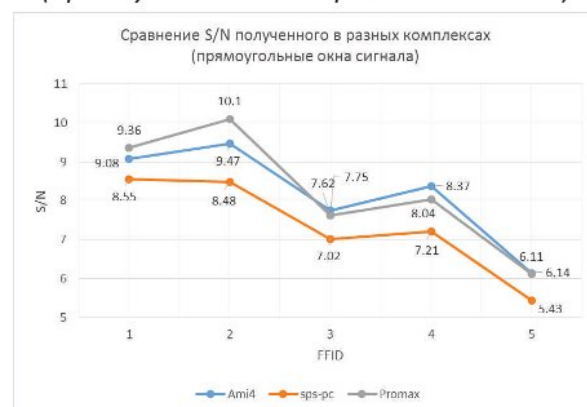
Как видно из рисунка 4, при максимально идентичной форме окон расчета мы получаем наиболее близкие значения соотношения сигнал-помеха.

Рассмотрим технику выбора формы окон расчета в рассматриваемых программных комплексах, а также некоторые параметры, влияющие на расчет

▼ Рис. 3. Соотношение сигнал-помеха полученного в разных комплексах (гиперболические окна расчета сигнала).



▼ Рис. 4. Соотношение сигнал-помеха полученного в разных комплексах (прямоугольные окна расчета сигнала).



амплитуд сигнала и микросейсм (Таблица 4).

В комплексе Ami4 форма границ окон расчета сигнала рассчитывается по уравнению годографа отражённой волны и имеют форму гиперболы:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{V^2}}$$

За t_0 принимается начальное время целевого интервала. Скорость V в Ami4 задается пользователем и обозначается как скорость для верхней/нижней границы. Окон расчета можно ограничивать по удалениям, а также отсекают участки окон расчета сигнала, попадающие в конус поверхностной волны. Исключение сильно зашумленных трасс (техногенные помехи, ручьи и т.д.) не реализовано.

В SPS-PC форма границ окон расчета сигнала также рассчитывается по уравнению годографа отраженной волны где V определяется суммированием по гиперболам в пределах задаваемых скоростей $V_{\max}$ и $V_{\min}$ и обозначается как V_{cdr} . Кривая $t(x)$ является центром окна расчета сигнала, а верхние и нижние границы

на нулевом удалении задаются временами Start/Stop Time Useful. По удалениям возможно отсекают только окна расчета микросейсм (форма только треугольная) путем определения минимального размера окна в миллисекундах с помощью параметра NoiseMinWind (принимает форму трапеции). Параметр SoundVelocity отсекает участки окон расчета сигнала из конуса поверхностной волны. В SPS-PC реализована возможность исключения из окон расчета трасс, уровень амплитуды микросейсм которых превышает среднее значение амплитуды в задаваемое пользователем число раз – параметр MsRange. Параметр DivRange исключает трассы тем же способом, только по затуханию амплитуд.

В Promax форма окон (для сигнала и микросейсм) задается вручную путем пикирования «временных ворот» (time gate picking). Применение данной процедуры требует уточнения положения узловых точек окон в системе координат удаление-время. Отсечка участков окон расчета сигнала, попадающих в конус поверхностной волны возможна с помощью процедуры мьютинга. Ограни-

▼ Табл. 4. Параметры выбора окон расчета и редакции трасс в различных комплексах.

Параметр	Программный комплекс		
	Ami4	SPS-PC	Promax
Окно сигнала			
Гиперболическое	+	+	+
Прямоугольное	+	+	+
Окно микросейсм			
Треугольное	+	+	+
Прямоугольное	+	-	+
Отсечение конуса поверхностной волны	+	+	-
Отсечение трасс по удалениям	+	-	+
Исключение трасс из окон расчета	-	+	+

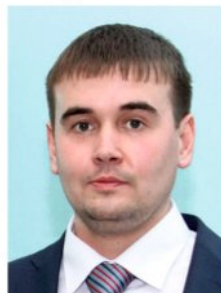
чение окон расчета по удалениям происходит при помощи сортировки трасс по абсолютным выносам (Absolute Offset). Также, реализована возможность исключения из окон шумящих трасс путем задания списка трасс и применения специальных процедур редакции.

Таблица 4 показывает, что при применении различных комплексов для расчета соотношения сигнал-помеха необходимо искать компромисс путем максимального уравнивания комплексов по их возможностям.

Выводы.

При применении различных программных комплексов соотношение сигнал-помеха может рассчитываться любым из способов, представленных в статье. Окна расчета амплитуд сигнала и микросейсм должны максимально совпадать по форме, необходимо учитывать процедуры редакции трасс с целью минимизации различий в оценке данных. Параметры должны согласовываться заказчиком, исполнителем и супервайзерской службой до начала производственных работ, особенно в случае использования одновременно на проекте нескольких программных комплексов.

Подробнее об авторах



Баландин
Павел Владимирович

главный геофизик
ООО «Эвенкиягеофизика»,
e-mail: pbalandin@gseis.ru



Копылов
Михаил Александрович

управляющий директор
ООО «Эвенкиягеофизика»
e-mail: mkopylov@gseis.ru

Результаты тестирования алгоритмов глубинной миграции сейсмических данных, полученных в пределах Мраковской депрессии, Республика Башкортостан

■ Акуленко А.С., ПАО АНК "Башнефть", г. Уфа. E-mail: info_bn@bashneft.ru

■ Калинин А.Ю., Ляпин Н.В., Иванов П.Д., ООО "Совфрансгео", г. Москва. isfg@sovfransgeo.ru

В статье определяется роль сейсмической миграции в современном графе камеральной обработки. Анализируются результаты работ по тестированию миграционных алгоритмов, как средства возможного улучшения качества сейсмической модели изучаемой среды.

Выполнение сейсмической миграции, является одной из важнейших задач камеральной обработки данных. Данная процедура, прежде всего, направлена на получение сейсмического изображения, без искажений, заведомо присутствующих на временном, не мигрированном, волновом поле и, фактически, является ключевым инструментом для решения одной из главных задач разведочной геофизики – получению отображения геологической структуры [2]. В производственной практике сейсмическая миграция представляет собой двухстадийный процесс, центральная роль которого как по значимости, так и по положению представлена в следующем обобщённом графе камеральной обработки:

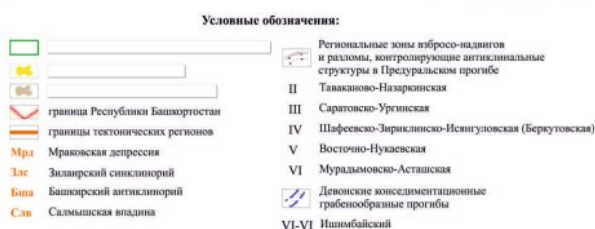
1. Сигнальная и кинематическая обработка данных;
2. Выбор типа аппроксимации изучаемой среды и построение соответствующей скоростной модели миграции;
3. Получение сейсмической модели изучаемой среды, посредством миграции исходных данных на основе полученной скоростной модели;
4. Амплитудная обработка полученных результатов;

Первая стадия указанного графа, представляет собой комплекс процедур обработки во временной области, направленных на формирование априорной сейсмической модели изучаемого участка, которая позволила бы получить предварительное представление о неоднородности изучаемой среды. На второй стадии, производится

построение соответствующей скоростной модели миграции. Среда с достаточно низкой степенью неоднородности, вполне успешно могут быть аппроксимированы средними скоростями, рассчитанными без привлечения априорного структурного каркаса и, выполненная в таком случае временная миграция, может обеспечить получение желаемого результата.

Если же изучаемая среда в существенной степени неоднородна, то задача по её параметризации усложняется, и аппроксимация производится с помощью серии параметров, основным из которых является модель интервальных скоростей, обеспечивающая возможность учёта преломления лучей. В данном случае, исходя из типа аппроксимации среды, выполняемая сейсмическая миграция классифицируется как глубинная. Третья стадия, представляет собой выбор и применение алгоритма, для преобразования динамических линий $t_0(x)$ временного разреза в динамические линии $tv(x)$ или $z(x)$ [1]. Четвертая стадия графа направлена на финальную подготовку полученной после миграции сейсмической модели к динамической и структурной интерпретации.

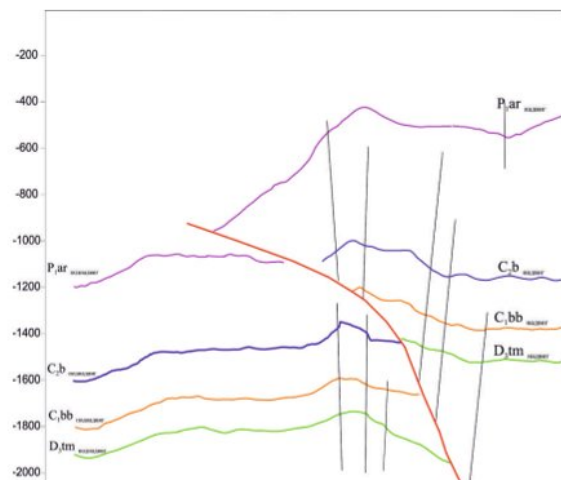
Высокая степень влияния качества выполненной временной обработки, а также корректности и точности построенной скоростной модели, на результат сейсмической миграции, очевидна. Для обоснования успешности выполнения данных работ проводятся масштабные тесты, активно



▲ Рис. 1. Фрагмент тектонической карты Республики Башкортостан.

привлекаются новые технологические и методологические решения. Вопрос же поиска оптимального миграционного алгоритма, как средства, позволяющего повысить информативность получаемой после миграции сейсмической модели, при выполнении производственных проектов, рассматривается менее интенсивно, или не рассматривается вовсе. Данная ситуация вполне объяснима, как по причинам существенной продолжительности и ресурсоемкости тестирования подобного рода, так и с позиции ценовой доступности алгоритмов миграции. Таким образом, вариант производственного использования миграции по алгоритму Kirchhoff, обеспечивающему приемлемое соотношение ресурсоемкости – качество, рассматривается, в качестве базового как сервисными компаниями, так и заказчиками работ.

В то же время, для сред с высокой степенью неоднородности, ценность возможного получения даже незначительного прироста информативности результирующей



▲ Рис. 2. Схема структуры карлинского типа.

сейсмической модели за счёт использования оптимального миграционного алгоритма, увеличивается. Как следствие, тестирование, направленное на поиск данного алгоритма или, в альтернативе, получения подтверждения технологической достаточности использования базового, становится более актуальным, ресурсы, затрачиваемые на выполнения данной задачи, оправданными.

Данная стратегия была использована компанией ПАО АНК "Башнефть", при планировании технологического графа переобработки сейсмических данных МОГТ-3D, полученных в пределах восточного борта Предуральского краевого прогиба и реализована на практике компанией ООО «Совфрансгео».

В региональном тектоническом плане, изучаемый участок расположен на восточном (внутреннем) борту Предуральского краевого прогиба, в пределах Мраковской депрессии, в зоне складок карлинского типа, генетически приуроченных к протяженному Саратовско-Ургинскому взбросо-надвигу (рис. 1). К структурам карлинского типа (рис. 2) относятся структуры, формирование которых связано с образованием взбросо-надвигов. Большая часть дизъюнктивов и пликативов осложнена опережающими разломами.

По сейсмогеологическим условиям тектонических блоков:



▲ Рис. 3. Дифференциация регистрируемого волнового поля по сейсмогеологическим условиям тектонических блоков. По данным ПАО АНК "Башнефть", 01.11.2017.

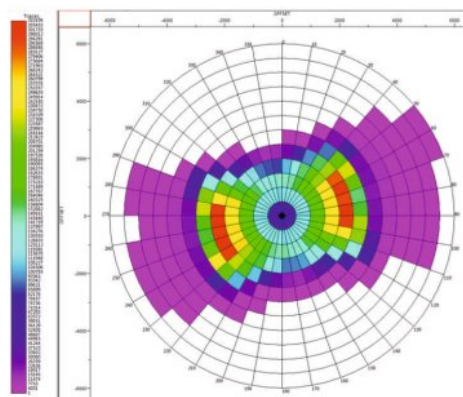
Тектонические особенности изучаемого района во многом определяют сложность глубинных сейсмогеологических условий района работ (рис. 3), которые, в сочетании с непростыми поверхностными сейсмогеологическими условиями, приводят к априорной неоднозначности параметризации волнового поля, при выполнении стадий кинематической обработки и серьёзным затруднениям при восстановлении динамических характеристик сейсмической записи в процессе сигнальной обработки.

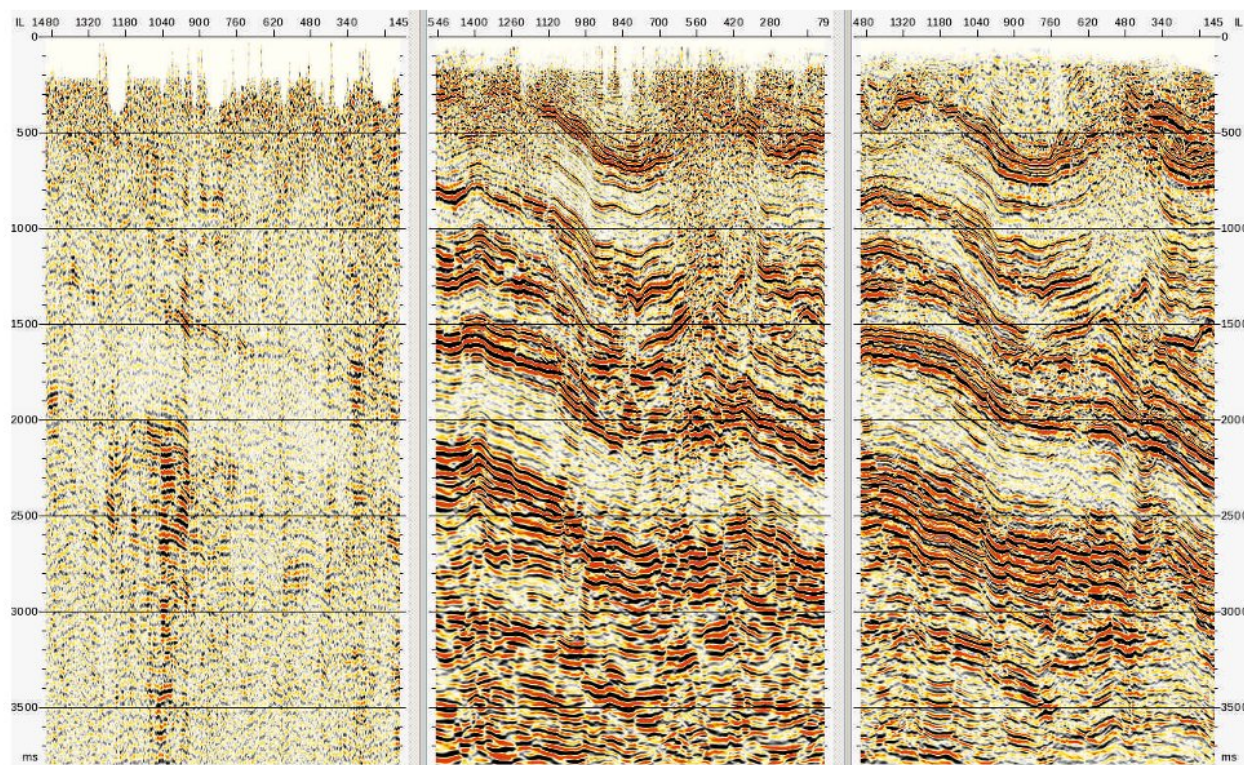
Несмотря на геологическую сложность, рассматриваемый участок является перспективным в плане изучения, что подтверждается серией открытых газоконденсатных и нефтегазоносных месторождений. Полевые работы МОГТ-3Д на рассматриваемом участке, были выполнены в 2007 году с применением вибрационных источников AMG с системой управления VE 416, группируемых в линию на базе 40 м, использовались сейсмоприёмники GS-20DX (группа из 12 сейсмоприёмников на базе 50 м.), регис-

Параметр	Значение
Количество активных каналов	1080
Номинальная кратность	45
Размер бина, (м)	25x25
Максимальное расстояние ПП-ПВ	3386 м
Максимальное расстояние по X	2675 м
Максимальное расстояние по Y	1475 м
Шаг ЛПП и ЛПВ	300 м
Шаг ПП и ПВ	50 м

▲ Табл. 1. Методико-технические параметры сейсморазведочных работ МОГТ 3Д.

▼ Рис. 4. Зависимость количества трасс от азимута.





▲ Рис. 5. Анализ результатов камеральной обработки. Слева-направо:
Исходное волновое поле;
Результат камеральной обработки 2008 г (3DKPSDM (scale -to-time));
Результат камеральной обработки 2017 г (3DKPSDM (scale -to-time)).

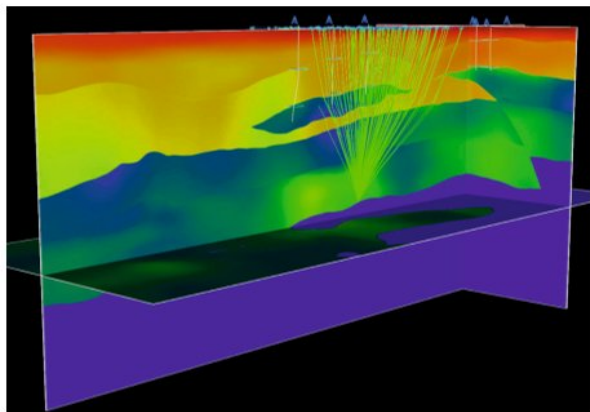
трация сейсмических колебаний выполнялась телеметрической сейсмостанцией UL-408 XL. Исходя из параметров (табл. 1), съёмка относится к классу узкоазимутальных [4] с полным, но существенно неравномерным, освещением азимутов (рис. 4). В течение 2008 года была выполнена камеральная обработка и интерпретация полученных данных, с последующим поисковым и разведочным бурением.

Для продолжения исследований данного района, требовалось либо расширение области геофизической изученности, что является дорогостоящим и крайне длительным процессом, либо переосмысление уже имеющейся информации, что более экономично, как в отношении вложений, так и сроков. Таким образом, решение, принятое ПАО АНК "Башнефть" о необходимости переобработки и переинтерпретации имеющихся данных МОГТ-3D было логичным, и, как показали финальные результаты

выполненной на данный момент переобработки, эффективным (рис. 5).

Сопоставляя результаты, полученные в 2008 и 2017 годах, можно отметить, что на сейсмической модели после переобработки, отсутствуют массивы ложных малоамплитудных разрывных нарушений, а также ложные малоразмерные структурные поднятия, обусловленные недостаточно точной параметризацией поля времен статическими поправками в 2008 году. Существенно улучшена прослеживаемость отражений, геометрия осей синфазности стала выдержаннее по площади. Таким образом, можно уверенно говорить о том, что задача по получению представления о геологической структуре решена в 2017 году более успешно.

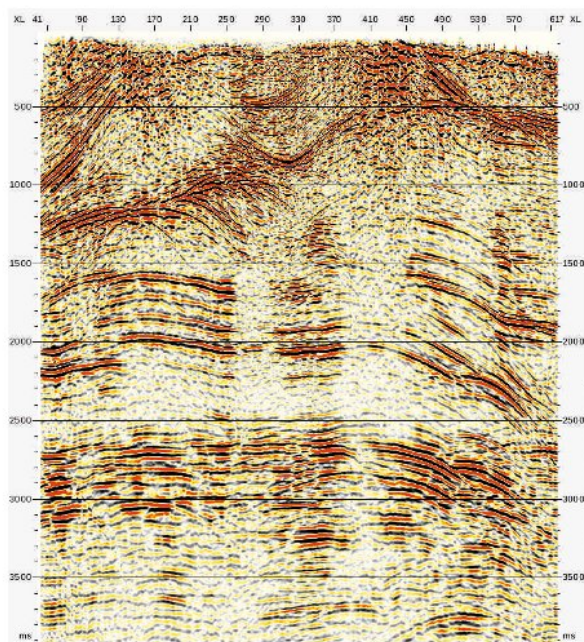
Фундамент, для получения данных результатов, был заложен в процессе выполнения временной обработки, но результирующая сейсмическая модель, конечно же,



▲ Рис. 6. Глубинно-скоростная модель, аппроксимирующая изучаемую среду.

получена в процессе выполнения стадий сейсмической миграции. В соответствии с технологическим графом, первоочередными задачами при выполнении миграции, являлись: выбор типа и построение адекватной скоростной модели. Анализ априорной сейсмической модели, показал, что описание изучаемой среды с помощью средних скоростей, не позволит учесть в должной мере проявления соляного диапиризма, наличие контрастных акустических границ, большой градиент изменения толщин солевого и надсолевого комплексов. Вследствие этого, параметризация изучаемой, в существенной степени, неоднородной, среды, была выполнена посредством последовательного перехода от упрощенной модели мгновенных интервальных скоростей к глубинно-скоростной модели более сложного класса, представляющей собой набор параметров Томсена [6], позволяющих учесть анизотропные (VTI) и градиентные характеристики (рис. 6).

Точность построенной на данном (и любом другом) участке глубинно-скоростной модели (ГСМ), конечно же, в полной мере зависит от объема имеющейся на момент построения геолого-геофизической информации. Однако, степень учёта данной информации в сочетании с результатами выполненного контроля качества на уровне мигрированных сейсмограмм, позволяет



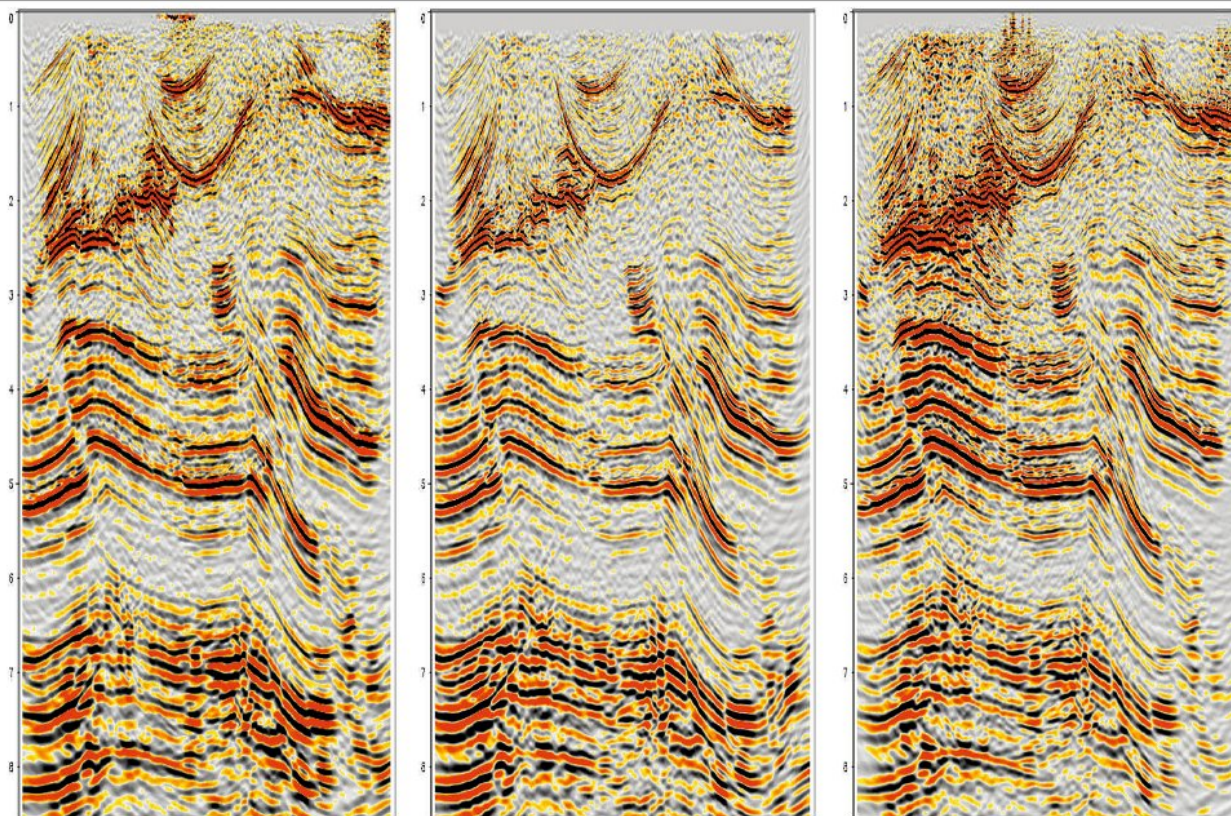
▲ Рис. 7. Пример волнового поля тестового участка до миграции.

говорить о том, что построение ГСМ было выполнено успешно и дальнейшее её усложнение, не целесообразно.

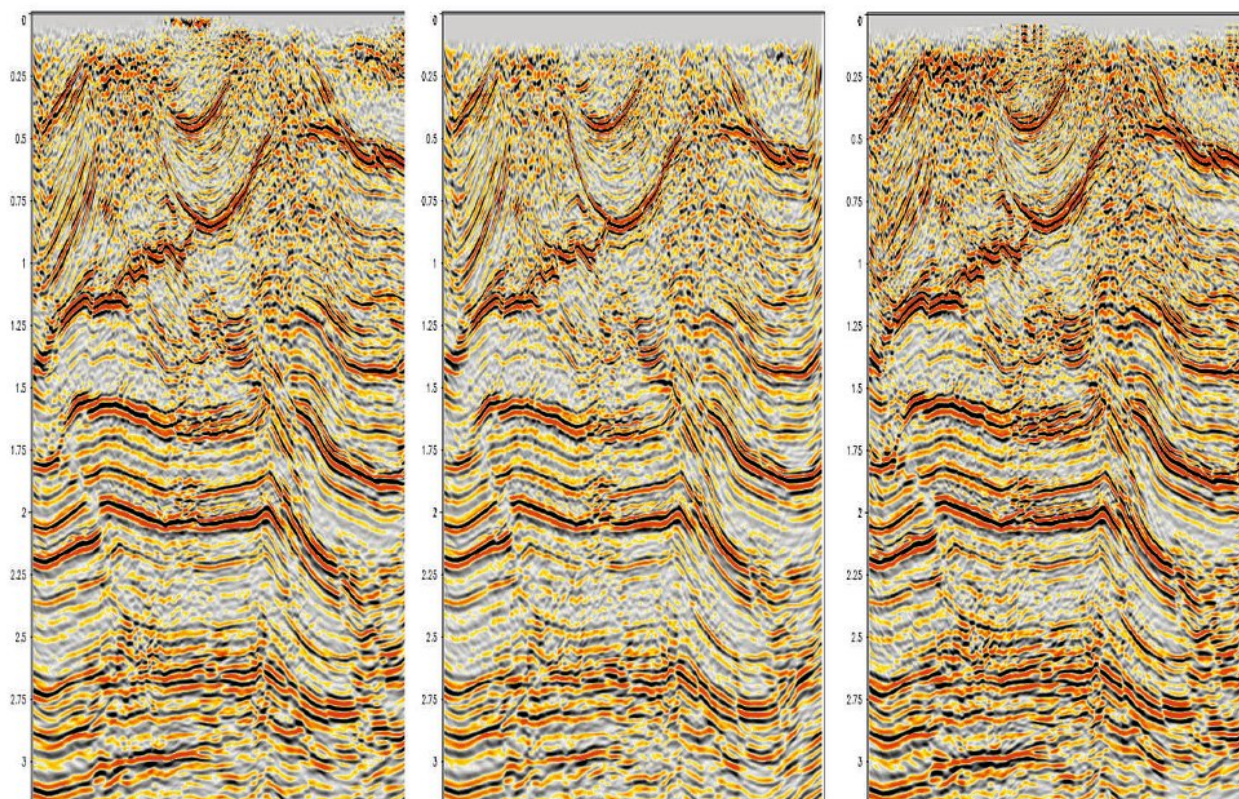
Для решения последующей задачи по выбору оптимального алгоритма миграции, прежде всего, были определены общие требования [2], которые, в целом, являлись и критериями оценки результатов расчёта по тому или иному алгоритму:

1. Приемлемое соотношение временных затрат на выполнение расчёта и качества получаемого результата;
2. Минимум собственных “миграционных” шумов и гибкость настроек параметров расчёта;
3. Корректный учёт неоднородностей, описанных через параметры построенной ГСМ;
4. Адаптивность и устойчивость алгоритма к недостаткам исходных данных (ГСМ и массива входных сейсмических трасс);

Исходя из операционной доступности, для выполнения практического тестирования были определены следующие алгоритмы миграции: Kirchhoff, Gaussian beam, RTM (Reverse Time Migration). Для тестового расчёта привлекался весь объём сейсми-



▲ Рис. 8. Результаты глубинной миграции до суммирования, полученные при применении различных алгоритмов. Домен – глубина. Слева-направо: Kirchhoff, Gaussian beam, RTM.



▲ Рис. 9. Результаты глубинной миграции до суммирования с применением АРУ, полученные при применении различных алгоритмов. Домен – время. Слева-направо: Kirchhoff, Gaussian beam, RTM.

Алгоритм	Объём данных, кв.км.	CPU	Время счёта, ч	Время счёта на 1 км.кв., ч	Ширина спектра	SNR	Вертикальная разрешённость, HZ
Kirchhoff	62	224	12	0,19	0-90	8	39
Beam	62	224	21	0,33	0-85	7	39
RTM	62	224	108	1,75	0-80	8,5	40

▲ Табл. 2. Врежяёмкость выполненнх расчётов и первичная оценка динамических характеристик полученных результатов.

ческих данных с целью получения результата в полосе, ограниченной по Inline. Данная полоса была выбрана по критерию максимально проявления на волновом поле неоднородностей изучаемого участка (рис. 7).

Перед расчётом, для каждого алгоритма тестировались и выбирались индивидуальные параметры, обеспечивающие получение наилучшего результата. Так же проводилась технологически необходимая дообработка сейсмограмм, например, перед RTM миграцией было выполнено тестирование и последующая регуляризация по ОПВ по всему объёму сейсмических данных. Тем самым были созданы условия, при которых, результаты расчёта по каждому алгоритму должны быть оптимальны.

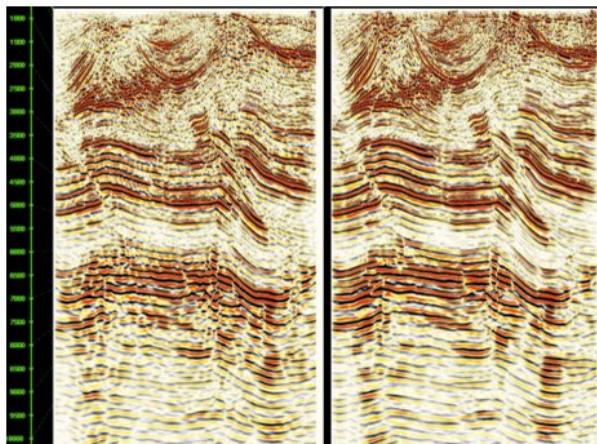
Анализ расчётов, выполненных по всем трём алгоритмам, показал общую схожесть мигрированных волновых полей в отношении фокусировки и прослеживаемости отражений (рис. 8). Данный факт более очевиден при применении АРУ (рис. 9).

Миграционные артефакты проявляются на всех трех вариантах примерно в равной степени. Наибольшие расхождения отмечаются в плане перераспределения амплитуд сейсмической записи как по латерали, так и по вертикали. Однако, оценить корректность полученного распределения динамических характеристик на результатах миграции, не представляется возможным. Для решения данной задачи – основным методом являет-

ся сейсмическое моделирование, но так как изучаемая среда в существенной степени нестационарна, параметризация модели для решения прямой задачи, и сам расчёт, по срокам выполнения и сложности превысили бы квоты, отпущенные на выполнение текущего проекта. Таким образом, анализ полученных результатов, не позволил однозначно выделить оптимальный алгоритм. Проанализировав временные затраты (табл. 2), а также, приняв во внимание иные критерии оценки эффективности алгоритмов, был сделан вывод, что базовая глубинная миграция по алгоритму Kirchhoff (Wavefront) позволяет получить результат с наилучшим соотношением качества и ресурсных затрат.

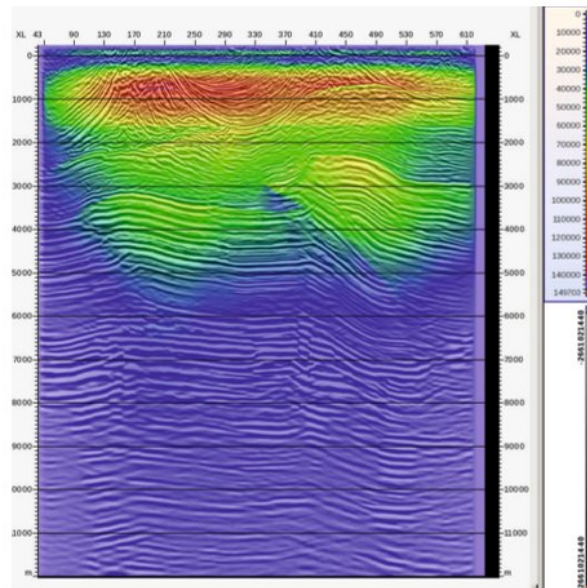
Полученные результаты вполне объективны, однако, принимая во внимание существенные ограничения параметров полевых наблюдений данного сейсмического проекта, а также фактор наличия иных алгоритмов миграции, не позволяют сделать вывод о однозначной бесперспективности применения алгоритмов миграции отличных от Kirchhoff в подобных сейсмогеологических условиях, тем более если участки – аналоги будут освещены посредством современных широкоазимутальных съёмок.

Данный тезис получает подтверждение, при рассмотрении результатов, полученных в ходе продолжения тестовых работ по поиску алгоритма, обеспечивающего прирост информативности сейсмической



▲ Рис. 10. Результаты глубинной миграции до суммирования, полученные при применении различных алгоритмов. Домен – глубина. Слева-направо: Kirchhoff, угловая миграция.

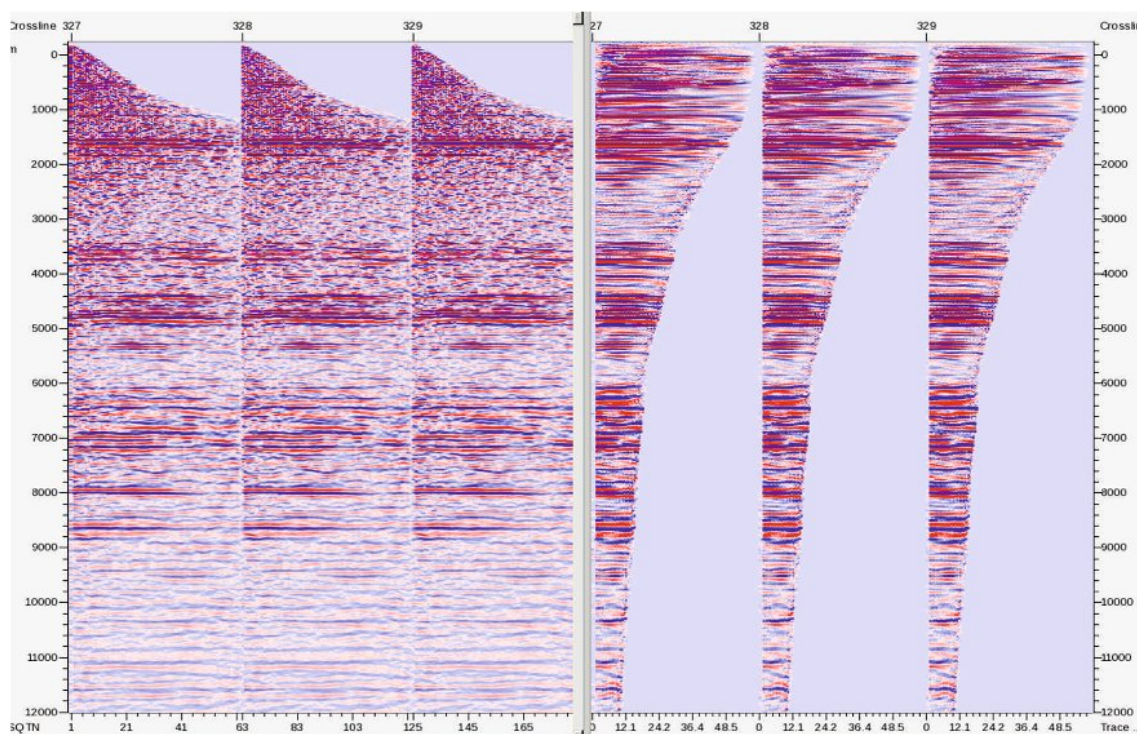
модели на рассматриваемом проекте. Был выполнен расчёт миграции по общим углам отражения (угловая миграция). Данный алгоритм [5] достаточно близок к Gaussian beam, однако, в используемой модификации, имеет ряд принципиальных отличий, основное из которых – трассирование лучей

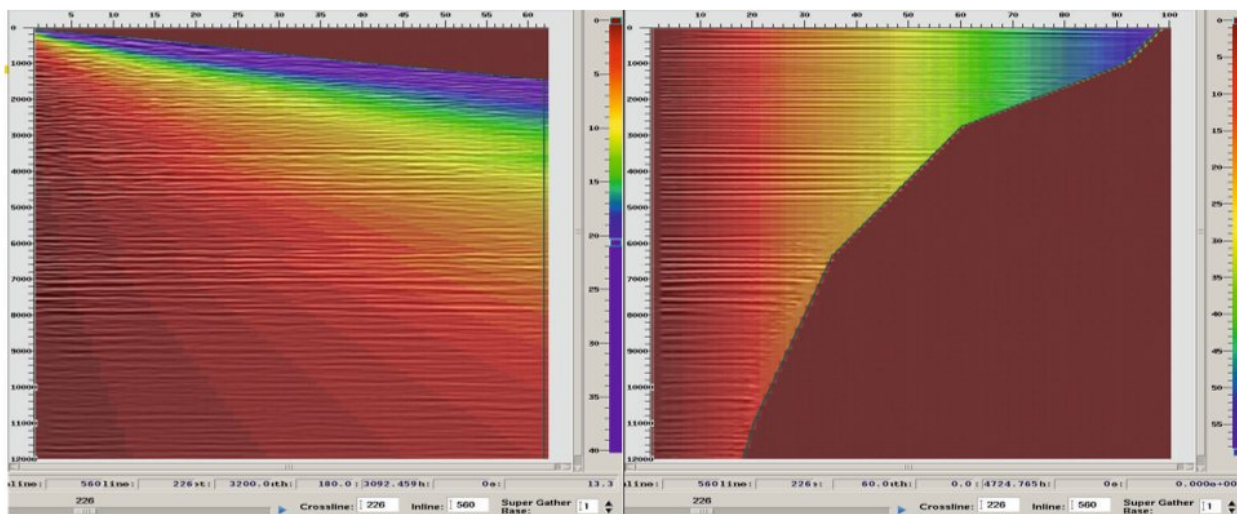


▲ Рис. 11. Атрибут фактической лучевой освещенности, совещенный с результатом угловой миграции. Домен – глубина.

из глубины к поверхности, а не наоборот. Для выполнения расчёта были использованы те же самые сейсмические данные и глубинно-скоростная модель, что и при тестировании других алгоритмов. Продол-

▼ Рис. 12. Пример мигрированных сейсмограмм, полученных при применении различных алгоритмов. Домен – глубина. Слева-направо: Сейсмограммы удалений (Kirchhoff), угловые сейсмограммы, отсортированные по углам раскрытия.





▲ Рис. 13. Пример мигрированных сейсмограмм, полученных при применении различных алгоритмов, совмещенных с атрибутом углов раскрытия. Домен – глубина. Слева-направо: Сейсмограмма удалений (Kirchhoff), угловая сейсмограмма.

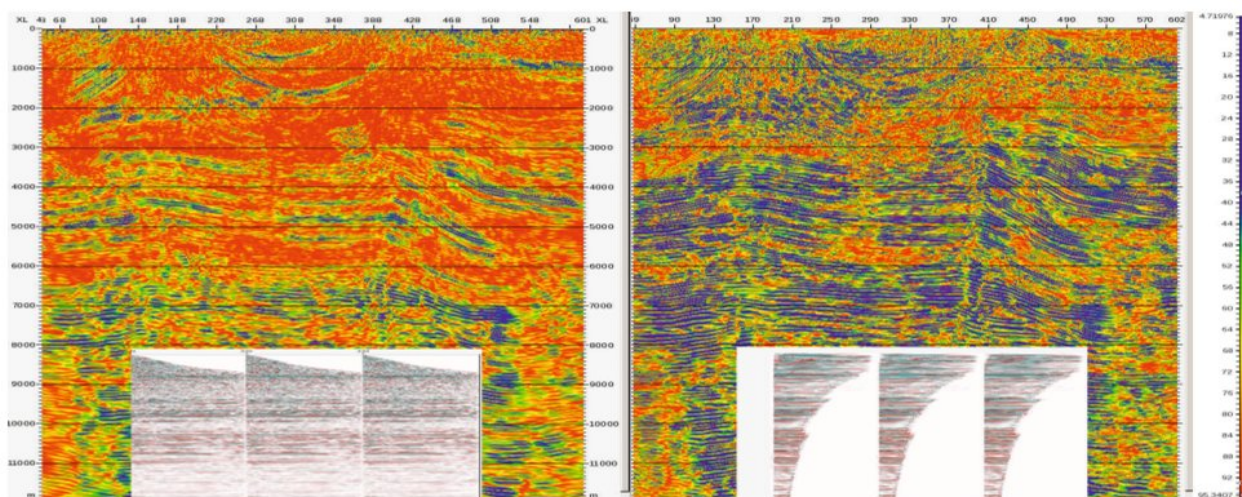
жительность расчёта угловой миграции сопоставима с Gaussian beam, то есть расчет, выполнялся примерно в два раза дольше, чем по алгоритму Kirchhoff, при этом, сопоставляя результаты расчётов по тестируемому алгоритму и базовому Kirchhoff, можно отметить следующее:

- Результат, полученный после угловой миграции – практически не содержит элементов “рассеянной компоненты” [3] (рис. 10). Данный эффект достигнут параметризацией расчёта лучевой трассировки. В результате, разрывные нарушения картируются более однозначно, улучшается прослежива-

емость отражений, как в зоне максимальной освещенности, так и в зоне, где данный параметр имеет не высокие значения (рис. 11). Распределение динамических характеристик не имеет существенных изменений относительно результата, полученного по алгоритму Kirchhoff, что также можно отнести к положительным аспектам, так как общая концепция распределения энергии не изменилась и не требует проведения длительного и ресурсоёмкого анализа и проверки.

При рассмотрении результатов угловой миграции на уровне сейсмограмм, так же

▼ Рис. 14. Пример атрибута “QC Factor”, рассчитанного по мигрированным сейсмограммам. Домен – глубина. Слева-направо: Kirchhoff, угловая миграция.



можно отметить положительные эффекты. Полученные угловые сейсмограммы практически не требуют постобработки, (рис. 12), что сводит вмешательство в мигрированное волновое поле к минимуму. Углы раскрытия представлены более презентативной выборкой сейсмических данных в верхней, целевой части сейсмической записи (рис. 13). Данные аспекты, позволяют сделать вывод, что полученные угловые сейсмограммы более пригодны к динамическому анализу, чем сейсмограммы, полученные после миграции по алгоритму Kirchhoff. Вывод подтверждается результатами расчёта атрибута "QC Factor" (рис. 14), дающим представление о значениях среднеквадратичного отклонения функции распределения амплитуд по углам раскрытия, снятого по мигрированным сейсмограммам, от аппроксимации Аки-Ришадса.

Таким образом, сейсмическая модель, полученная после миграции по общим углам отражения, обладает рядом значимых преимуществ по сравнению с результатами миграции по базовому алгоритму Kirchhoff, даже в условиях съёмки МОГТ-3D с достаточно ограниченными параметрами. Расчёт выполняется в приемлемые сроки, которые с учётом экономии на процедурах постобработки, а так же оптимизации параметров миграции, превышают сроки выполнения миграции Кирхгофа не более чем на 40-50 процентов.

Учитывая тот факт, что выполненная угловая миграция, представляет собой частный случай полно-азимутальной угловой миграции, и значимость комплекса результатов, получаемых при реализации данного миграционного решения, существенно выше, в ПАО АНК "Башнефть" принято решение о перспективности дальнейшего тестирования угловых и

полно-азимутальных угловых миграций.

В заключение, хотелось бы подчеркнуть, что сейсмическая миграция является процессом, качество результатов которого может быть обеспечено и улучшено не только за счёт корректно выполненной обработки во временной области, построения адекватной скоростной модели, но также и за счёт подбора оптимального миграционного алгоритма. При принятии решения о необходимости тестовых работ, подобных изложенным в данной статье, важно понимание того факта, что универсального алгоритма миграции, который бы обеспечивал получение оптимального результата в минимальные сроки, в любых сейсмогеологических условиях, на сегодня нет. Мы можем говорить только о наличии базового алгоритма, эффективность применения которого, на участках со сложными сейсмогеологическими условиями, разумно ставить под сомнение и выявлять более перспективные алгоритмические решения. Следует так же отметить, что получение сопоставимых результатов при тестировании миграционных алгоритмов, прежде всего, говорит о высокой точности построенной скоростной модели миграции, и вовсе не означает бесперспективность работ в данном направлении. Принятие же решения о смене базового алгоритма, объективно, не может быть сделано на основе одного прецедента, что подтверждает необходимость и значимость инициирования компаниями – недропользователями тестовых работ подобного рода.

Литература

1. Глоговский В.М., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Погружение волнового поля – альтернатива миграции до суммирования // Нефтегаз. 1998. № 1. С. 165–171.

2. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: ГЕРС, 2006. 479 с.

3. Ланда Е.И. Роль дифракционной компоненты волнового поля при построении сейсмических изображений // Технологии сейсморазведки. 2013. № 1. С. 5–31

4. Cordsen A., Galbraith M., Peirce J., 2000, Planning land 3-D seismic surveys (Geophysical Developments Series No.9): Tulsa, SEG.

5. Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain Wavefield Decomposition and Imaging // Geophysics. 2011. Vol. 76, N 1, January–February. P. S1–S13.

6. Thomsen L. Weak elastic anisotropy. Geophysics. 1986, 51, 1954–1966.

Подробнее об авторах

Акуленко

Александр Семёнович

менеджер по обработке сейсмических материалов ПАО АНК "Башнефть".

Окончил Гомельский государственный технический университет имени

П.О.Сухого в 2007 году.

Область научных интересов: полевые работы, обработка данных сейсморазведки.

Калинин

Алексей Юрьевич

главный геофизик ООО «Совфрансгео», кандидат технических наук.

Окончил Оренбургский государственный педагогический университет в 2001 году, Саратовский государственный университет в 2005 году, аспирантуру при Российском государственном геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе в 2009 году. Область научных интересов: обработка данных сейсморазведки, полевые работы.

Ляпин

Николай Вячеславович

ведущий геофизик ООО «Совфрансгео» в секторе обработки сейсмических данных. Окончил Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина в 2012 году.

Область научных интересов: обработка данных сейсморазведки.

Иванов

Павел Дмитриевич

геофизик 1 категории ООО «Совфрансгео» в секторе обработки сейсмических данных. Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 2016 году.

Область научных интересов: обработка данных сейсморазведки, глубинная миграция.

Уважаемые коллеги!
Коллектив редакции журнала

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ПОЗДРАВЛЯЕТ ВАС
С ДНЕМ ГЕОЛОГА!

Желаем новых вершин
и новых открытий!



СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
SKBSP.RU

РОССИЙСКОЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ



SCOUT-MSK

*Простой и надежный комплекс для
изучения ВЧР методом МСК*

- | | | |
|---|---|---|
| Прямой и обращенный микросейсмокаротаж | — | Управление комплексом через wi-fi с планшета |
| Низкочастотные 5 Гц геофоны | — | Непрерывная регистрация сейсмических данных с периодом дискретизации 0,25 мс до 670 часов |
| ПО SCOUT-MSK позволяет в поле: | — | Работа в любых условиях от -40 до +70 |
| визуализировать скомпонованную сейсмограмму | — | Работа в обсаженных и необсаженных скважинах на глубинах до 100 м. |
| отметить времена первых вступлений | | |
| построить годограф | | |
| рассчитать пластовую скорость. | | |

sales@skbsp.ru | +7 (8452) 570-500

Жизнь связала с сейсморазведкой?



Рекомендуем: новейшая беспроводная телеметрическая система **Sercel UNITE**



Предоставление в аренду полного спектра телеметрического оборудования Sercel 408/428; бескабельной системы UNITE. Техподдержка, сервис и обслуживание геофизического оборудования. Производство импульсных источников «Геотон»

Холдинг «ГЕОСЕЙС»
Контактная информация:
Тел. (Москва):
+7 (495) 694-19-07
+7 (495) 694-19-97
Тел. (Тюмень):
+7 (3452) 48-33-72

Электронная почта:
geoton@geoton.ru
geoseis-servis@yandex.ru
geoseisltd@gmail.com
http:
www.geoseisholding.ru
www.geoton.ru