

ISSN 2074-8906

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

ТЕМА НОМЕРА:

АПРЕЛЬ-ИЮНЬ

2/2022

Издается с 2002 г.

Зеленая сейсморазведка

ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

Представление новой отечественной разработки - бескабельной системы Geotom

Революция В Стоимости Сейсморазведки

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 IES



IGU-BD3C-5



IGU-16HR 3C



IAU-19



ВЫСОКОПЛОТНУЮ СЕЙСМОРАЗВЕДКУ ТЕПЕРЬ МОЖНО ДЕЛАТЬ ДЕШЕВО!

«ВКонтакте»



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

Email: sales@smartsolo.com.ru
Tel: +7 (969) 061-9960
Website: www.smartsolo.com.ru/www.dtcc.biz

Общие глобальные поставки

400,000+
каналов

ТЕМА НОМЕРА:**«Зеленая сейсморазведка»****СОДЕРЖАНИЕ:****Наши партнеры 4****КОЛОНКА РЕДАКТОРА****Главный редактор Слонов Д.Н. 5****ТЕМА НОМЕРА****«Зеленая сейсмика» - 10 лет от идеи до повсеместного применения!****Воцалевский В.З., Назыров Д.Д., Любимов Е.В. 6****Бескабельная сейсморегистрирующая система GEOTOM – универсальная, современная, импортоопережающая!****Гурьев С.В., Савин А.Н., Капустин Д.А. 11****Экологосберегающая («зелёная») сейсморазведка на суше и переходных зонах****Череповский А.В., Лаптев А.П., Пятунина Е.В., Мамедов О.Г. 14****О развитии «зеленых» технологий в ООО «ТСГК»****Камалтдинов Р.Р., Шевченко И.И. 25****Опыт применения малогабаритного источника и бескабельной системы регистрации для изучения ВЧР и неглубоко залегающих объектов****Турчков А.М., Ошкин А.Н., Коротков И.П., Воронцов В.В., Череповский А.В. 31****ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ****Некоторые размышления об очевидном в вибрационной сейсморазведке****Абдулвалиев М.Т, Навроцкий А.О. 40****Пути повышения производительности вибросейсморазведки****Жуков А.П., Скирта Д.А., Шехтман Г.А. 57****Контроль качества сейсмических высокоплотных исследований при высокой производительности работ****Закариев Ю.М., Грибов Э.Н., Дрибинский И.В., Марутян В.Г., Рябошапка С.М. 71****Обзор систем стабилизации и контроля кварцевых генераторов в современной донной сейсморазведке****Казанин А.Г, Базилевич С.О., Зимовский А.В., Куома Д.Г., Зиборов А.В., Долотказин И.Н., Кошелев Е.А., Ерофеев Ю.Г. 78****Полевые сейсморазведочные работы 2D с целью определения оптимальной методики для солянокупольной тектоники на левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения****Ван Ж., Жуков А.П., Калимулин Р.М. 84**

Интерпретация результатов наблюдений сейсмoeлектрического эффекта над газовым месторождением без дополнительной «подсветки» электрическим полем
Шайдуров Г.Я., Баландин П.В., Потылицин В.С. 95

Пример планирования и реализация работ ВСП в наклонно – направленной скважине
Горбачев С.В., Титов А.Б., Черкашнев С.В. 100

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Как можно работать еще быстрее. О некоторых особенностях интеллектуальной системы SmartSolo
Шарафутдинов В.О. 112

Оборудование INOVA в сложных условиях – возможности и перспективы
Джейсон К. 118

ЛЮДИ, ДАТЫ, СОБЫТИЯ

Геомодель

НАШИ ПАРТНЕРЫ



Главный редактор:
Слонов Д.Н.

Редакционная коллегия:

к.т.н. Абдулвалиев М.Т.
к.т.н. Белоусов А.В.
к.г.-м.н. Волкова Е.Н.
д.т.н. Гогоненков Г.Н.
к.т.н. Горбачев С.В.
Гурьев С.В.
к.т.н. Детков В.А.
д.т.н. Жуков А.П.
Запорожец Б.В.
к.г.-м.н. Золотая Л.А.
д.т.н. Кострыгин Ю.П.
д.г.-м.н. Михеев С.И.
к.т.н. Тарасов Н.В.
к.т.н. Циммерман В.В.
к.т.н. Череповский А.В.
д.т.н. Шехтман Г.А.

Руководитель проекта
Матвеев С.А.

Корректор:
Матвеева И.Э.

Учредитель:
СРО МОО ЕАГО

Издатель:
ООО «ПСРГео»



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

Обложка и оформление:
Мокроусов Д.В.

Вёрстка:
Мокроусов Д.В.

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

Подписано в печать:
18.06.2022

Дата выпуска:
30.06.2022

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

Издание зарегистрировано
в Министерстве РФ по
делам печати, телерадио-
вещания и средств мас-
совых коммуникаций за
номером ПИ № 77-7906
от 27.04.2001 г.
ISSN: 2074-8906
Web-сайт: psrgeo.ru

Организатор журнала:

Турлов П.А.

Дорогие коллеги!

Представляем вашему вниманию второй номер за 2022 год журнала «Приборы и Системы разведочной геофизики».

Тема номера - **«Зеленая сейсморазведка»**.

Объявляя данную тему, мы предлагали нашим авторам рассказывать о своем опыте использования в работе природосберегающих технологий и оборудования. И речь не только о решениях, минимизирующих рубку леса. Хотя, конечно, только эта тема заслуживает широкого и всестороннего освещения, и в этом номере ей посвящено несколько публикаций. Но «Зеленая сейсморазведка» — это не только лес. Это — и технологии, позволяющие уменьшить потравы посевов, либо пройти по урбанизированной территории или пересеченному рельефу, отработать без ущерба для природы на акватории.

Открывает тему номера статья постоянного автора нашего издания А. Череповского с коллегами из компании «Росгеология» «Экологосберегающая («зелёная») сейсморазведка на суше и в переходных зонах» с обзором российского и зарубежного опыта «зеленых» технологий. О мировом опыте выполнения проектов в сложных условиях также рассказывается в статье «Оборудование INOVA для сейсморазведки в сложных условиях — возможности и перспективы».

Разработанная компанией «Газпром нефть» технология «Зеленая сейсмика», минимизирующая воздействие на окружающую среду при геологоразведке, получила в 2020 году Национальную экологическую премию имени В.И. Вернадского. В статье В. Воцалевского и Д. Назырова «Зеленая сейсмика» - 10 лет от идеи до повсеместного применения!» рассказывается о развитии экологических стандартов в отрасли, внедренных прежде всего в компании «Газпром нефть».

«О развитии «зеленых» технологий в ООО «ТСГК» — так называется статья Р. Камалтдинова и И. Шевченко, освещающая опыт ТСГК в работе по стандарту «Зеленая сейсморазведка». Опыт наверняка будет интересен многим специалистам в отрасли.

Конечно, без легкого оборудования реализовать задачи сохранения природы невозможно. Компания «Геосейс» представляет новую отечественную разработку — нодальную

систему «Геотом» с возможностями, не имеющими аналогов в бескабельном оборудовании других производителей. Радует, что именно наш журнал выбран для презентации данной новинки, наверняка заинтересующей своими широкими возможностями как геофизиков, так и заказчиков сейсморазведочных услуг.

Как всегда, в данном выпуске мы не ограничиваем авторов темой номера. Сразу три статьи пришли как бы вдогонку тематике первого номера журнала за этот год (тема первого номера — «Производительность в сейсморазведке»). Об этом в своих статьях рассказывают специалисты компаний «Геосейсконтроль», «Геотек» и «Геофизические системы данных». Эти публикации будут полезны геофизикам-практикам, решающим задачу повышения производительности на своих проектах.

О комплексе оборудования, позволяющем успешно выполнять малоглубинные сейсмические работы, — в статье «Опыт применения малогабаритного источника и бескабельной системы регистрации для изучения ВЧР и неглубоко залегающих объектов» от группы авторов компании «Геоспейс».

«Пример планирования и реализация работ ВСП в наклонно-направленной скважине» — так называется статья С. Горбачева, А. Титова и С. Черкашина. Представлен современный подход к работам ВСП в ООО «РН Шельф-Арктика», позволяющий с помощью этого метода решать самые сложные геологические задачи.

Номер получился очень интересный и разнообразный. Напоминаем, что третий номер будет посвящен цифровым технологиям и безопасному производству.

Приятного вам прочтения.

С уважением,

Главный редактор журнала



Дмитрий Слонов

«Зеленая сейсмика» - 10 лет от идеи до повсеместного применения!

■ Воцалевский В.З., Назыров Д.Д., Любимов Е.В., «Газпромнефть-ГЕО», г. Санкт-Петербург

Развитие геологоразведочного бизнеса связано сегодня не только с повышением эффективности и безопасности. Растут требования к экологичности технологий, а реализация экологических рисков несет репутационные и экономические издержки компаниям, которые занимаются геологоразведкой. При этом увеличивается объем территорий, имеющих ограничения в доступе или особый статус (водоохранные зоны, защитные леса и пр.), которые необходимо покрыть сетью профилей 3D в ограниченное время полевого сезона.

С учетом этих условий в короткий зимний полевой сезон сейсморазведочные компании вынуждены существенно наращивать количество бригад, техники и, соответственно, всю инфраструктуру партий (жилые, производственные и социально-бытовые помещения). Численность работников может достигать 300 и более человек.

Чтобы обеспечить передвижение технологического транспорта и персонала по площади работ приходится готовить просеки, разбуривать 25 000 – 50

000 скважин для последующей регистрации сейсмического сигнала. Проведение подобных масштабных, по площади и по времени, работ повышенной опасности увеличивает риски (особенно при подготовке просек) и может отразиться на состоянии лесных массивов и почв изучаемых участков.

В «Газпром нефти» комплекс этих вопросов решают с 2013 года благодаря технологии «Зеленая сейсмика». Основной эффект её применения ощутим в регионах с плотными лесными массивами, сложным рельефом, или если на проекте требуется увеличить плотность сети наблюдения.

Компании удалось кардинальным образом уменьшить техногенное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения ширины профилей. При этом производительность и безопасность полевых работ выросла при полном сохранении качества регистрируемых данных.

Первоначально «Зелёная сейсмика» основывалась на применении в технологическом процессе сейсморазведоч-



Стандартная технология



Зеленая сейсмика

«Зеленая сейсмика»

>7,5 млн
автомобилей и транспортных средств в движении в Москве

0
человек погибших от землетрясений в последние 10 лет

Беспроводные системы регистрации данных

Сейсмостанция

Сейсмостанция

Сейсмостанция

Тяжелый транспорт

Легкая техника

Транспортная инфраструктура

Постепенно корректировались требования в технических заданиях на выполнение полевых СРР 3D. Таким образом, компания плавно трансформировала производственные процессы в подразделениях подрядных организаций, выполняющих работы для «Газпром нефти».

Основной потенциал применения технологии «Зеленая сейсмика» - это регионы с лесными массивами. Элементы технологии можно использовать на всех сухопутных сейсморазведочных



проектах. Она может использоваться как самостоятельно, так и в комплексе со стандартными методами сейсморазведочных работ, в зависимости от условий участка производственных работ.

«Газпром нефть» стремится создавать «живой» комплекс технических и организационных решений, полезный как добывающим, так и сервисным компа-

ниям. Все опытно-промышленные испытания (ОПИ) новых технических решений проводятся в плотном сотрудничестве с партнерами: «ГЕОТЕК Сейсморазведкой», «ТСГК», «Башнефтегеофизикой», «ТНГ-Групп». Основными драйверами развития остаются: ускорение цикла сейсморазведочных работ; повышение производительности;



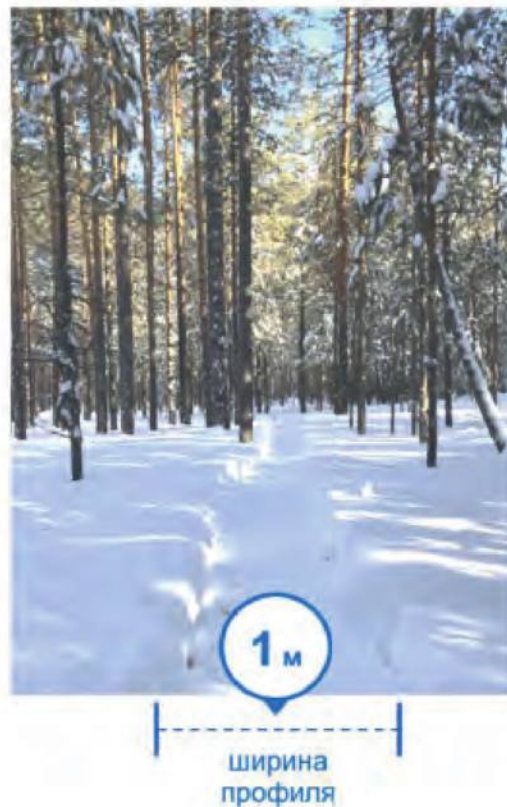
ТРАДИЦИОННАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

Увеличенная площадь вырубki деревьев



ЗЕЛЕНАЯ СЕЙСМИКА

Максимальное сохранение деревьев



оптимизация работ; сокращение численности персонала; снижение веса сейсмопартии.

Каждое техническое решение проходит жизненный цикл от идеи до ОПИ, но не все они тиражируются. К примеру, на встречах с партнерами много раз обсуждался потенциал беспроводной детонации сейсмических зарядов и ее влияние на оптимизацию полевых СРР. В результате поисковых научно-исследовательских работ по технологиям беспроводной детонации в мире было найдено несколько технических решений. Однако они не подошли для применения в сейсморазведке, в основном из-за точности инициирования.

В зимнем полевом сезоне 2021-2022 гг. «Газпром нефть» продолжила тиражирование технологии «Зеленая сейсмика».

100% работ на территории ХМАО и Томской области выполнено с ее применением. Только за один сезон сохранено почти 1,5 миллиона деревьев.

С 2016 по 2022 год технология была использована на 20 сейсморазведочных проектах и позволила сохранить более 7,5 миллионов деревьев.



Владислав ВОЦАЛЕВСКИЙ
Руководитель Центра разведочной геофизики
«Газпромнефть-ГЕО»

«Зеленая сейсмика» доказывает, что технологии могут быть не только экологичными, но и экономически эффективными. Благодаря ее использованию, «Газпром нефть» сокращает объемы подготовки просек и успешно выполняет высокоинформативные сейсморазведочные работы 3D на участках с ограниченным доступом тяжелой техники или запретом на вырубку леса. Мы будем прилагать максимум усилий для дальнейшего развития и усовершенствования технологии «Зеленая сейсмика» для расширения возможностей выполнения ГРП, повышения промышленной и экологической безопасности.



Дмитрий НАЗЫРОВ
Руководитель по разработке продуктов
Центр регионального и сейсмического моделирования
«Газпромнефть НТЦ»

Достигнутые за эти годы результаты – ещё не технологический предел «Зеленой сейсмики». Мы продолжаем развивать метод и двигаться к цели — сейсморазведке без рубки леса. Фокусом развития становится цифровизация и автоматизация. Системное взаимодействие с экспертным сообществом из нефтесервиса, нефтегазовых компаний и производителей оборудования – важная составляющая этой работы. Совместно мы развиваем и продвигаем всю отрасль вперед!



Евгений ЛЮБИМОВ
Руководитель программ развития разведочной геофизики
Центра разведочной геофизики «Газпромнефть-ГЕО»

Технология «Зеленая сейсмика» является неотъемлемым показателем современной сейсморазведки. Она позволяет не только добиваться максимальной эффективности и безопасности работ, но и реализовывать проекты с заботой об окружающей среде. Сегодня «Зеленая сейсмика» используется в ключевых регионах деятельности «Газпром нефти» и мы видим положительные эффекты от тиражирования этой технологии.

Бескабельная сейсморегистрирующая система GEOTOM – универсальная, современная, импортоопережающая!

■ Гурьев С. В., Компания ГЕОСЕЙС, г. Москва

■ Савин А. Н., Капустин Д. А., СейсТех, г. Москва

Современный рынок требует от полевой регистрирующей системы с одной стороны быть легкой, надежной, не требующей постоянного обслуживания и наладки, а с другой – обеспечивающей постоянный контроль за состоянием расстановки и получаемым геофизическим материалом. К сожалению, любая телеметрическая система, присутствующая на рынке, остается компромиссом в решении этих двух задач. Производитель старается решать эти задачи, либо наполняя бескабельные блоки инструментами внешнего контроля в реальном времени, либо стараясь максимально облегчить кабельные системы. И каждая новая разработка, выходящая на рынок, дает все более и более комплексное решение этих двух задач.

Сейсморегистрирующая система GEOTOM, разработанная в 2018 году, и выходящая на рынок в 2022 году, отличается от всех существующих нодальных

систем именно своей универсальностью.

Система GEOTOM создана для работы в сложных поверхностных и природно-климатических условиях, и имеет главную задачу: минимизацию воздействия на окружающую среду при эксплуатации за счет снижения объемов вырубki леса. При этом, система дает возможность контролировать не только статусы удаленных блоков и их работоспособность, но и выборочно получать сейсмическую информацию с профиля.

Несмотря на продолжающуюся работу по оптимизации технических решений, реализованных в данной разработке, полевые испытания в производственном режиме показали отличные результаты. Каналы GEOTOM уже готовы регистрировать сейсмические данные в течение всего сезона проведения сейсморазведочных работ без подзарядки/замены источников питания и не требуют для своей работы какого-либо другого оборуду-

▼ Рис. 1. GEOTOM – для легкого оборудования достаточно легкого транспорта.



Размеры, В×Д×Ш	310×135×130 мм
Масса	1.5 – 1.6 кг
Динамический диапазон	126 дБ
Время непрерывной работы	до 180 дней в режиме работы в режиме 12 ч. работа/12ч. Перерыв
Период квантования	0.25, 0.5, 1, 2, мс
Точность временной синхронизации	10 мкс
Контроль и управление	По радиоканалу
Периодичность статусной информации	~2 мин
Передача данных	По радиоканалу или оптическому каналу при установке в модуль сбора данных
Питание	Батарейный блок
Подключение геофонов	Любые геофоны с разъемом КСК
GPS навигация	GLONASS/GPS/GALILEO
Возможность уверенной работы	1 спутник
Режим работы для определения координат	RTK
Точность определения координат	<10 см
Автоматическое присвоение номера пикета по координатам	ДА

▲ Табл. 1. Технические характеристики GEOTOM.

дования. Подключать к GEOTOM можно любой аналоговый сейсмоприёмник, будь то стандартная группа GS20DX или индивидуальный геофон с экзотическими характеристиками. Сводные параметры системы представлены на Рис. 2.

Что отличает GEOTOM:

- Система оборудована батарейным блоком со сроком работы >90 дней при круглосуточной записи с шагом дискретизации 2 мс и температурой окружающей среды -40°C;



▲ Рис. 2. Компактность блоков регистрирующей системы.

- При работе 12 часов в сутки время работы увеличено до 6 месяцев;
- Прибор работает всего с одним спутником в любой системе позиционирования;
- Удобный интерфейс позволяет проводить автоматическое присвоение номера пикета по координатам;
- Приборы совместимы с любыми источниками, любыми системами синхронизации, любыми аналоговыми геофонами;
- Приборы продолжают работать при снежном покрове 1 м, при этом блок, может быть поднят над снегом после снегопадов без переустановки сейсмоприемника;
- Модули оборудованы светодиодными маячками-индикаторами.

Чтобы гарантировать качество записываемых сейсмических данных и отсутствие потерь данных (например, по причине разрядки встроенных аккумуляторов), модули GEOTOM сообщают центральной станции свое состояние не реже 1 раза в 2 минуты после установки модулей на профиле. Модули обладают низким энергопотреблением, и в течение 6 месяцев – всего сезона сейсморазведочных работ при температуре до -40°C – не требуют замены и подзарядки элементов питания. Таким образом, современная бескабельная система GEOTOM разработана с учетом реальных



▲ Рис. 3. GEOTOM – работа в условиях населенного пункта по высокоплотным методикам.

условий выполнения сейсморазведочных работ на территории РФ.

Передача данных и контроль расстановки.

- По радиоканалу можно осуществлять не только контроль расстановки в режиме реального времени, но и передавать выборочно сейсмическую информацию;
- Вариативность скачивания сейсмических данных;
- Скорость скачивания данных с использованием модуля скачивания – 8/48 Мбит/с;
- Скорость передачи данных по радиоканалу от блока на станцию – 300 Кбит/с
- Передача данных от блока к блоку – 100 Кбит/с;
- Скачивание данных во время смотки/размотки оборудования;
- Отображение расположения модулей на карте;
- Выборочный визуальный контроль трасс в режиме реального времени;
- Определение по запросу следующих параметров расстановки и визуализация на карте:
 - Гистограмма распределения шумов;

- Угол наклона группы геофонов;
- Электрическое сопротивление групп геофонов.

Подробнее об авторах



Гурьев
Сергей Владимирович

Компания ГЕОСЕЙС



Савин
Алексей Николаевич

Компания СейсТех



Капустин
Дмитрий Александрович

Компания СейсТех

Экологосберегающая («зелёная») сейсморазведка на суше и в переходных зонах

- Череповский А.В., АО «Росгеология», г. Москва
- Лаптев А.П., Пятунина Е.В., Мамедов О.Г., ПАО «Пермнефтегеофизика», АО «Росгеология», г. Пермь

В нашем веке вопросам защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов придаётся всё большее значение. Степень воздействия на природу – это один из факторов, который необходимо принимать во внимание при проектировании и выполнении геологоразведочных работ (ГРП), и сейсморазведочных работ (СРР) в частности. Хорошо известно, что СРР связаны с применением большого количества громоздких транспортных средств, таких как бульдозеры, крупнотоннажные грузовики, буровые установки и вибрационные источники, которые наносят значительный ущерб природе, поскольку требуют прокладки просек в лесных массивах. Что касается Крайнего Севера, то многолетнемёрзлые породы могут подвергнуться долговременной эрозии. Такие повреждения как термокарст (который возникает там, где тает вечная мерзлота) и провалы в грунте очень медленно восстанавливаются и могут сохраняться в Арктике до 70 лет [15]. Поэтому экологосберегающие технологии СРР становятся всё более востребованными.

Канада – хоть похожа на Россию...

Сейсмические исследования с целью изучения строения земных толщ и поиска различных полезных ископаемых выполняются во всем мире уже около ста лет. Например, в Канаде, наиболее близкой к Российской Федерации по природным условиям, сейсморазведка на нефть и газ выполняется с 1929 года. В лесных массивах для выполнения сейсмических исследований там прокладывались широкие прямолинейные просеки для линий возбуждения и приёма, шириной от 6 до 10 м, чтобы обеспечить проезд тяжёлых транспортных средств. Подготовка просек зачастую включала бульдозерную валку или спиливание деревьев и корчевку пней, если это было необходимо. Соответственно, некоторый вред неизбежно наносился почвенному слою и вегетативному надпочвенному слою. В настоящее время при «обычной» сейсмике просеки имеют ширину 4,0–5,5 м, и они по-прежнему прямолинейные, что требует рубки леса.

С начала 1990-х годов в Альберте и других канадских провинциях стали внедряться экологосберегающие технологии, и ширина просек, иногда немного

криволинейных, постепенно сократилась до 1,5–5,0 м, в зависимости от типа источников колебаний и регистрирующего оборудования. Негативное воздействие на грунт и травянистый покров резко уменьшилось благодаря экологосберегающим технологиям. Несмотря на это, даже через несколько десятилетий многие сейсмические профили остаются заметными (рис. 1), особенно на торфяниках, занимающих 90% территории болот в провинции Альберта, где выполняются основные объёмы СРР [14].

В Канаде торфяник определяется как экосистема болотного типа с толщиной

▼ Рис. 1. Повреждение грунта после проезда тяжёлой техники на севере Канады.



органического почвенного слоя не менее 40 см. Торфяники – это важный источник атмосферного метана (CH_4), являющегося одним из основных парниковых газов. ГРП на территориях, где развиты торфяники, приводят к уплотнению почвы и увеличению её влажности, что вызывает повышенное выделение метана в атмосферу. Согласно исследователям из университетов Ватерлоо и Калгари [16], в провинции Альберта по крайней мере 2000 кв.км торфяников подверглись воздействию транспорта, используемого при ГРП, что увеличивает выделение метана на 4,5–5,0 килотонн в год или повышает общее выделение парниковых газов от землепользования и лесохозяйственных предприятий в этой провинции на 7–8%.

Конечно, наилучшая практика – проводить ГРП на торфяниках только в зимнее время, когда грунт промерзнет на достаточную глубину. Однако, расчистка растительности на сейсмических профилях и движение тяжёлого транспорта по торфяникам всё равно часто приводят к нарушению почвенного слоя и травянистого покрова. В результате меняется характер растительности и повышается уровень грунтовых вод. Температура почвы на сейсмических профилях повышается, во-первых, благодаря увеличению солнечного света, которому не препятствуют кроны деревьев, и во-вторых, что более важно, благодаря увеличению теплопроводности более водонасыщенного грунта. Через три-четыре года после прокладки просек может ощущаться влияние на видовое разнообразие травянистых растений до 15 м вглубь леса от края просек [16]. Рекомендуется регулярно обследовать просеки и принимать решения об исправительной рекультивации, чтобы придать процессу восстановления леса правильный характер.

Воздействие ГРП на окружающую среду в Канаде изучается всё пристальнее как федеральными, так и местными властями уже более 20 лет [9]. В провинции Альберта разработаны положения о защите окружающей среды, которые включают следующие требования:

- согласование допустимой ширины подъездных путей и просек для линий возбуждения и приёма в лесных массивах. Сейсморазведочные партии должны получать разрешения на рубку деревьев и стремиться к минимально необходимой расчистке просек;

- получение разрешений на кратковременное или долговременное использование водных ресурсов в местах размещения лагерей полевых партий. Запрещается сбрасывание вредных веществ в водоёмы с рыбой и нанесение ущерба обитателям водоёмов. Высокая концентрация вредных веществ может вызвать гибель рыбы;

- предотвращение загрязнения водных объектов. Соблюдение мер предосторожности при пересечении персоналом сейсмопартий ручьев и рек во избежание воздействия на их фауну;

- при выполнении взрывной сейсморазведки, жидкости и материалы, используемые для бурения взрывных скважин, не должны содержать вредных соединений. После завершения буровзрывных работ необходимо обеспечить закупорку взрывных скважин безвредными материалами, а также сбор мусора;

- если ГРП затрагивают традиционные территории коренных малочисленных народов Севера, то со стороны исполнителей ГРП может понадобиться представитель для обсуждения степени воздействия на окружающую среду и мест обитания диких животных от различных видов деятельности полевых партий, включая полёты вертолётот.

Канадская ассоциация нефтедобывающих компаний (CAPP) и Канадская ассоциация геофизических подрядчиков (CAGC) работают над тем, чтобы при СРР применялись «лучшие практики», то есть экологосберегающие технологии с минимальным воздействием на природу или даже его отсутствием [13]. Такие технологии называли «Low impact seismic» – это использование малогабаритной техники и прокладка криволинейных линий возбуждения в обход крупных деревьев во избежание их рубки. Кроме того, криволинейные просеки также полезны для того, чтобы хищники не получали прямой видимости на большие расстояния, то есть не получали преимуществ при охоте на стада оленей и других диких животных [14].

Изменения в практике выполнения СРР и других геофизических работ в Канаде диктуются также следующими соображениями [13]:

- сократить сеть «искусственных коридоров» в лесных массивах и увеличить скорость восстановления естественной растительности;
- снизить влияние на почву, степень её эрозии и, следовательно, необходимость засеивать определённые участки земли после выполнения ГРР;
- обеспечить сейсморазведчикам доступ на территории с повышенной экологической чувствительностью, где «обычные» технологии неприемлемы.

Стандарты экологосберегающей сейсмики варьируют в широких пределах в зависимости от орографических условий. В провинции Альберта в 2002 году было принято, что допустимо рубить просеки шириной 1,75–2,0 м для линий приёма и 2,5–5,5 м для линий возбуждения, причем с использованием транспортных средств с низким удельным давлением на грунт или вручную. Отмечается,

что стоимость подготовки просек вручную на 30-50% выше, чем традиционными способами, в зависимости от ширины просек и густоты леса.

Механизированная подготовка просек с использованием мульчеров имеет несколько важных преимуществ перед бульдозерной валкой [7]: благодаря обходу больших деревьев (диаметр ствола более 25 см) и измельчению древесины и кустов, вся ширина просеки может использоваться для проезда техники (рис.2). Измельченная древесина равномерно распределяется на поверхности земли, создавая безопасное покрытие для транспортных средств и пешего персонала.

Рубка меньшего количества деревьев означает, что снижается отрицательное воздействие на природу, и просеки быстрее зарастают, поскольку почвенный слой не нарушается, и в нём сохраняются корневые системы деревьев. Не нужно сжигать поваленный лес, поэтому снижается пожароопасность и отсутствует загрязнение воздуха. Механизированная подготовка просек выполняется в 2–3 раза быстрее, чем при работах вручную. Кроме того, отсутствие бензопил повышает безопасность работ и снижает травматизм.

▼ Рис. 2. Мульчер для расчистки криволинейных просек в обход крупных деревьев.



В Канаде подготовка просек вручную (шириной 1,5–1,75 м) обычно выполняется только для линий приёма, и она может быть необходима в прибрежных и береговых зонах рек и озёр и на путях миграции диких животных. Пересечения рек и ручьев должны быть сделаны так, чтобы не разрушать их берега и исключить гибель рыбы. При подготовке таких «экологических» просек используются бригады из 4 человек с цепными пилами и другими ручными инструментами. Даже при прокладке криволинейных просек, как правило, требуется рубка кустарника и обвязка деревьев. Наклонённые и старые деревья могут быть спилены в целях безопасности, или просеку приходится искривлять в обход таких деревьев с безопасной стороны. Подготовка узких просек оставляет минимальные прогалины в кронах деревьев. Воздействие на природу считается «нулевым», если просеки не видны с воздуха через 1 год.

Применение вертолётов при СРР может обеспечить снижение негативного воздействия на природу, в первую очередь благодаря уменьшению количества тяжёлых наземных транспортных средств в сейсмопартиях. В Канаде вертолёты широко используются для доставки персонала, а в некоторых случаях на них перевозят лёгкие бурстанки для бурения взрывных скважин. В то же время, для безопасной высадки и посадки персонала в лесных массивах необходимы вертолётные площадки диаметром 30–35 м. Такие площадки делают приблизительно через 1 км по линиям возбуждения. Там, где есть возможность, используются естественные прогалины (лужайки) или ранее расчищенные площадки.

Как известно, основной объём СРР во всем мире выполняется с использовани-

ем тяжёлых виброисточников, имеющих большие габариты и вес порядка 30–38 тонн. Для групп виброисточников на прямолинейных профилях 2Д могут потребоваться просеки шириной до 6,0–6,5 м. На проектах 3Д, где допустимы криволинейные линии возбуждения, требуются просеки шириной не более 4,5 м. Для лёгких и маневренных мини-вибраторов, весом от 12 до 17 тонн, просеки можно сузить до 3 м, но мини-вибраторы обычно не годятся при глубинах исследования больше, чем 2000 – 3000 м [10]. Лёгкие виброисточники (рис.3) могут использоваться бок о бок с тяжёлыми вибраторами на тех участках, где тяжёлые вибраторы не пройдут из-за поверхностных условий.

При проектировании новых сейсморазведочных исследований целесообразно предусмотреть использование старых просек, если они не слишком заросли. Иногда старые просеки даже сложнее использовать, чем окружающий лес, из-за густого кустарника. Кроме того, сеть имеющихся просек может не соответствовать новому проекту с более плотной геометрией наблюдений.

Важно то, что разработка новых аппаратурно-методических решений позволила геофизикам работать в экологичес-

▼ Рис. 3. Легкий виброисточник для передвижения по узким криволинейным профилям.



ки чувствительных регионах и на площадях с очень сложными поверхностными условиями. Современное сейсморазведочное оборудование стало намного легче и компактнее, что позволяет снизить воздействие на окружающую среду. В настоящее время в Северной Америке бескабельные регистрирующие системы полностью вытеснили кабельные системы [11]. Это произошло по двум причинам:

1) недорогие бескабельные системы позволяют снизить стоимость сейсмических проектов;

2) современные бескабельные системы состоят из узлов, которые являются индивидуальными сеймостанциями, которые можно устанавливать с любым шагом наблюдений во всех доступных местах на площади работ.

Именно гибкость бескабельного оборудования сделала его столь популярным во многих регионах мира. Сочетание бескабельного регистрирующего оборудования и компактных вибрационных источников позволяет упростить получение разрешений на СРР в заповедниках и населённых пунктах.

Естественно, что землевладельцы следят за воздействием СРР на грунт и растительность. Бескабельные регистрирующие системы были восприняты землевладельцами очень хорошо, потому что для доставки и установки узлов используются легкие транспортные средства, а после установки регистрирующее оборудование практически невидимо для местного населения и диких животных. Полевые работы выполняются без длительного вмешательства в сельскохозяйственную деятельность и жизнь местных жителей. Автономное бескабельное оборудование доказало свою надёжность, и в большинстве случаев удаётся получить

свыше 99% всех ожидаемых трасс. Вопросы своевременной зарядки аккумуляторов и воровства оборудования теперь рассматриваются как решаемые или даже второстепенные.

Опыт экологосберегающей сейсморазведки в России

Некоторые отечественные сейсморазведочные компании, такие как «Ханты-мансийскгеофизика», «Пермнефтегеофизика», а за ними «Удмуртнефтегеофизика» и «Башнефтегеофизика», начали переход на экологосберегающие технологии по требованию своих Заказчиков около 20 лет назад и в последние годы на отдельных проектах полностью исключили рубку леса. Пермский край и Свердловская область по орографическим, геологическим и ландшафтным особенностям представляют собой уникальные регионы, где постановка СРР на нефть и газ связана со значительными трудностями. К ним относятся: резкопересечённый предгорный рельеф, залежённость (от 60 до 100 %), наличие многочисленных ручьёв и рек, отсутствие достаточного количества дорог, пригодных для проезда техники. Все эти факторы приводят к тому, что обширные территории этих и других областей РФ доступны для сейсморазведки только зимой. На болотистых участках, вследствие их плохого промерзания, особенно на открытых болотах (соляной карст), тяжёлая техника не в состоянии передвигаться по местности даже после месячной укатки снежного покрова и морозной зимы.

Для освоения подобных территорий специалистами ОАО «Пермнефтегеофизика» был предложен способ проведения сейсморазведки, основанный на использовании малогабаритного бурового оборудования с оригинальными



▲ Рис. 4. Варианты исполнения облегченной буровой установки УБШМ-1-13.

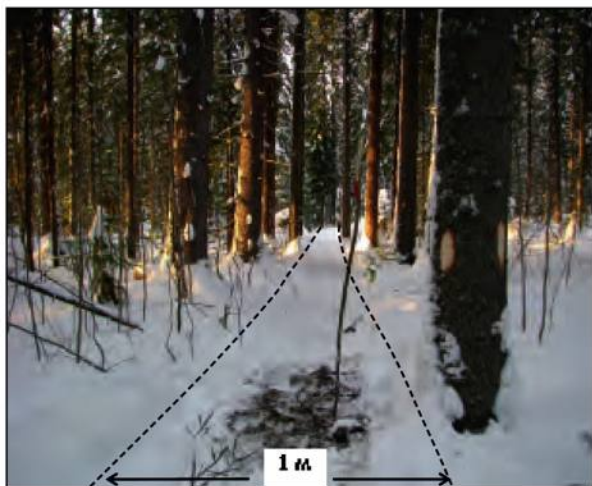
конструкторскими, техническими и методическими решениями. В 2007 году был получен патент Федерального Института Промышленной Собственности на полезную модель №61894 [4]. Работы проводятся по визирам, шириной до 1 м, с использованием малогабаритных буровых установок УБШМ-1-13 и возбуждением упругих колебаний зарядами ВВ в скважинах глубиной 3–10 м. Для зимних работ буровые установки смонтированы на санях и буксируются снегоходами «Буран» (рис. 4а). Для летних геофизических работ заводом «Курганавторемонт» в содружестве со специалистами ОАО «Пермнефтегеофизика» для буровой установки было сконструировано самоходное шасси ШС-3 (рис. 4б).

Всё наземное сейсмическое оборудование переносится и раскладывается либо вручную, либо с использованием малогабаритных самоходных шасси, а в зимних условиях – на снегоходах «Буран», способных транспортировать прицепы массой до 500 кг. Зарядка скважин малыми зарядами (от 0,3 до 0,9 кг) и взрывание производится в пешем варианте с применением переносных блоков управления. Скважины укупориваются шламом от бурения во избежание выбросов газов на дневную поверхность. Вся энергия взрывов идет на образова-

ние упругих сейсмических волн. Нарушения почвенного слоя и загрязнение грунтовых вод не происходит.

Если на труднодоступных участках СРР выбор источника возбуждения без сомнения происходит в пользу взрывов в скважинах, пробуренных с помощью компактных бурстанков, то на площадях с различными ландшафтными условиями экономичнее применять комбинированные источники, что позволит существенно повысить производительность работ: взрывные источники – на труднодоступных и залесённых участках, а вибрационные или импульсные – на остальной части площади работ. Такой комбинированный подход к возбуждению сейсмических сигналов позволяет высвободить людские ресурсы и средства, и, кроме того, позволяет отрабатывать те территории (населённые пункты, промышленные зоны, трубопроводы и т.п.), где проведение буровзрывных работ заведомо невозможно.

В последнем зимнем полевом сезоне 2021-22 гг. компания «Пермнефтегеофизика» по заказу ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» отстреляла в Пермском крае две площади 3D по технологии экологосберегающей сейсморазведки – это Западно-Осинский лицензионный участок и Западно-Вишерская площадь. Несмотря на очень сложные поверхностные усло-



▲ Рис. 5. Фрагмент отработанного профиля возбуждения шириной 1 м.

вия, данные объекты были отработаны без пропусков, включая заболоченные территории, благодаря применению малогабаритных буровых станков УБШМ-1-13, транспортируемых с помощью снегоходов «Буран» по просекам шириной всего 1 м (рис.5). Глубина одиночных скважин была равна 8 м, но в некоторых случаях использовались группы из 3 скважин глубиной по 3 м. Поскольку корневая система хвойных деревьев обычно не проникает глубже 2,5 м, указанная глубина бурения исключала негативное воздействие на лесную экосистему.

В пределах реки Кама и мелких водоёмов бурение взрывных скважин осуществлялось со льда. Глубина бурения взрывных скважин, с использованием полых шнеков диаметром до 60 мм, была не менее 4 м под грунт, независимо от толщины водного слоя. Заряд погружался на забой через полые шнеки. Данный вид исследований позволяет состыковывать речные и сухопутные профили и отрабатывать участки, покрытые «мелкой водой» (глубины от 0 до 5 м). Такой подход, получивший название «донная сейсморазведка», был официально зарегистрирован более 10 лет назад и получил статус изобретения [3].

Зимой 2021-22 гг. на Западно-Вишерской площади работы выполнялись сразу двумя сейсморазведочными партиями компании «Пермнефтегеофизика» для того, чтобы отстрелять площадь 465 кв.км за один зимний сезон. Средняя производительность превысила 300 ф.н./сутки, а пиковая производительность достигла 511 ф.н./сутки.

Всего по состоянию на 01.01.2022 компанией «Пермнефтегеофизика» с использованием экологосберегающих технологий по методике МОГТ 2D отработано 28 площадей (в сумме 7128,0 км профилей), а по технологии 3D отработано 112 площадей объёмом 14033,8 кв. км. Экологосберегающие технологии СРР позволили сохранить 3807,7 га земель лесного фонда. Во всех без исключения случаях были получены высокие геологические результаты, позволившие подготовить под глубокое бурение 72 структуры с извлекаемыми ресурсами категории D0 нефти 49,6 млн.т и газа 2050,0 млн. м3.

«Зелёная сейсморазведка» компании «Газпром нефть»

Среди крупных Заказчиков сейсморазведочных работ в России наиболее масштабную программу перехода на экологосберегающие технологии осуществляет компания ПАО «Газпром нефть». В.В.Яковлев, ранее возглавлявший Блок разведки и добычи, а ныне заместитель Генерального директора по разведке и добыче ПАО «Газпром нефть», в пресс-релизе от 29 мая 2014 г. заявил [1]: «Применение нового метода позволит решить несколько очень важных для нас задач. Во-первых, повысится уровень промышленной безопасности благодаря снижению рисков травматизма, связанных с рубкой леса. Во-вторых, снизится антропогенное воздействие на окружающую среду. В-третьих, сократятся сроки полевых работ».

Впервые технология «Зеленая сейсмика» была опробована компанией «Газпром нефть» в 2014 г. в гористой местности в Иракском Курдистане, где применялась радиотелеметрическая регистрирующая система RT2. В том же году были проведены опытно-производственные работы в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) в условиях очень низких температур. Сравнение с сейсмическими данными, полученными традиционным способом на том же участке, подтвердило хорошее качество геофизической информации. Описываемая инновационная технология была успешно распространена на другие российские проекты, где была поставлена задача сузить просеки для линий приёма до 1 м. Отказ от применения флота тяжёлой техники на линиях приёма уменьшил нагрузку на почву, значительно сократил потребление горюче-смазочных материалов и снизил травматизм.

Прошлой зимой в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО) началось внедрение нового поколения технологии – «Зелёная сейсмика 2.0», предусматривающая применение малогабаритного бурового оборудования, компактных средств механизации, отказ от пикетажа и прокладку узких и криволинейных линий возбуждения, что позволяет дополнительно минимизировать воздействие на экосистему исследуемых территорий. На заводе «Курганавторемонт» разрабатываются компактные бурстанки, способные при глубине скважин 18 м бурить за смену 20–22 скважины.

Кроме того, были успешно протестированы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для считывания сейсмических данных из автономных бескабельных модулей и передача данных по спутниковому каналу [1, 2]. Использование ИК-

камеры на БПЛА для контроля работ и выявления рисков HSE подтвердило высокий потенциал. Заявлено, что компания «Газпром нефть» стремится достичь максимальный синергетический эффект: эффекты от двух и более технологических проектов обладают аддитивным свойством ($1 + 1 \geq 2$).

В полевом сезоне 2020–2021 гг. с помощью «Зеленой сейсмики» было изучено уже свыше 1200 кв.км перспективных на нефть и газ территорий. Газета «Комсомольская правда» от 29 января 2021 г. сообщила, что «Зелёная сейсмика» компании «Газпром нефть» признана одним из лучших экологических проектов в России в 2020 году. Технологии «Зелёная сейсмика» и «Зелёная сейсмика 2.0» одержали победу в номинации «Наука для экологии» национальной экологической премии В.И.Вернадского. Всего с момента запуска «Зелёная сейсмика» позволила сохранить более 4,5 млн. деревьев.

Миниатюризация сейсмических источников и регистрирующего оборудования

Есть явное противоречие между желанием уменьшить ширину просек или вообще исключить рубку леса и возможностью возбуждать широкополосный сигнал, начиная с самых низких частот. Многие заказчики ставят задачу возбуждения и регистрации сейсмических сигналов, которые содержат 5 или даже 6 октав. Известно, что от относительно неглубоких границ раздела можно получать частоты до 150 Гц. Таким образом, 5–6 октав в сейсмическом сигнале можно достичь тогда, когда начальная частота не превышает 5 Гц. Современные тяжёлые виброисточники способны работать даже с 2 или 3 Гц, хотя и не на полную мощность. Но компак-

тные и, соответственно, лёгкие виброисточники обычно плохо работают в низкочастотном диапазоне. Кроме того, они не всегда обеспечивают достаточную энергию. С одной стороны, это можно преодолеть путём сокращения интервала между ПВ и интервала между линиями возбуждения, то есть путём повышения плотности наблюдений. Но с другой стороны, в лесных регионах это сложно реализовать, поскольку нужно готовить больше просек для линий возбуждения, хотя и меньшей ширины.

Узкие просеки могут также вызывать вопросы с точки зрения техники безопасности. Естественно, проезд транспорта по узким и криволинейным просекам ограничен, что может обусловить большее время ожидания медицинской помощи и сложности с эвакуацией рабочих, если она понадобится.

Перед конструкторами сейсмического оборудования стоит задача создания широкополосных мощных источников, пригодных для узких просек или даже не требующих расчистки профилей. Определенные перспективы есть у буксируемых или самоходных электромагнитных импульсных источников (ЭМИИ), таких как onSEIS за рубежом, и отечественных «Енисей» (СЭМ-100) или «Геотон» (рис.6).

Для повышения глубинности исследований импульсные источники можно группировать и синхронизировать. Важно, что такие источники могут возбуждать сигнал с периодичностью 5 или 6 с, и применение нескольких одиночных источников или их групп по 2, 4 или 8 штук в одной сейсмопартии позволяет достичь очень высокую производительность при работах 3D.

Зимой 2020 года в канадских лесах были выполнены ОМР 2D с целью проверки возможностей самоходных портативных импульсных источников, таких



▲ Рис. 6. Сцепка буксируемых электромагнитных импульсных источников «Енисей СЭМ-100».

как onSEIS (рис.7), по картированию неглубоко и глубоко залегающих целевых объектов с достаточной разрешённостью [17]. Было показано, что для уверенного картирования неглубоко залегающих коллекторов и расчета их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) нужна плотная сеть линий приёма и возбуждения, с интервалами 25 x 25 м. Для глубоко залегающих объектов сеть линий приёма и возбуждения можно заглубить до интервалов 150 x 150 м.

Что касается регистрирующих систем, то появившиеся на рынке многочисленные нодальные автономные регистрирующие системы (рис.8) идеально подходят для целей уменьшения ширины расчищаемых линий приёма до 1,50 м. Ноды могут доставляться на профили с помощью вертолётов и дронов, а устанавливаться в пешем порядке или с

▼ Рис. 7. Портативный импульсный источник onSEIS на гусеничном шасси.





▲ Рис. 8. Контейнер со стеллажами для узлов бескабельной регистрирующей системы. Обычно считывание сейсмических данных и зарядка встроенных аккумуляторов происходит одновременно.

использованием малогабаритных грузовиков. Считывание сейсмической информации периодически выполняется либо непосредственно на линиях приёма, с помощью планшетных компьютеров и беспроводной связи, либо на стеллажах в специально оборудованных контейнерах на базе партии.

Заключение

Экологосберегающие полевые технологии СРР будут развиваться и совершенствоваться благодаря миниатюризации источников и приёмников сейсмических колебаний, их доставки с помощью вертолётов и контролю с помощью беспилотных летательных аппаратов (дронов) и появлению новых аппаратно-методических решений, позволяющих снизить негативное воздействие на природу [12]. Можно ожидать, что с каждым годом масштаб применения экологосберегающих технологий в ГРП будет только расти, поскольку требования к сохранению природы и среды обитания диких животных ужесточаются.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за важные дополнения и уточнения, внесённые следующими специалистами:

Воцалевский В.З., Руководитель Центра разведочной геофизики ООО «Газпромнефть ГЕО»,

Назыров Д.Д., Руководитель по разработке продуктов центра регионального и сейсмического моделирования ООО «Газпромнефть НТЦ».

Литература на русском языке:

1. «Газпром нефть» завершила сезон полевых геофизических исследований 2020-2021 гг. – ИА «Neftegaz.RU», 29 июня 2021 г.

2. Карпов И.А., Трансформация процессов геологоразведочных работ на базе цифровых и технологических решений. – Презентация ПАО «Газпром нефть» на ТНФ 23.09.2020.

3. Лаптев А.П. и др., Патент на изобретение №2369882 «Способ сейсмической разведки», 2009 г.

4. «Пермнефтегеофизика» осваивает труднодоступные районы Западного Урала. – журнал Oil&Gas Eurasia, №12/1 2007-2008 гг.

5. Рошмаков Ю.В., Столбова Т.А., Лаптев А.П. и др. (ОАО «Пермнефтегеофизика»), Технологии сейсморазведки при подготовке объектов в транзитных зонах (60-летию «Пермнефтегеофизики» посвящается). – «Технологии сейсморазведки», №2, 2010.

6. Столбова Т.А., Ланцев В.Ф., Рошмаков Ю.В. (ОАО «Пермнефтегеофизика»), Экологосберегающая технология сейсморазведки в труднодоступных районах. – «Технологии сейсморазведки», №4, 2009.

Литература на английском языке:

7. A new solution for low-impact seismic line clearing. – The Australian pipeliner, 4 August 2013.

8. Aouad A., Taylor R., Millar N. & Dorling D. (2015) Valuable lessons from acquiring

3D Seismic for Coal Seam Gas, ASEG Extended Abstracts, 2015:1, 1-4, DOI: 10.1071/ASEG2015ab073

9. Conducting Seismic Exploration: Environmental Challenges and Government Requirements, by the Energy Group. – Lawson Lundell LLP, March 23, 2002.

10. Criss J., Small footprint key element in frontier exploration. – E&P Magazine, June 2016.

11. Criss J., Technology Collaboration is the Key Element in Frontier Seismic Exploration. – Inova Geophysical, Vol.41, No.07, Sep 2016.

12. Crook A., Bossaer S., Boutin M. et al., Case study: The use of miniaturized seismic sources for reduced environmental impact. – EAGE annual 82th conference & exhibition, Amsterdam, 2021.

13. GEOPHYSICAL EXPLORATION PRACTICES (by CAPP and CAGC), 2010

14. Hammond James, Pinzon Jaime, Pinno Brad et al., Edge Influence of Low-impact Seismic Lines for Oil Exploration on Upland Forest Vegetation in Northern Alberta (Canada). – Natural Resources Canada, 2017.

15. Onshore seismic surveys in Greenland. - Technical Report from Danish Centre for Environment and Energy. Aarhus University and Greenland Institute of Natural Resources, No.161, 2020.

16. Strack M., Hayne Sh., Lovitt J. et al., Petroleum exploration increases methane emissions from northern peatlands. – Nature communications (Canada), 2019, 10:2804.

17. Watt H.J., Archer J., Rodriguez L., A new approach to broadband low impact seismic data acquisition in the Boreal forest. – Geoconvention 2021 (virtual event), Sept.13-15.

Подробнее об авторах



Череповский
Анатолий Викторович

Советник Первого
заместителя
Ген. директора
АО «Росгеология»,
Кандидат тех. наук



Лаптев
Александр Павлович

Управляющий директор
ПАО «Пермнефтегеофизика»,
АО «Росгеология».
Кандидат геол.-мин. наук,
доцент кафедры
геофизики ПГНИУ.
Почетный нефтяник.



Пятунина
Екатерина Владимировна

Главный геолог
ПАО «Пермнефтегеофизика»,
АО «Росгеология».
Кандидат геол.-мин. наук.



Мамедов
Октай Гюлагаевич

Главный геофизик по
разведочной геофизике
ПАО «Пермнефтегеофизика»,
АО «Росгеология».

О развитии «зеленых» технологий в ООО «ТСГК»

■ Камалтдинов Р. Р., Шевченко И. И., ООО «ТСГК», г. Тюмень

В развитие темы повышения эффективности работ в текущих условиях рынка, мы решили рассказать о том, как и за счет чего это происходит в компании «Тюменская Сервисная Геофизическая Компания», входящей в группу «Геосервис360°».

Вот уже несколько лет тенденции рынка нефтесервиса направлены в сторону экологичности и безопасности работ. Такой рискоориентированный подход позволяет учесть максимальное количество и качество рисков проекта, как финансовых и операционных, так и рисков причинения вреда человеку и экологии. Ну и, конечно же, диктует необходимость разработки и выполнения мероприятий, исключающих вероятность возникновения возможных опасностей на превентивной основе. Как же объединить в одну неразрывную систему весь комплекс мер защиты от вероятных нежелательных событий?

«Зеленые» технологии в сейсморазведке.

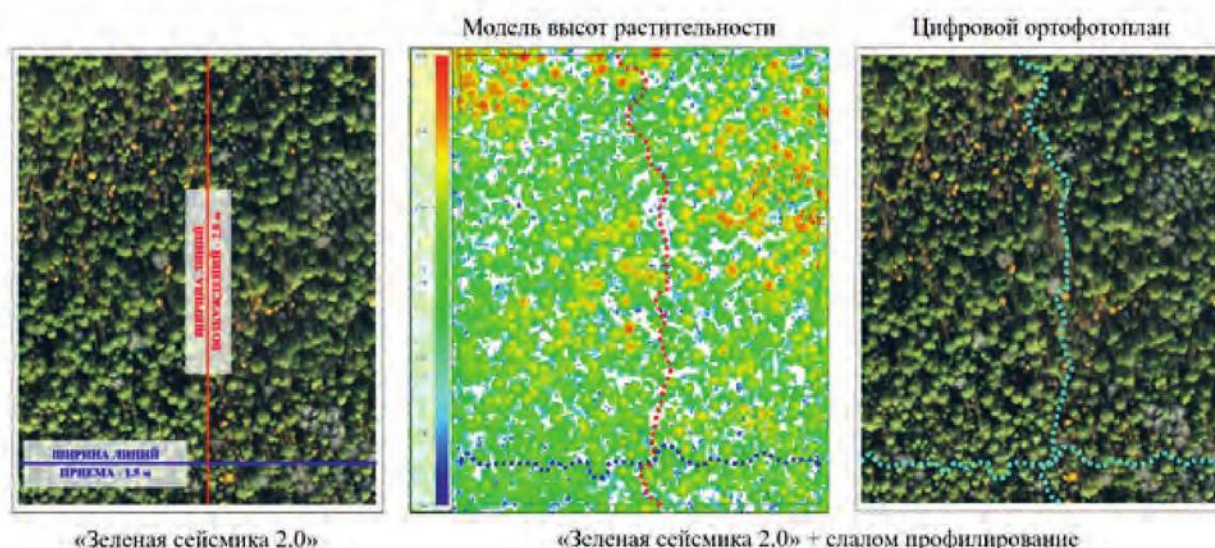
Одно из решений – это развитие зелёных технологий в сейсморазведке построенные на принципе комплексного подхода ко всем производственным элементам. При дистанционных методах исследований, набор данных из разных источников позволяет расширить спектр информации об исследуемых объектах. Ровно так и на сейсмических работах, для развития технологии «зеленая сейсмика» необходимо объединять все накопленные результаты исследований и испытаний нового оборудования и техники. Техническая трансформация в сейсморазведке назрела уже давно. И за ней неотъемлемо следует трансформация технологий и методики выполнения

сейсморазведочных работ. Для реализации новаций, необходимо объединить опыт нестандартных проектов, создав одну экосистему – «цифровая зеленая сейсмика».

Составляющие элементы «зеленого» подхода к планированию сейсморазведочных работ: сокращение веса сейсморазведочной партии, сокращение численности персонала, повышение уровня безопасности, минимизация ущерба окружающей среде, оптимизация затрат на производство, и, конечно, интенсивное развитие цифровизации операционных процессов.

В этом направлении уже несколько лет компания «ТСГК» активно сотрудничает с компанией «Газпром нефть» в рамках развития технологий под брендом «Зеленая сейсмика». «Зеленая сейсмика»® — это словесный товарный знак официально зарегистрирован в РФ и принадлежит ПАО «Газпром нефть». Делимся опытом, новыми наработками и инновационными идеями в области повышения эффективности и безопасности полевых работ. В рамках сложившегося партнерства, на полевой сезон 22/23 запланированы производственные работы по технологии «Зеленая сейсмика 2.0» с полноценным применением слалом профилирования и легкой вездеходной техники.

Два главных слагаемых принципа «Зеленая сейсмика»® — это сокращение объема вырубаемой древесины и снижение веса сеймопартии. И если для выполнения второго условия необходимы только лишь поиск и опробование различных устройств, предлагаемых на рынке, то в случае проведения лесорубочных работ необходим ряд дополнительных мероприятий, предшествующих непосредственной рубке профилей. Тут



▲ Рис. 1. Пример прокладки слалом профилей пунктов возбуждения.

вступает в роль первый элемент комплексирования – построение детальной цифровой модели площади работ. Первые шаги по переходу на зеленый режим работы топоотряда сокращали ширину профилей и минимизировали объем вырубаемой древесины, но не исключали его полностью. В новой модели рубка, в классическом исполнении практически полностью отсутствует, за исключением опасно наклоненных или сухостойных деревьев и мелкого подроста, мешающих проложить безопасный маршрут для легких снегоходов. Это невозможно было запланировать на этапе проектирования при классическом подходе к полевым работам. Исключить рубку позволяют интерпретированные данные цифровой модели рельефа в комплексе с ортофотопланом высокого разрешения.

Сначала проводится воздушное лазерное сканирование и аэрофотосъемка. Далее по результатам комплексной интерпретации полученных материалов строятся атрибутивные карты и объемные модели местности, включающие информацию о рельефе, категорийности леса, высоте крон лесного массива, проходимости леса для прокладки визирных профилей (Рис. 1.).

Применение такой технологии планирования проектной сети профилей позволяет применить слалом-профилирование для всех видов работ, где это необходимо. Обойти каждое дерево, каждый опасный овраг, построить переправы через водные объекты в наиболее подходящих местах на местности, учесть даже кусты, где это возможно и проложить маршруты для движения вездеходов с учетом допустимых безопасных углов подъема и спуска на всех участках площади. А также исключить рубку практически на 70-80%, тем самым, колоссально снижая урон окружающей среде. При этом, существенно снижаются и затраты на аренду участка и плату за древесину. Действительно ситуация, при которой, как говорится в выигрыше, остаются все заинтересованные лица.

Легче, еще легче.

Что же касается перехода на более легкую технику, на сегодня самым сложным аспектом в этой трансформации является сохранение существующих требований к качеству полевого материала. В условиях работы в Западной Сибири, все больше направленной на поиск и разведывание тонкослойных продук-

тивных пластов, материал должен обладать максимальной разрешенностью, как в структурном, так и в динамическом плане. А значит, при внедрении более легкого оборудования и изменения технологии работ, параметры погружения заряда и оценки качества полевого материала остаются неизменными. И это действительно проблема, которая до конца еще не решена.

Уже несколько лет, не только компания «ТСГК», так и другие геофизические компании, ведет поиск и испытания новых решений для буровзрывных работ. Малогабаритные установки разных типов испытываются в производственном режиме. И вроде задача не так сложна – бурение и зарядка на 18-24 метра, что, конечно, уже не ново для буровзрывных работ с использованием тяжелых буровых установок типа УБГМ. Но легкие буровые станки, хотя и достигая заявленных глубин, имеют производительность в 5 раз ниже тяжелых. Более того сама зарядка определяется внутренним диаметром шнековой колонны. У легких станков зазор между шнеком и диаметром заряда очень мал, и безопасное погружение заряда возможно максимум на 9-10 метров (как правило, 6-8 метров).

Для решения этой проблемы мы видим два решения: разработка новой буровой установки с заданными техническими характеристиками для достижения требуемой производительности на станок. И второй, более экстенсивный путь, - изменение методики работ с уменьшением глубины скважин и сгущением шага пунктов взрыва.

На сегодня мы работаем по обоим направлениям, и можно сказать близки к решению вопроса. Совместно с конструкторами ОАО «Курганавторемонт» разрабатывается и испытывается вот уже



▲ Рис. 2. Малогабаритная буровая установка УБГМ-1М на базе ШС 0.6.

второй полевой сезон, малогабаритные буровые установки двух типов на шасси ШС 0.4. и ШС 0.6. (Рис. 2.). Ширина вездеходной базы установки 1,8-2 м в зависимости от гусеничной ленты. Станки развивают 70% производительности в сопоставлении с тяжелыми буровыми установками и это при уменьшении веса буровой установки в 5-6 раз. В настоящий момент по результатам проведения второго этапа испытаний в полевых условиях, установки проходят финальный этап доработки на заводе изготовителе. Всего на будущий сезон готовится четыре станка для проведения работ во всем лесном массиве площади по технологии «Зеленая сейсмика 2.0» совместно с компанией ООО «Газпромнефть Гео».

Вопрос с зарядкой скважин очень актуален, как со стороны трудозатрат, так и со стороны качества возбуждения упругих колебаний. На будущий сезон запланированы испытания нового материала сопоставимой мощности, но имеющего меньшие габаритные размеры. Диаметр заряда уменьшается на 40% относительно стандартного, что позволит существенно облегчить процесс зарядки скважин и увеличить глубину погружения.

Ну и конечно, с чего началось уменьшение ширины профилей - с работ по регистрации данных. Визирные профили применялись давно при работе в исклю-

живных зонах, будь то редкие породы древесины, охранные зоны или участки с развитой инфраструктурой. С приходом бескабельных систем регистрации ситуация заметно улучшилась. Действительно, в первую очередь необходимость в раскладке кабелей, габариты и вес перевозимого оборудования при работе с кабельными системами требуют тяжелых МТЛБ, способных перевозить достаточный для работы объем каналов. И это определяло необходимость рубки четырехметровых профилей.

Внедрение бескабельных систем позволило существенно сократить вес напольного оборудования, повысить производительность на одного работника, использовать легкие и узкие транспортные средства. Сами приемные линии не мешают проезду любой техники, как при пересечении профилей, так и при передвижении вдоль оси профиля. Отсутствуют простои и браки по причине порыва линий во время наладки расстановки или регистрации данных. Все эти моменты складываются в трансформацию сейсморобот, поднимая их на более легкий, более экологичный уровень. Переход на такую технологию оказался для компании «ТСГК» достаточно прост, так как в своей работе в «калссическом», кабельном варианте, использование снегоходов происходит повсеместно.

В прошлом полевом сезоне на одном из проектов была успешно испытана технология расстановки бескабельного геофизического оборудования на снегоходах с нарт по визирным профилям. С целью повышения эффективности и улучшения эргономики рабочего места сейсмороботного, сзади саней предусмотрено пассажирское место для перемещения стоя. Конструкция нарт испытана в работе, рекомендации направлены на завод. Использование бескабельного

оборудования и такая технология размотки дает прирост производительности на одного рабочего в 1,5 раза. При выполнении работ сейсmobригада состояла всего из двух человек: водитель снегохода и рабочий на геофизических работах. В отличие от стандартного подхода, где бригады состоят из 5-6 человек - водитель вездехода, бригадир – размотчик кабеля, и трое-четверо рабочих для расстановки сейсмодатчиков.

На работах с бескабельной системой использовались одиночные геофоны. Установка проводилась с применением погрузателя заводского изготовления, собственной разработки (Рис. 3.). Сейсмopриемники устанавливаются прямо в грунт и необходимость проводить проминку или утапывать снег для установки в плотно утрамбованный снег отсутствует, что сокращает объемы проминки профилей и облегчает работу сейсмороботом, тем самым повышая их эффективность. Подобная установка не просто облегчает работу сейсмотряда, но и серьезно увеличивает шумозащищенность примененного пикета, а весной, защищает от вытаивания приемников.

Уберизация – цифровая консолидация всех производственных процессов.

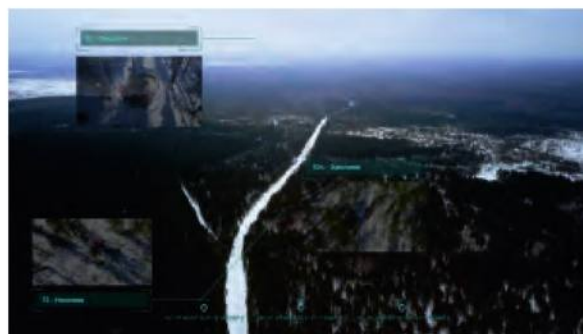
Конечно, такая трансформация по всем видам работ начиная с подготовки

▼ Рис. 3. Работа с погрузателем сейсмopриемников.



профилей, непременно связана с изменением технологии и методики выполнения полевых работ в целом и пересмотра подхода к планированию и организации безопасных работ. Переход на зеленую сейсмику влечет за собой не только переход на легкую технику, сокращение численности персонала в бригадах, но и увеличение количества бригад в силу необходимой и максимально достижимой производительности по всем видам работ. Переход на легкую технику избавляет от тяжелых вездеходов, влечет за собой увеличение количества единиц в целом по подразделению, более напряженное движение техники на площади работ с работой в непосредственной близости от персонала. В этом случае системная внутреобъектовая логистика просто необходима. И здесь следующий этап комплексирования – уберизация сейсморазведочных работ.

Уберизация, что же это такое? В контексте нашей работы – это цифровизация и объединение в одну экосистему всех процессов, взаимодействующих между собой в течение длительности всего проекта. Происходит замена «посредников» в организационном процессе, в частности в данном случае это работа с картой, расчет расстояний, радиопереговоры и т. д. на работу с цифровыми платформами. Использование кроссплатформенного ПО на базе сейсморпартии и планшетов бригадирами работ в поле, позволяет трансформировать и ряд классических организационных задач в цифровую плоскость, как например: выдача и корректировка полевого задания, обратная связь от работника при выполнении работ, мониторинг выполнения работ в течение рабочей смены, контроль длительности рабочей смены, мониторинг состояния работника – наблюдение за работниками группы



▲ Рис. 4. Мониторинг работы бригад на всех видах работ.

риска по медицинским показателям, трекинг движения техники и персонала, исключение входа в эксклюзивные зоны ограничений (Рис. 4.).

При использовании только одной системы «цифровой диспетчер» для позиционирования всей техники на площади работ по цифровому радиоканалу, время реагирования на любые ситуации оптимизируется максимально на сколько это возможно. Использование уберизации позволяет поднять эффективность и безопасность всех полевых процессов на максимальный уровень.

В этом направлении мы движемся неуклонно вперед реализуя стратегию нашей компании по непрерывному совершенствованию всех производственных процессов. На сегодня мы уже испытали ряд устройств, позволяющих мониторить активность и состояние работников. Проведено испытание работы цифровой радиосистемы «умных» планшетов. Накоплен уже трехлетний опыт работы с цифровой радиосвязью для мониторинга всей техники, задействованной при выполнении работ. Эти системы имеют свои преимущества равно, как и недостатки.

Конечно, исследование новых подходов, применение нестандартного оборудования, внесение изменений в устоявшиеся обычаи технологии работ связано с трудностями. Процесс разработками,

доработками и внедрениями новых решений не прекращается.

Одна из серьезных проблем для организации уберизации цифровой сейсмоки в полном объеме — это отсутствие постоянной устойчивой связи. Ведь, как говорилось ранее, один из основных постулатов идеи уберизации это обратная связь с работниками в реальном времени, исключающая длительные диалоговые переговоры по радиоканалу. Анализируя полученный опыт, нами принято решение о разработке своей собственной системы мониторинга работников в реальном времени. Простой и в то же время максимально адаптированной к работе в сейсморазведке, с возможностью подключения любых сторонних устройств для расширения функционала системы.

Сейчас перед нами стоит очередной вызов — покрытие связью площади работ. Это будет очередной шаг на пути к цели повышения эффективности — контроль и управление изменениями в реальном времени для безопасного и качественно-го выполнения работ в полном объеме на любом проекте.

Отслеживать динамику реализации программы технологического развития нашей компании вы можете на просторах интернета, тем более скоро выходит очередная серия, рассказывающая о новых наработках ООО «ТСГК» (<https://tumsgk.ru/>) и партнеров группы «Геосервис 360°».

Подробнее об авторах



Камалтдинов
Рустам Робертович

Генеральный директор,
Тюменская Сервисная
Геофизическая Компания.



Шевченко
Илья Игоревич

Первый заместитель
генерального директора,
главный инженер,
Тюменская Сервисная
Геофизическая Компания.

Опыт применения малогабаритного источника и бескабельной системы регистрации для изучения ВЧР и неглубоко залегающих объектов

- Турчков А.М., Ошкин А.Н., ООО «Неоген», МГУ им. Ломоносова, г. Москва
- Коротков И.П., МГУ им. Ломоносова, г. Москва
- Воронцов В.В., ООО «Геоспейс Технолоджис Евразия», г. Уфа
- Череповский А.В., АО «Росгеология», г. Москва

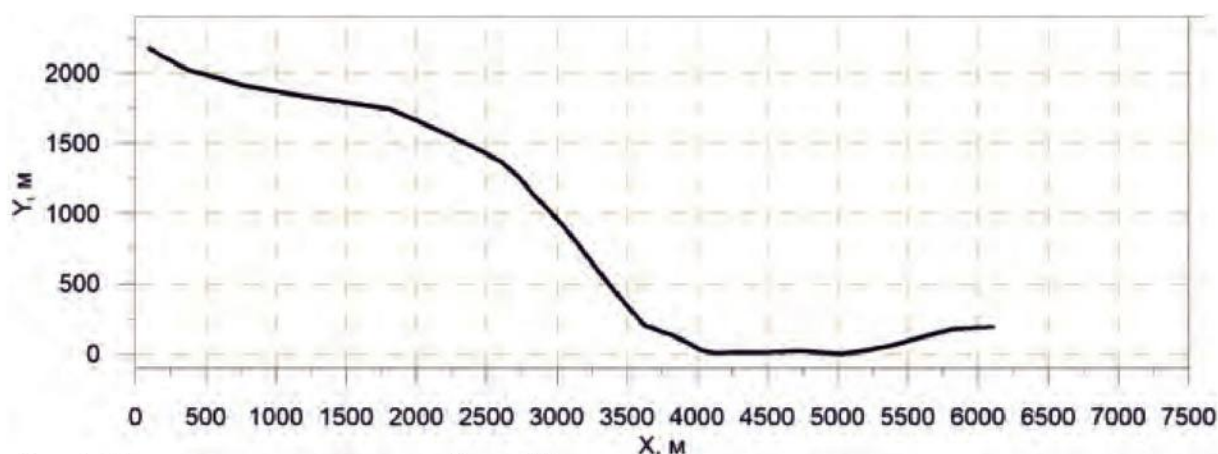
Введение

Подавляющий объем сейсморазведочных работ (СРР) традиционно выполняется с целью поисков и разведки месторождений нефти и газа, и необходимая глубина исследований при этом обычно лежит в интервале от 1 до 3–4 км и более. В то же время в последние годы увеличиваются объёмы и роль как инженерной сейсмики (глубины исследований до 100 м), так и малоглубинной сейсмики (глубины исследований до 1 км). Раньше малоглубинную сейсмику связывали, прежде всего, с угольными месторождениями, но теперь её роль растёт благодаря резкому повышению спроса на цветные и щелочные металлы (необходимые для производства аккумуляторов и солнечных панелей) и другие твёрдые полезные ископаемые (ТПИ). Также новым важным направлением для малоглубинной сейсморазведки может стать поиск подземных резервуаров для закачки углекислого газа (CO₂) и последующего мониторинга результатов его закачки. Это часть обширной программы по декарбонизации нефтегазовой отрасли и снижению её влияния на окружающую среду.

Различная глубинность перечисленных видов сейсмических исследований, естественно, предопределяет выбор наиболее эффективных аппаратно-методических решений, касающихся не столько регистрирующего оборудования, сколько источников сейсмических сигналов. Наибольшие объёмы СРР на нефть и

газ выполняются с вибрационными и взрывными источниками, и в меньшей степени – с электромагнитными импульсными источниками (ЭМИИ) типа «Енисей» или «Геотон» [1]. Для инженерной сейсморазведки в подавляющем большинстве случаев используются источники ударного типа. Самым популярным источником данного типа является строительная кувалда, которая относится к маломощным источникам, но этого обычно достаточно, чтобы закрыть потребности инженерной сейсморазведки.

Наиболее сложным является выбор источника колебаний для малоглубинной сейсморазведки. Конечно, здесь могут применяться обычные тяжёлые источники, применяемые при нефтегазовых СРР – это виброустановки, бурстанки и ЭМИИ, в лесных регионах требующие прокладки просек шириной до 4–5 м, что всё чаще становится неприемлемым из-за ужесточающихся экологических требований. Применение лёгких одиночных виброисточников и узких бурстанков позволяет частично решить эту проблему и уменьшить ширину просек для линий возбуждения до 2,5–3,0 м. Но в случае полного запрета на рубку леса и на повреждение почвенного слоя сейсморазведчикам приходится планировать криволинейные линии возбуждения в обход крупных деревьев и использовать компактные источники колебаний, которые буксируются не тракторами и бульдозерами, а внедорожными автомо-



▲ Рис. 1. Плановое положение профиля 2Д.

биями летом или снегоходами зимой, или даже могут переноситься вручную в условиях сложной орографической в районе работ [3].

Как наиболее подходящие для малоглубинных и экологосберегающих СРР могут рассматриваться ударные источники типа «падающий груз». Разумеется, ударные источники такого типа имеют гораздо более низкую мощность, чем ЭМИИ, но этот недостаток можно компенсировать сокращённым шагом наблюдений по линиям возбуждения (5 или 10 м), что обеспечит высокую кратность наблюдений МОГТ и, соответственно, высокое качество результирующих сейсмических материалов на достаточно больших глубинах [4].

В настоящей работе приведены результаты малоглубинных сейсморазведочных работ 2Д, выполненных в районе полигона отделения геофизики геологического факультета МГУ в д.Александровка (Юхновский район Калужской области). Целью данной работы являлось опробование бескабельной системы «GSX» (производство компании «Geospace Technologies») [5] и малогабаритного источника типа «падающий груз» ESS-200. Работы проводились методом отражённых продольных волн. Дополнительно на профиле был отработан участок на обменных волнах типа Р-S.

Методика производства работ

Криволинейный сейсморазведочный профиль 2Д располагался вдоль лесной дороги возле базы отделения геофизики геологического факультета МГУ на территории национального парка Угра (Юхновский район, Калужская область). Плановое положение профиля приведено на рисунке 1.

Параметры методики работ по двум схемам наблюдений (Z-Z, Z-X) приведены в таблице 1.

В качестве источника возбуждения продольных волн использовался сейсмический источник ESS 200 (Electric Seismic Source 200 lb, рис.2), представляющий собой источник типа падающий груз, смонтированный на автомобильном

▼ Табл. 1. Параметры методики работ.

Схема наблюдений	Z-Z	Z-X
Размерность наблюдений	2D	
Шаг ППВ, м	10	
Шаг ППП, м	10	
Количество ППП в активной расстановке	160	
Всего активных расстановок	9	1
Длина активной расстановки, м	1590	
Максимальное удаление, м	1585	
Перекрытие, м	790	0
Количество накоплений на одном ППВ	10	
Максимальная кратность	187	
Размер бина, м	5	
Общая длина профиля, м	7190	1590
Общее кол-во ППВ	720	160



▲ Рис. 2. Сейсмический источник ударного типа ESS 200.

прицепе. Ударной частью источника является колонна весом 90 кг (200 фунтов). В момент дистанционной инициализации возбуждения колонна поднимается на высоту $\approx 0,5$ м и под тяжестью собственного веса ударяется о металлическую плиту, прижатую к поверхности земли. Для увеличения ускорения падения и для ослабления подскока колонны в источнике используется толстый резиновый жгут. Работает источник от аккумулятора 12 В. Электронная часть прибора содержит триггер для точной отметки момента возбуждения.

Приём колебаний осуществлялся с помощью электродинамических сейсмоприемников GS-One с горизонтальной (X-компонента) и вертикальной (Z-компонента) осями максимальной чувствительности. Собственная частота сейсмоприемников – 10 Гц.

Регистрация колебаний производилась с помощью бескабельной системы «GSX» (производство компании «Geospace Technologies»). Комплект бескабельной системы состоит из произвольного числа полевых блоков регистрации, внешних аккумуляторных батарей для блоков регистрации и полевого терминала «LineViewer LV» [5]. Регистратор «GSX» оснащён GPS-приёмником для позиционирования каждого автономного модуля и точного отсчёта времени.

Каждый полевой регистратор обеспечивает получение данных с сопряженного одиночного геофона GS-One. Полевой терминал предназначен для сбора служебных данных о работе регистраторов с целью обеспечения их штатной работы.

Следует отметить, что использование бескабельных систем регистрации является оптимальным при изучении малых глубин (до 1 км). При такой глубинности исследований требуются приёмные линии длиной более 1 км. Портативные линейные и телеметрические станции («Эллисс», «Лакколит», «SGD» и т.д.), повсеместно используемые в сейсморазведке для целей инженерных изысканий, рассчитаны на работу с приёмными линиями до 200 м. Использование таких станций с длинами приёмных линий более 500 м требует дополнительной модернизации. В то же время, использование кабельных систем, применяемых для глубинной сейсморазведки (Sercel), представляется слишком громоздким: шаг пунктов приёма по кабелю бывает редко меньше 25 метров (обычно 50), блок центральной электроники занимает относительно много места (требуется организация стационарного рабочего места для оператора).

Применение бескабельной системы позволило сократить до минимума число полевых рабочих. Для перематки, установки и наладки активной расстановки бескабельной системы использовалась одна бригада из 5 человек. В качестве транспортного средства использовался автомобиль-пикап, в кузов которого помещалась вся приемная расстановка. Рабочий момент производства работ с бескабельной системой приведён на рис.3.



◀ Рис. 3.
Бескабельная
приёмная
расстановка
в кузове пикапа.

Обработка данных монотипных волн

Задачами обработки являлись получение временных и глубинных сейсмических разрезов с шагом суммарных трасс 5 м по горизонтали, пригодных для детальной геологической интерпретации до глубин около 1 км. Часть профиля была получена с двухкомпонентной регистрацией, поэтому предполагалось также оценить возможность использования горизонтальной компоненты (X) волнового поля для построения разреза обменных волн типа P-S, что позволило бы произвести расчет соотношений скоростей V_p/V_s для одноименных отражающих горизонтов, выделяемых как на разрезах продольных волн, так и на разрезах обменных волн.

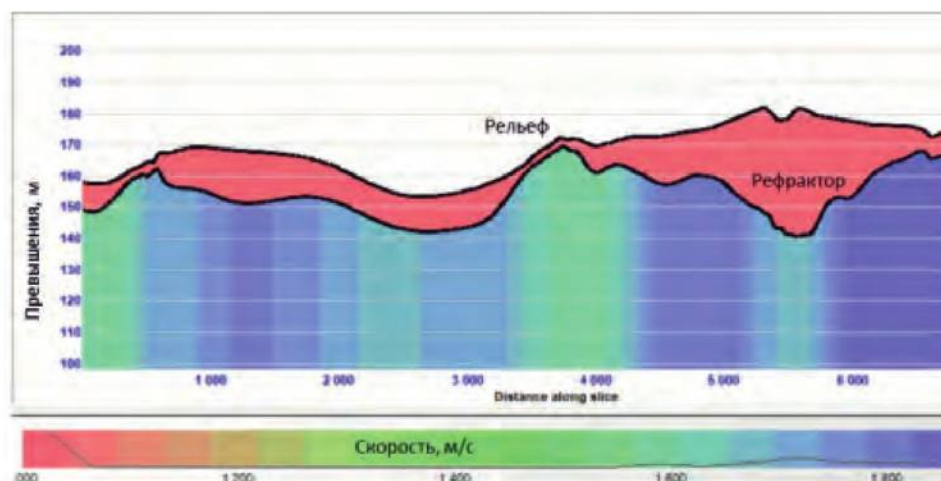
Основными проблемами, которые приходилось решать на этапе обработки, являлись учет неоднородной верхней части разреза (ВЧР), выделение сигнала на фоне помех при низком соотношении сигнал/шум, а также обработка горизонтальной компоненты при ограниченных системой наблюдений удалениях взрыв – прибор (в среднем не более 700 м).

Последовательность обработки продольных волн включала в себя расчет

модели ВЧР по первым вступлениям, статпоправки по преломленным волнам, деконволюцию, интерактивные итерации статических и кинематических поправок, шумоподавление, суммирование по ОГТ, а также улучшение разреза после суммирования. Глубинный разрез был получен пересчетом временного разреза по скоростям суммирования.

Обработка обменных волн состояла из ориентации горизонтальной компоненты (X) на источник, применение масштабированных статических поправок, определенных по продольным волнам, асимптотического бинирования, шумоподавления, нескольких итераций остаточных статических и кинематических поправок и суммирования с последующим улучшением полученного разреза обменных волн. Фрагменты разрезов продольных и обменных волн визуально сопоставлялись для идентификации одноименных интервалов и оценки интервальных значений V_p/V_s . Среднее значение $V_p/V_s = 2,8$, и после предварительной оценки оно использовалось в обработке обменных волн для масштабирования статпоправок за пункты приема и для асимптотического бинирования.

► Рис. 4.
Модель
скоростей ВЧР,
рассчитанная
по первым
вступлениям
Р-волн.



По результатам инверсии первых вступлений Р-волн была получена однослойная модель ВЧР, показанная на рис.4.

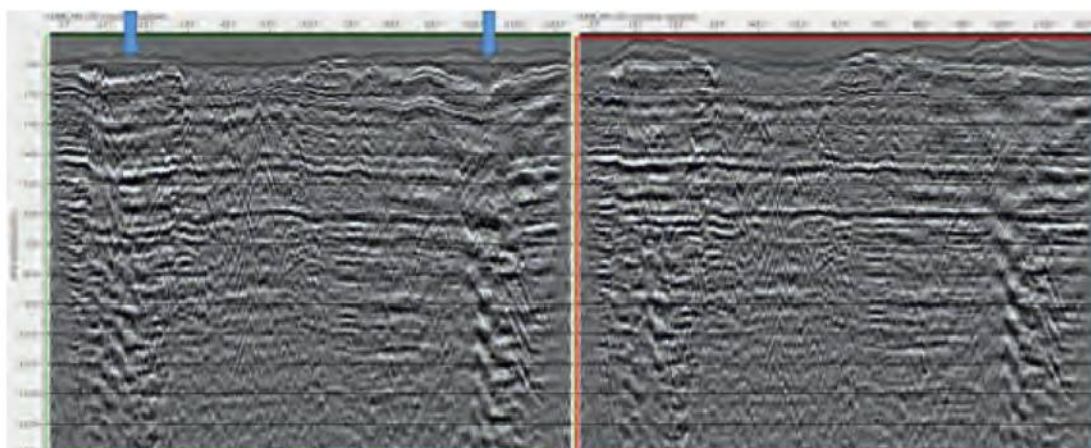
Модель использовалась для расчета статических поправок, приводящих наблюдаемые данные к уровню 200 м над уровнем моря со скоростью замещения 1500 м/с. Для наиболее полного учета низкоскоростных неоднородностей при расчете поправок задавался промежуточный уровень расчета 140 м, который располагался ниже самой глубокой точки рефрактора из модели (рис.4). На рис.5 показаны разрезы после применения статики за рельеф (слева) с постоянной скоростью замещения 1500 м/с и результат применения рефракторной статики (справа). На данном этапе

были учтены две крупные статические аномалии в левой и правой части профиля, помеченные стрелками на рис.5 (слева).

На рис.6. показана интерактивная панель скоростного анализа, на которой видно характерное распределение скоростей суммирования по вертикали (сембланс, справа).

На рис.7 показаны сейсмограммы ОГТ на разных этапах обработки (слева) и их амплитудно-частотные спектры (справа). После двух итераций уточнения скоростей суммирования с последующей автоматической коррекцией остаточной статики и деконволюции получен разрез после кинематической обработки (рис.8, слева). Последующее шумоподавление проводилось в области «ОГТ – общее

▼ Рис. 5. Временные разрезы после статики за рельеф (слева) и рефракторной статики (справа).



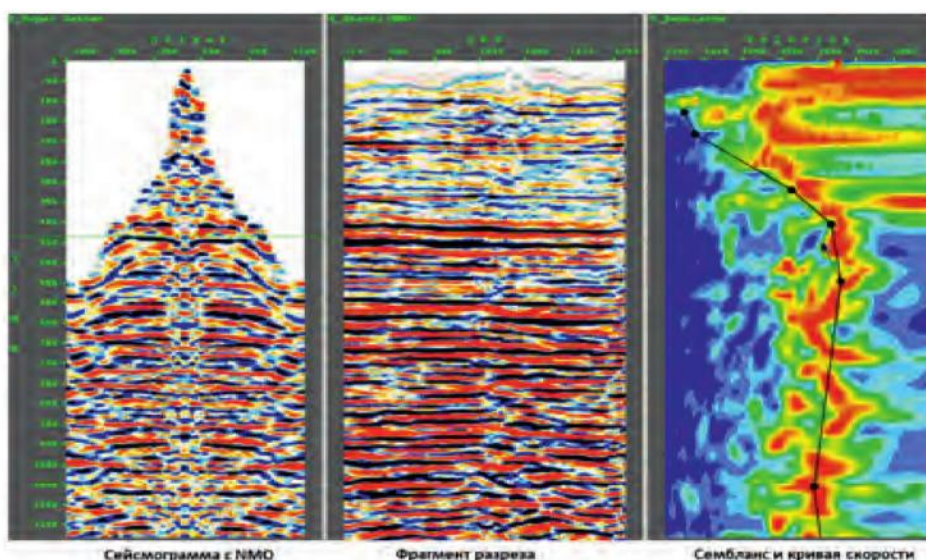


Рис. 6.
Интерактивная
панель анализа
скоростей
суммирования.

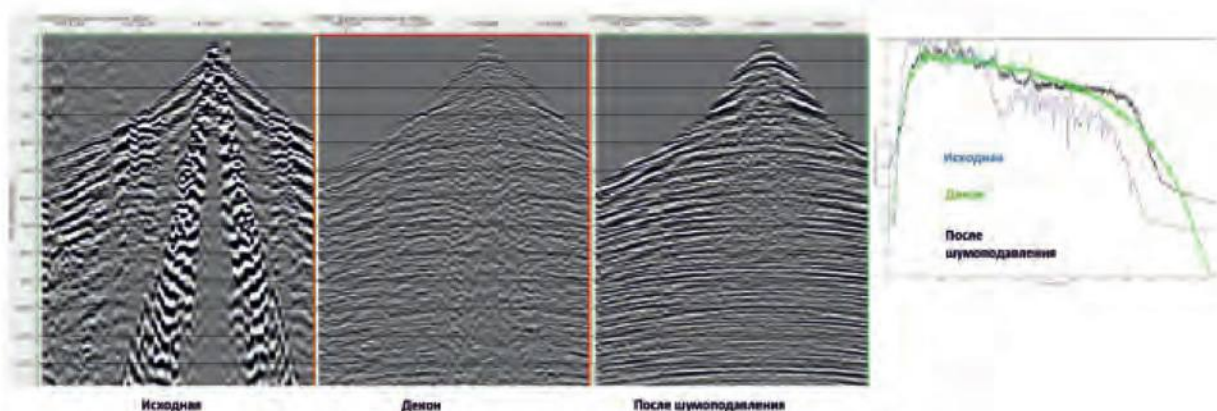


Рис. 7. Сейсмограммы ОГТ на разных этапах обработки (слева) и их амплитудно-частотные спектры (справа).

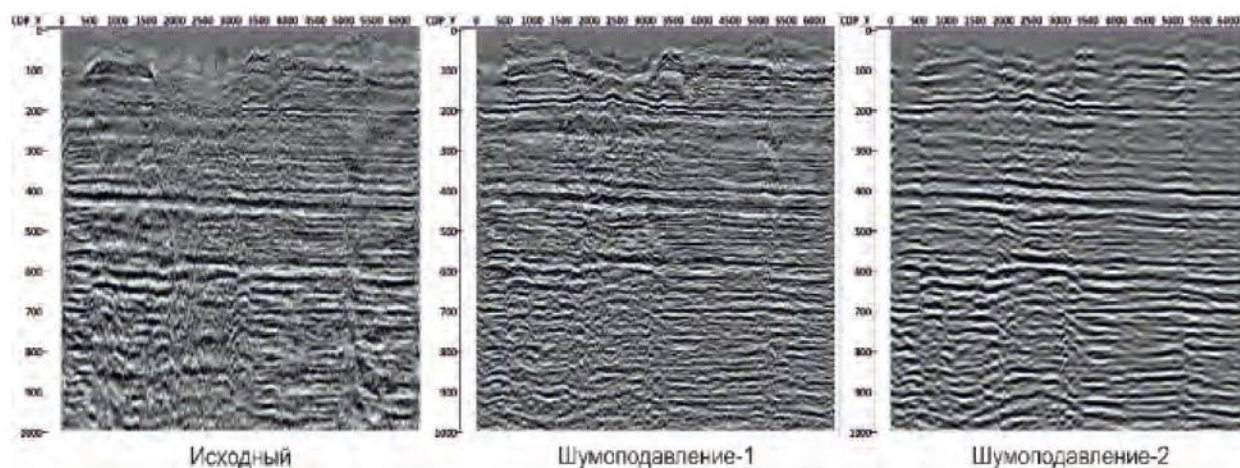
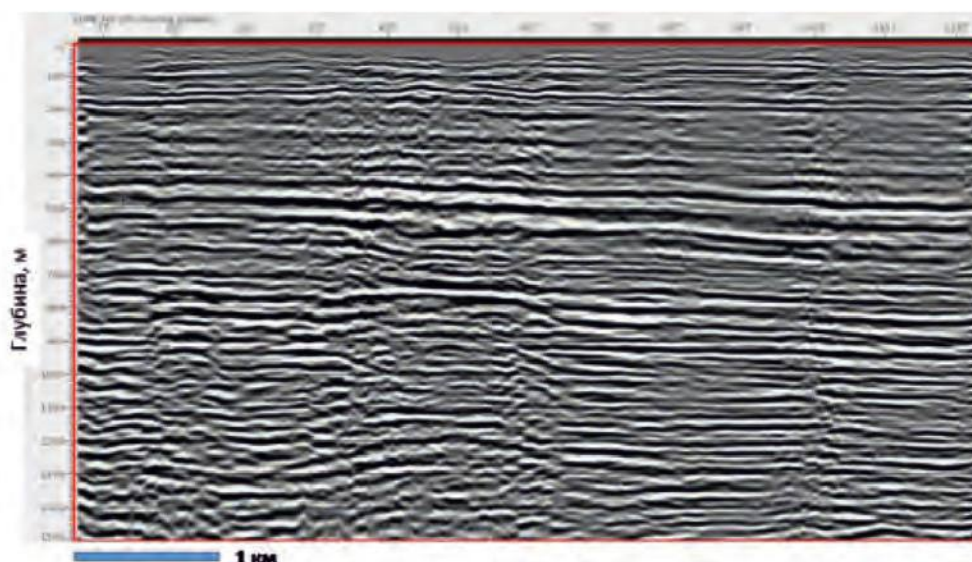


Рис. 8. Временные разрезы после кинематической обработки (слева) и шумоподавления в двух вариантах (по центру, справа)

удаление» для одновременного подавления случайных и когерентных помех и увеличения соотношения сигнал/шум.

Временной разрез после шумоподавления (рис.8, справа) был пересчитан в глубину с использованием сглаженных

► Рис. 9.
Глубинный
сейсмический
разрез
Р-волн.



скоростей суммирования. Глубинный сейсмический разрез представлен на рис.9.

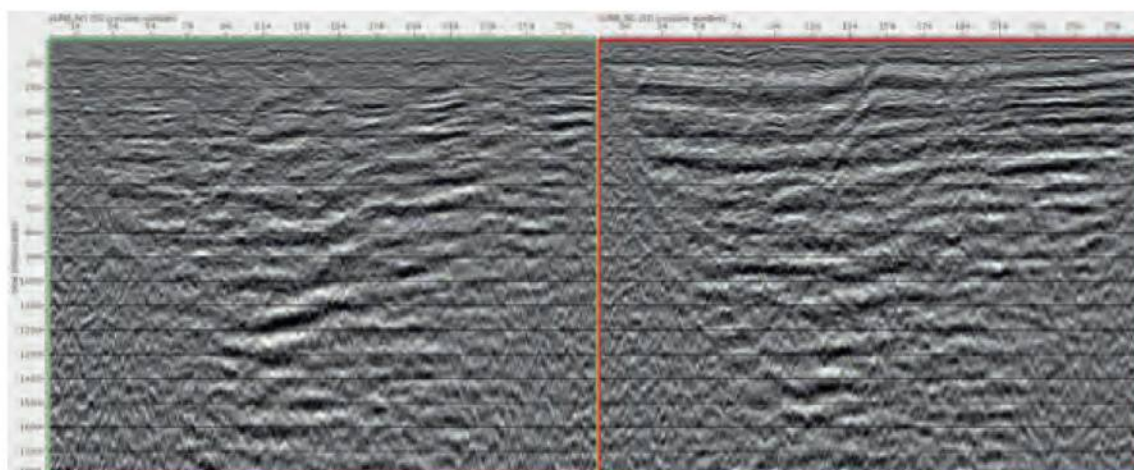
Обработка данных обменных волн

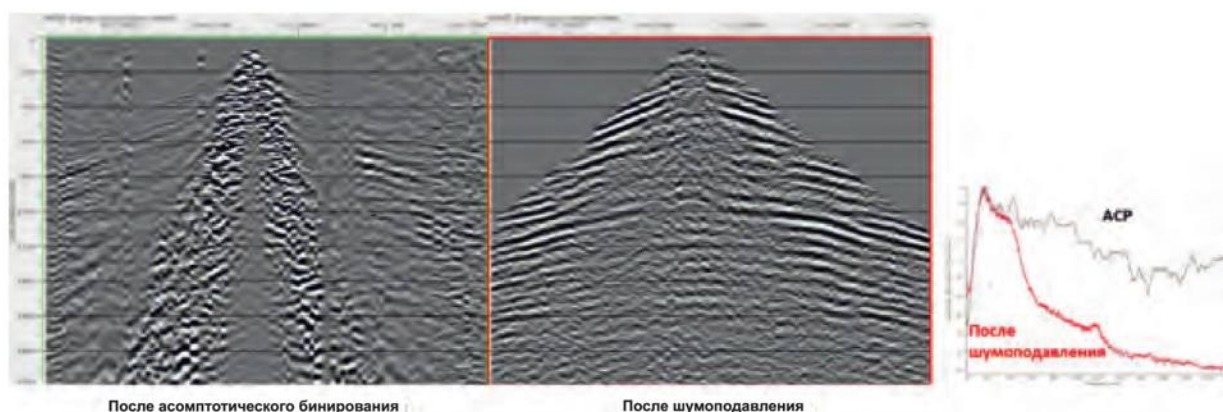
Данные по обменным волнам были получены на участке длиной около 1/3 профиля Р-волн. Первичная стандартная процедура обработки обменных волн состоит в ориентации горизонтальной компоненты приема на источник возбуждения [2]. Результат реориентации Х-компоненты показан на рис.10.

Дальнейшая обработка обменных волн должна содержать учет несимметричности направлений падающей продольной волны и отраженной поперечной волны.

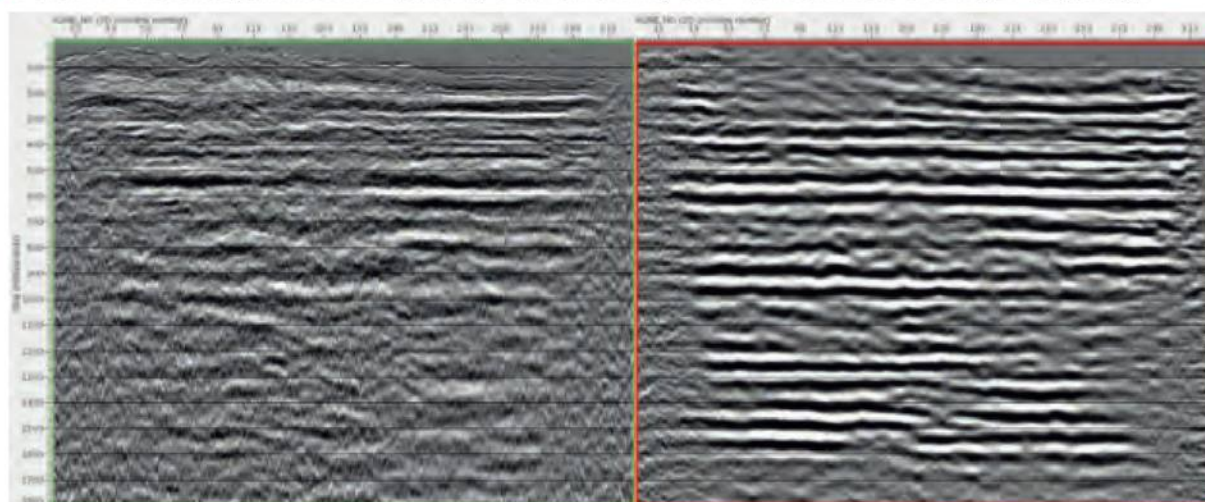
Несимметричность луча учитывалась с помощью асимптотического бинирования (АСР). Основным параметром АСР является предельное значение V_p/V_s , которое обычно уменьшается с увеличением глубины. После тестирования было выбрано значение $V_p/V_s = 2,8$. Статические поправки к уровню приведения 200 м над уровнем моря для пунктов взрыва были взяты из результатов статики по преломленным Р-волнам. Для пунктов приема эти статпоправки масштабировались путем умножения на коэффициент 3,0. По сейсмограммам после АСР и рефракторной статики было проведено две итерации расчета скоростей суммирования и автокоррекции остаточной статики (рис.11).

▼ Рис. 10. Предварительные разрезы PS-волн до поворота Х-компоненты (слева) и после поворота (справа).





▲ Рис. 11. Сейсмограммы АСР (слева) и их амплитудно-частотные спектры (справа).



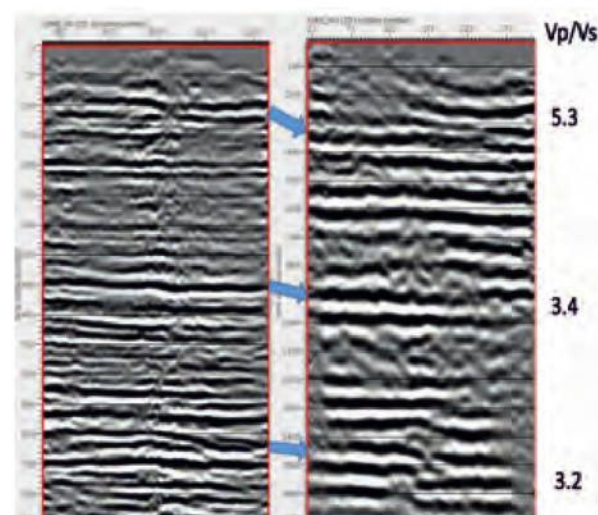
▲ Рис. 12. Разрезы обменных волн после асимптотического бинирования (АСР) и кинематической обработки (слева) и после шумоподавления (справа).

Разрез после кинематической обработки PS-волн показан на рис.12, слева. Для улучшения выделения обменных волн при крайне низком соотношении сигнал/шум применялась процедура **FXU** деконволюции с усиленными параметрами на базе 11 соседних сейсмограмм АСР. Результат применения процедуры показан на рис.12, справа.

Сопоставление полученных временных разрезов для продольных и обменных волн представлено на рис.13. На разрезах волн разных типов уверенно определяются одноименные пакеты отражений (синие стрелки), что позволяет оценить соотношение скоростей путем сравнения времен отражений на разных разрезах. Оценки соотношения $V_p/V_s = (2T_{ps} - T_{pp})/T_{pp}$, где T_{pp} и T_{ps} – двойные

времена пробега PP и PS волн, приведены на рис.13, справа.

▼ Рис. 13. Сравнение изображений на P-волнах (слева) и PS-волнах (справа) и оценка отношения V_p/V_s .



Результаты и выводы

В рамках проделанной работы был отработан сейсморазведочный профиль 2Д длиной 7190 м на монотипных волнах и длиной 1590 м на обменных волнах. Данные были получены с использованием бескабельной системы «GSX» и мобильного источника типа «падающий груз» – ESS-200. Глубинность исследований составила около 1 км. На разрезе обменных волн выделяются те же геологические объекты, что и на разрезе монотипных волн. Данные разрезы могут быть использованы для получения дополнительной информации об исследуемой среде на этапе интерпретации данных, в частности, для оценки соотношения V_p/V_s .

Приведенная в статье технология производства работ при помощи малогабаритного ударного источника и бескабельной регистрирующей системы может быть успешно применена для решения широкого круга задач малоглубинной сейсморазведки.

Литература

- [1] Детков В.А. К 40-летию импульсного источника «Енисей»: вчера, сегодня, завтра. – «Приборы и системы разведочной геофизики», №4(71)/2020.
- [2] Кузнецов В.М. Опыт применения современных технологий при работах на территории РФ по комплексированию волн разных типов. – «Технологии сейсморазведки», № 2, 2008.
- [3] Столбова Т.А., Ланцев В.Ф., Рошмаков Ю.В. (ОАО «Пермнефтегеофизика»), Экологосберегающая технология сейсморазведки в труднодоступных районах. – «Технологии сейсморазведки», №4, 2009.
- [4] Череповский А.В. Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. - ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2017.
- [5] Ясницкий Ю.С., Бакман П.М. Бескабельные технологии сейсморазведки - универсальный инструмент при поиске месторождений углеводородов. На примере оборудования GSX компании Geospace Technologies inc. (США). – «Приборы и системы разведочной геофизики», №2(48)/2014.

Некоторые размышления об очевидном в вибрационной сейсморазведке

- Абдулвалиев М.Т., ПАО «Геотек - Сейсморазведка», г. Москва
- Навроцкий А.О., ФГБУ «ВНИГНИ», г. Москва

Авторы в этой статье рассматривают несколько различных и при этом, казалось бы, лежащих на поверхности, давно известных приемов повышения эффективности вибрационного метода сейсморазведки, которые почему-то либо не используются, либо применяются достаточно редко. В связи с этим считаем обсуждение вопросов, изложенных в данной статье, полезным, т.к. оно позволяет посмотреть на некоторые, вроде бы привычные, способы работ с несколько иной точки зрения.

1. Корреляционный шум и АЧХ вибросейсмических сигналов.

Вибросейсмический метод в корне отличается от импульсных методов, в которых сейсмические волны возбуждаются с помощью взрыва или различного типа поверхностных импульсных источников. При этом отличие заключается не только в приемах возбуждения и регистрации сигналов, но и в последующей предварительной обработке данных с целью получения импульсной сейсмограммы.

В методе «Вибросейс» для этого используют корреляционное преобразование, в ходе которого длительная, нечитаемая виброграмма превращается в импульсную коррелограмму. В то время как в импульсных методах возбуждения сейсмического сигнала сейсмограмма регистрируется сразу, одномоментно, не требуя какой-то специальной предварительной обработки.

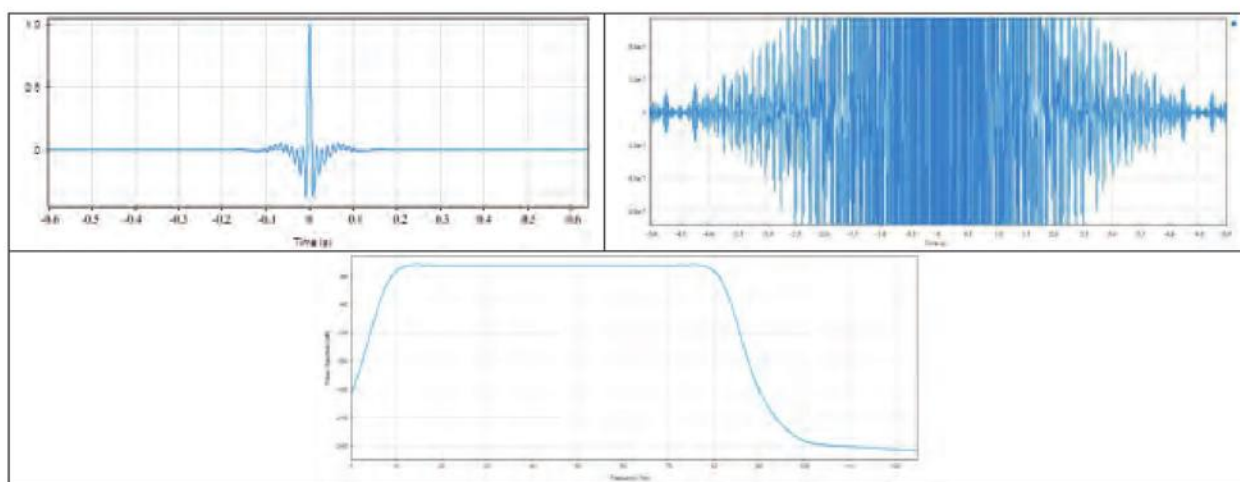
При этом надо отметить, что коррелограмма является фактически синтетической записью, где в процессе корреляционной обработки реальный сейсмический сигнал, а именно, длительные ЛЧМ-отражения (вибротрассы) подменяются искусственным - функцией взаимной корреляции (ФВК) выбранного свипа и отклика среды.

ФВК имеет не только ярко выраженный импульсный максимум, но и дли-

тельные корреляционные шумы (КШ), являющиеся неотъемлемой частью полученной коррелограммы (см.рис.1). Это принципиально отличает коррелограмму от обычной импульсной сейсмограммы, на которой полезный отраженный максимум имеет небольшую длительность, практически не влияющую на последующие отражения. На коррелограмме же КШ от любых сигналов, включая интенсивные первые вступления, поверхностную, преломленную и другие высокоамплитудные первичные волны, распространяются на всю полезную запись, являясь помехами для более слабых последующих отражений, и частично маскируя их.

При этом следует понимать, что в процессе корреляционной обработки происходит перераспределение энергии вибрационного сигнала между основным пиком ФВК и КШ. Определенная часть энергии сигнала уходит в КШ.

На рис. 1 показана функция автокорреляции свипа (ФАК), где слева показан сам импульсный пик функции, а справа в увеличенном масштабе показаны КШ. При этом КШ имеют в своем составе все частоты излученного свипа и эти частоты распределены в определенном порядке по всей длительности ФАК. Давайте посмотрим, как же они распределяются по времени. Причем нас, естественно, интересует лишь время полезной записи



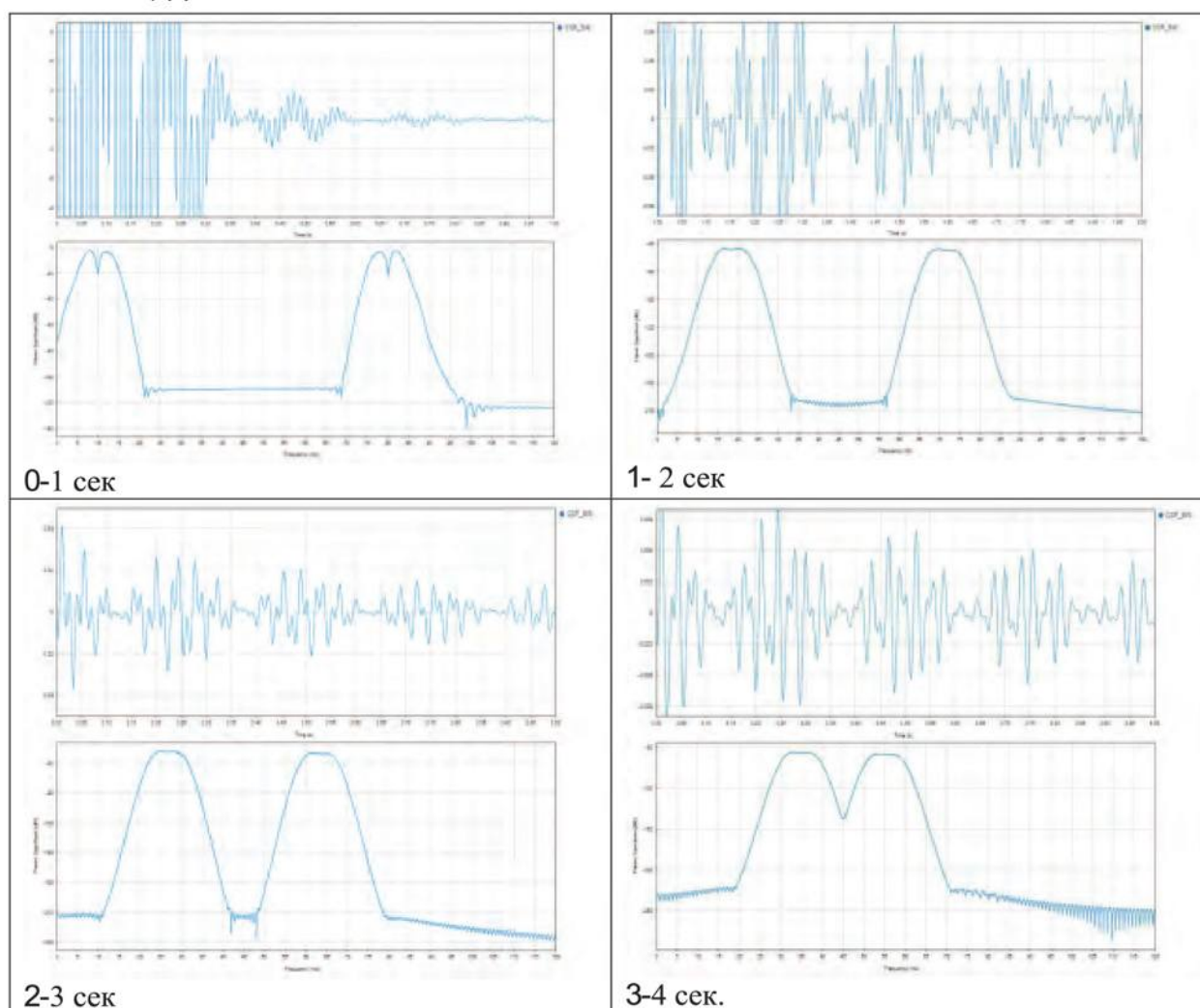
▲ Рис. 1. ФАК свипа со своими КШ. Правая картинка дана с большим усилением, чтобы хорошо были видны КШ.

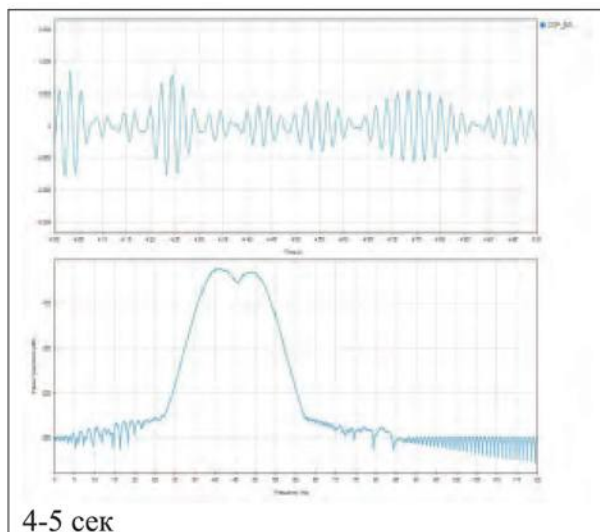
(первые 4-5 секунд). Хотя сами КШ имеют значительно большую длительность, равную длительности излучаемого

сигнала (обычно 10-12 секунд).

Ниже приведены некоторые результаты математического моделирования,

▼ Рис. 2. Спектры КШ на разных временах полезной записи. СВИП: $F_n = 5$ Гц, $F_k = 85$ Гц. Длительность 10 сек.





▼ Рис. 2. (Продолжение). Спектры КШ на разных временах полезной записи. СВИП: $F_n = 5$ Гц, $F_k = 85$ Гц. Длительность 10 сек.

иллюстрирующие сказанное до этого.

На рис. 2 показаны спектры КШ на разных временах ФАК.

СВИП: $F_n = 5$ Гц, $F_k = 85$ Гц. Длительность $T = 10$ сек.

Из приведенных рисунков видно, что КШ имеют распределенный по времени в определенном порядке частотный состав. Например, на первой секунде это начальная и конечные частоты возбужденного сигнала.

При этом на рис. 3 можно увидеть уже не на спектре, а во временной области, что для КШ на первой секунде преобладающими действительно являются начальные и конечные частоты возбуждения. При этом начальная частота осложнена конечной частотой.

На рис. 4 показана полевая корреллограмма, на которой хорошо видны КШ, образованные интенсивными первыми вступлениями. Особенно отчетливо эти шумы видны на так называемых отрицательных временах (до прихода регулярных волн). Напоминаем, что КШ формируются как влево, так и вправо от основного максимума.

Главный вывод - при расчете АЧХ по коррелограмме в выбранном временном окне мы получаем спектр целевого отраженного сигнала, искаженный суммарным спектром КШ от всех предыдущих сигналов. При этом КШ могут создавать достаточно существенные искажения спектра.

Так что всегда необходимо учитывать, что при обычном расчете АЧХ по коррелограмме конечный результат будет изменен за счет попавших в окно расчета КШ от других, более интенсивных регулярных волн, расположенных по оси времени левее (раньше) и дающих КШ, по амплитуде порой сравнимыми со слабыми отражениями. Это хорошо видно, например, на рис. 4, где показана реальная полевая коррелограмма.

Тем не менее на практике именно так рассчитываются АЧХ для целевых горизонтов - по коррелограммам. Надо отдавать себе отчет, что без учета КШ такой спектр не является корректным. Часто создается иллюзия наличия высокочастотной составляющей в полезном сигнале, хотя на самом деле это всего лишь КШ. Следует помнить, что на протяжении первой секунды после прихода любой регулярной волны в спектре КШ преобладают начальная и конечная частота излученного сигнала (см. рис. 3). Зачастую именно высокочастотная часть КШ и преобладает в полученном спектре. К подобной АЧХ надо относиться достаточно осторожно. Для расчета спектров в «Вибросейсе» нужны более точные методики.

В практике вибросейсмической разведки для борьбы с КШ используются самые различные приемы. Однако, одним из самых простых и при этом достаточно эффективным способом является применение конуса. Ниже приведены примеры использования

различных по длительности конусов и их влияние на уровень КШ.

2. Конусы СВИП-сигналов и корреляционные шумы.

На уровень КШ очень сильно влияет длительность конуса. Напоминаем, что конус - это специальный прием, позволяющий в начале возбуждения плавно нарастить амплитуду сигнала и точно так же плавно снизить амплитуду в конце процесса. Без конуса уровень КШ становится намного больше (см таблицы 1 и 2). Чем более плавно нарастает амплитуда СВИПа, тем ниже получаемый уровень КШ.

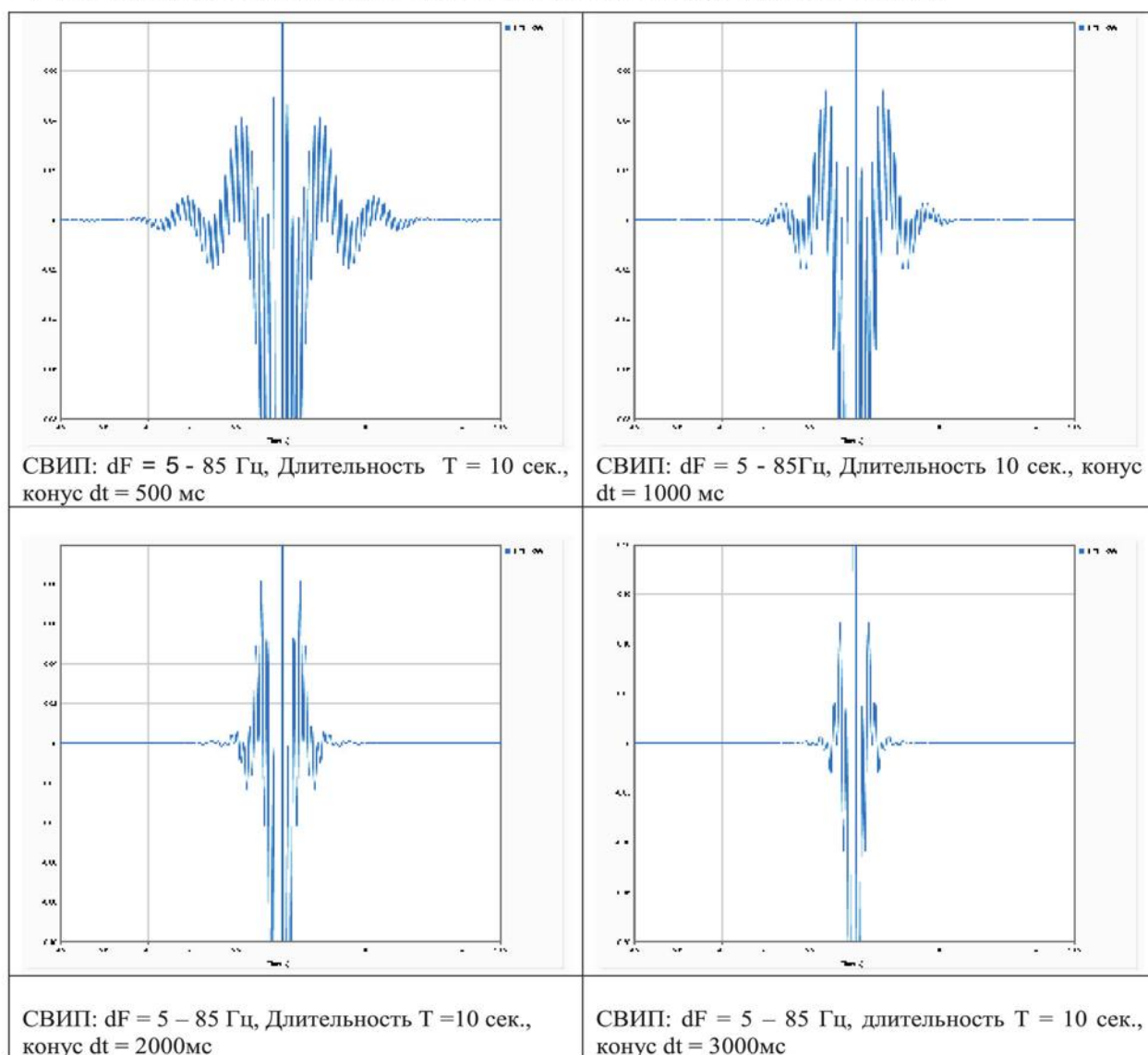
Ниже показаны результаты моделирования, иллюстрирующие зависимость уровня КШ от длительности применяемого конуса.

Из приведенных рисунков видно, что чем длительнее конус, тем меньше уровень КШ в целом. По результатам моделирования были изучены зависимости уровня КШ от длительности конуса и затем оформлены в виде соответствующих таблиц

(см. таблицы 1 и 2).

При использовании конуса мы имеем два противоположных, накладывающихся друг на друга, процесса. Во-первых, конус ослабляет в сфере своего действия

▼ Рис. 3. Зависимость уровня КШ от длительности применяемого конуса.



Интервал анализа, мс	Отношение сигнал / уровень КШ				
	0.200-1000	1000 - 2000	2000-3000	3000 - 4000	4000-5000
Без конуса					
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 0.5 с					
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 1 с					
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 1.5 с					
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 2 с					
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 3 с					
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 4 с					

▲ Табл. 1. Зависимость отношения сигнал/уровень КШ от длительности применяемого конуса. Свип: $dF = 5-85$ Гц, длительность $T = 10$ сек.

возбуждаемый сигнал, снижая его энергию. Но при этом одновременно этот же прием благотворно влияет на конечный результат, достаточно интенсивно снижая уровень КШ с увеличением длительности конуса и, следовательно, увеличивая отношение сигнал/шум.

Таким образом, выбирая длительность конуса при полевых работах, необходимо в ходе предварительных опытно-методических работ найти баланс между этими двумя процессами и выбрать оптимальную длительность конуса.

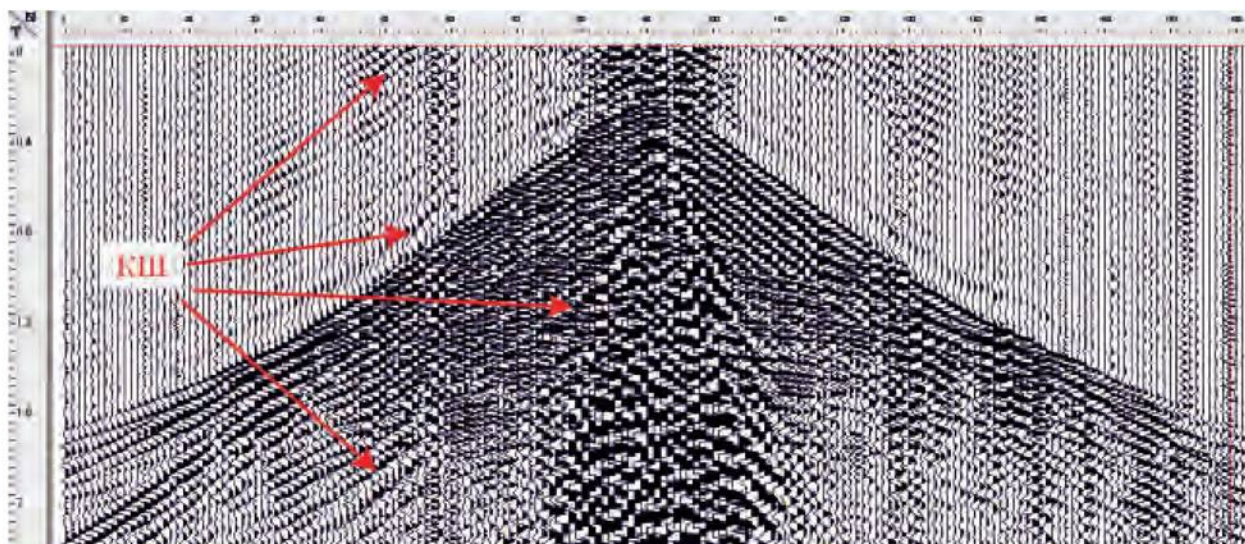
Например, по результатам моделирования (см. таблица 1) видно, что максимальное снижение уровня КШ дает длительность конуса, равная 4 секундам. Но длительный по времени конус снижает энергию возбуждаемого сигнала, поэтому более оптимальным кажется конус величиной 1,5-2 сек. В то же время конус величиной 0,5 сек, довольно часто используемый в полевой вибросейсмо-

разведке, лучше не применять, т.к. в этом случае возникают достаточно интенсивные КШ, наиболее заметные на первой секунде полезной записи (это хорошо видно на рис. 4, особенно при его сравнении с рис. 6-7).

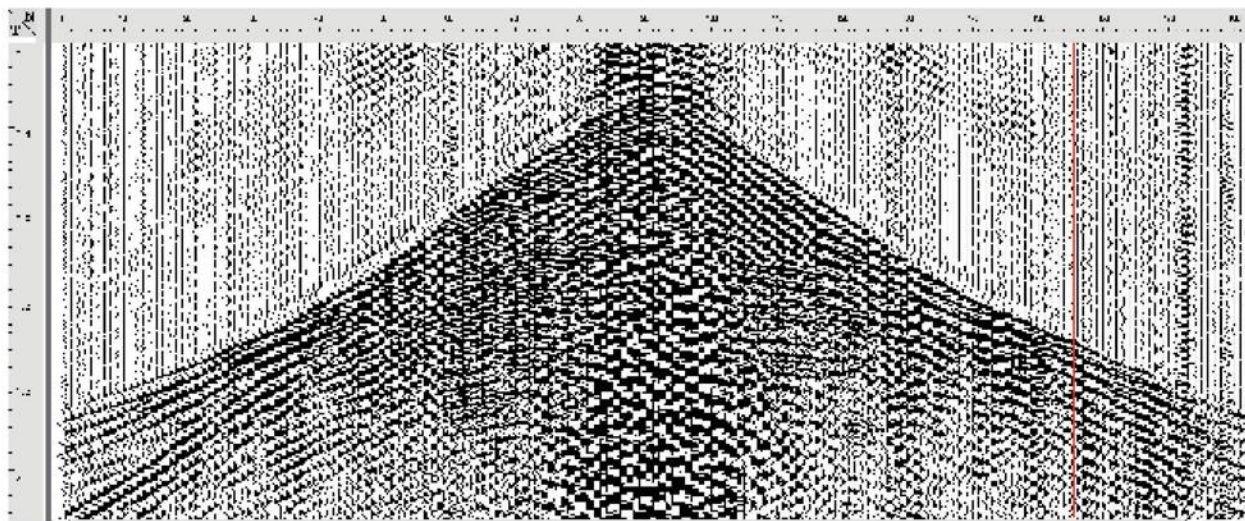
На рис. 4-7 показаны примеры полевых коррелограмм с разной величиной длительности использованного конуса. Записи получены при полевых сейсморазведочных работах в Оренбургской области. Параметры свипа у всех этих записей одинаковы: начальная частота $F_n=5$ Гц, конечная частота $F_k=85$ Гц, длительность свипа $T=10$ сек, число накоплений $N=4$, меняется лишь длительность конуса.

ПРИМЕЧАНИЕ: ОМР проводились при довольно сильной ветровой помехе, когда производственники, в том числе и по этой причине, простаивали.

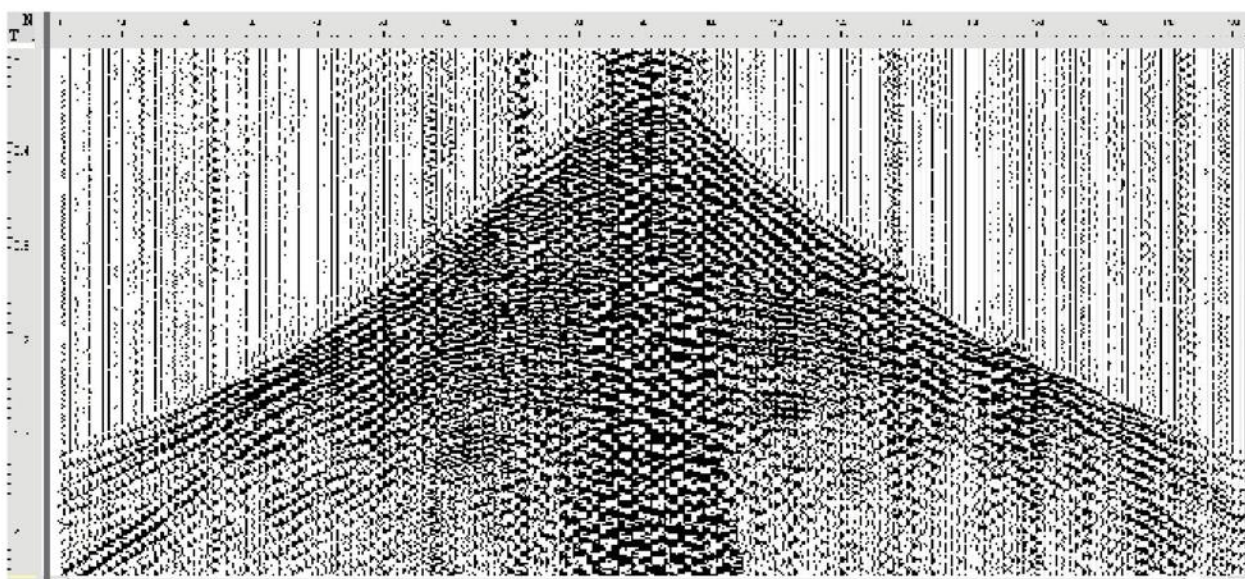
Из рисунков хорошо видно, как увеличение конуса ведет к серьезному снижению КШ. При длительности конуса $dt=0,5$



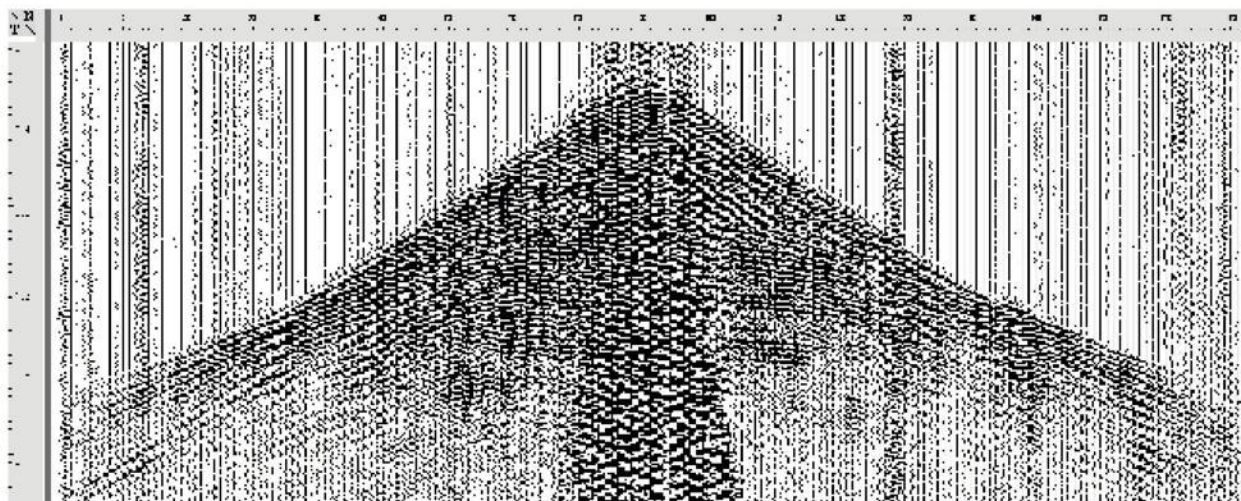
▲ Рис. 4. Correlogрамма с длительностью конуса $dt=0,5$ сек.



▲ Рис. 5. Correlogрамма с длительностью конуса $dt=1,0$ сек.



▲ Рис. 6. Correlogрамма с длительностью конуса $dt=2,0$ сек.



▲ Рис. 7. Коррелограмма с длительностью конуса $dt=3,0$ сек.

сек КШ достаточно интенсивны, это видно на коррелограмме невооруженным глазом. Уже при

$dt=2,0$ сек КШ почти незаметны, а при $dt=3,0$ сек чисто визуально они вообще практически не просматриваются.

Обращаем внимание полевых геофизиков и заказчиков на то обстоятельство, что к выбору конуса практически всегда относятся достаточно рутинно и при длительности свипа 10-16 сек величина конуса обычно выбирается в пределах 0,5-1,0 сек. Но на самом деле это не совсем оптимально, конус лучше увеличить хотя бы до 2,0 секунд, подбирая его по результатам предварительных ОМР. При этом улучшение отношения сигнал/шум полностью компенсирует небольшую потерю излучаемой энергии.

3. Длинные СВИП-сигналы.

Обычный, можно сказать, стандартный вариант полевой вибросейсмической записи предполагает длительность свипа в пределах 10-16 секунд с последующим синхронным накоплением, как правило, 4 возбуждений. Конечно, возможны отклонения, но все-таки описанный выше вариант преобладает в практике производственных вибросейсмических работ. В этом случае общая

длительность процесса возбуждения состоит из четырех, условно говоря, 12-секундных разверток с 5-секундными паузами между ними для полной записи всех отраженных сигналов. Итого, общая длительность записи составляет $(12+5)*4=68$ секунд, если все четыре возбуждения кондиционные.

При этом всем известны длинные свипы, но они почему-то обычно не применяются. Хотя, если использовать один 48-секундный свип с той же возбуждаемой суммарной энергией $12*4=48$, то дополнительное время на регистрацию отраженных сигналов от глубоких горизонтов будет одноразовым и составит всего 5 секунд, тогда общее время регистрации будет равняться 53 секундам. Разница во времени между двумя способами составляет 15 секунд и если за основу взять длинный свип, то общая экономия времени при возбуждении составляет почти 30%. Довольно существенная экономия!

При этом, естественно, получаемые в результате отношения сигнал/помеха будут в обоих рассмотренных случаях одинаковыми. Можно проиллюстрировать это через базу сигнала **B**. Для длинного свипа она будет равна:

$$B=dF*T,$$

а для коротких это будет

$$B = dF \cdot N \cdot t, \text{ где}$$

dF одинаково в обоих случаях,

N - число накоплений, t - длительность короткого свипа,

T - время развертки длинного свипа.

При этом, естественно $T = N \cdot t$.

То, что, по крайней мере, визуально окончательный результат при использовании коротких свипов с накоплением или одиночного длинного свипа практически одинаков, можно увидеть на рис. 8-10, где показаны соответствующие коррелограммы.

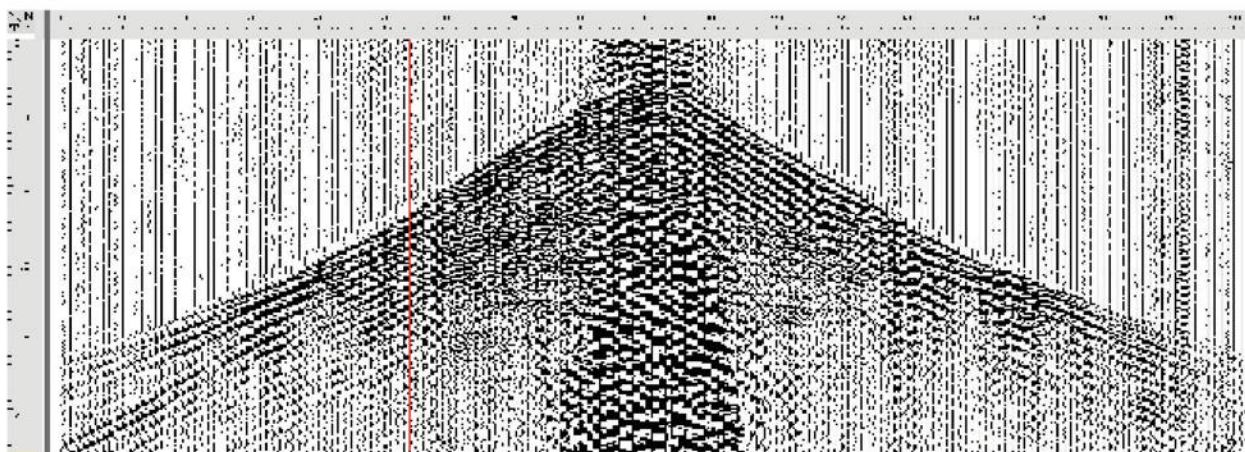
Из рисунков можно сделать заключение, что конечный результат практически одинаков при длительности свипа $T=10$ сек с 4-мя накоплениями и при одном

длинном свипе с длительностью $T=40$ сек.

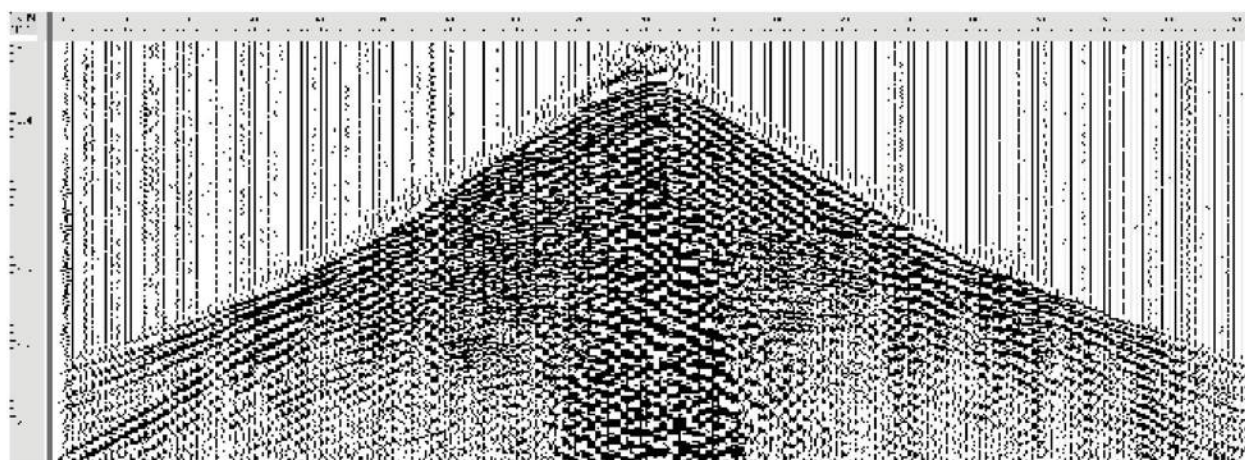
В то же время использование одного длинного свипа вместо четырех коротких дает возможность сократить рабочий цикл вибраторов на одном ПВ до 25%-30% при неизменном соотношении сигнал/помеха.

Иными словами, достаточно серьезно повышается производительность в процессе возбуждения вибросейсмического сигнала.

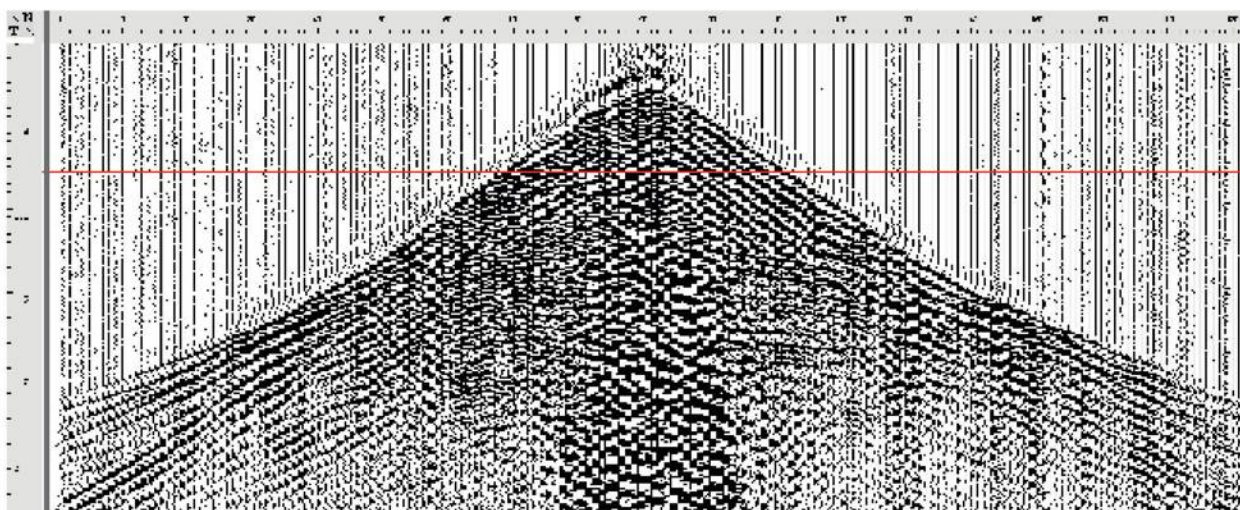
Кроме того, за счет того, что запуск и остановка вибратора при длинном свипе происходит на ПВ лишь раз, а при коротком - многократно, вибраторы изнашиваются меньше, их ресурс сохраняется дольше.



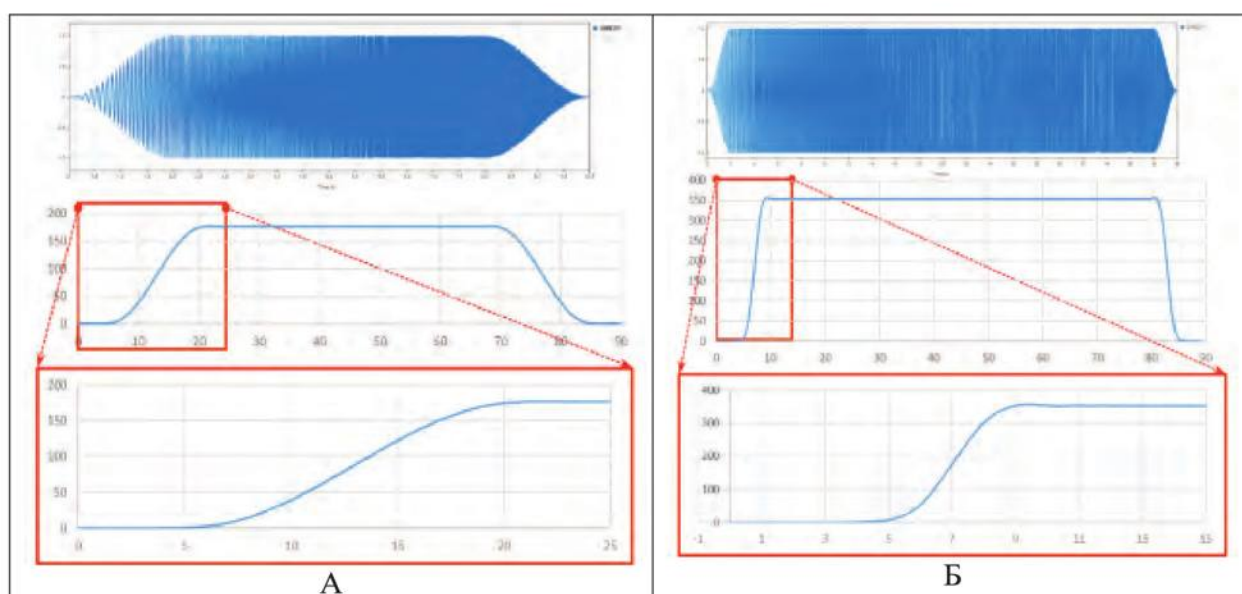
▲ Рис. 8. Коррелограмма с начальными параметрами свипа: $F_n=5$ Гц, $F_k=85$ Гц, $T=10$ сек, длительность конуса $dt=1$ сек, $N=4$.



▲ Рис. 9. Коррелограмма с начальными параметрами свипа: $F_n=5$ Гц, $F_k=85$ Гц, $T=40$ сек, длительность конуса $dt=4$ сек, $N=1$.



▲ Рис. 10. Коррелограмма с обратной разверткой свипа: $F_H=85$ Гц, $F_K=5$ Гц, $T=40$ сек, длительность конуса $dt=4$ сек, $N=1$.



▲ Рис. 11. Сопоставление АЧХ свипов разной длительности (10с и 40 с).

А. СВИП: $dF=5-85$ Гц, $T=10$ сек., $dt=2$ сек. Б. СВИП: $dF=5-85$ Гц, $T=40$ сек., $dt=2$ сек.

При длинном свипе можно получить еще одно важное преимущество. В последнее время уделяется большое внимание низкочастотной составляющей сигнала. При длинном свипе появляется возможность получить более выраженный НЧ-сигнал, чем при коротком свипе. Попробуем объяснить это с помощью соответствующего рисунка (см. рис. 11).

Если dF одинакова (в нашем случае это 80 Гц), а t и T отличаются, предположим, в 4 раза (например, 10 сек и 40 сек), то это означает, что скорость нарастания частоты

ты в единицу времени у короткого свипа в 4 раза быстрее. У короткого свипа скорость развертки равна 8 Гц/сек, а у длинного - 2 Гц/сек. На рис. 11 хорошо видно, что у короткого свипа за счет конуса подавляется низкочастотная часть вплоть до 19 Гц. В то время, как у длинного свипа уже при частоте 9 Гц амплитуда полностью восстанавливается. Это означает, что при длинном свипе самые ценные низкие частоты возбуждаются, а впоследствии и регистрируются лучше, чем у коротких.

Хотя при этом не следует забывать, что

на одних и тех же временах у длинных свипов наблюдается более высокий уровень КШ чем у коротких свипов.

Это хорошо видно при сравнении таблиц 1 и 2. Поэтому, применяя длинные свипы, для снижения уровня КШ необходимо использовать более длительные конусы.

Но если заказчиком поставлена задача получения более выраженных низких частот, можно воспользоваться эффектом медленной развертки частоты при длинных свипах, применив при этом укороченный конус. В этом случае перед началом работ, в ходе ОМР, необходимо найти баланс между приемлемым уровнем КШ и получением более низких частот на записях. Тогда при достаточно приемлемом уровне КШ можно получить на результирующей записи более низкочастотный спектр.

Следует иметь в виду, что в процессе излучения низких частот при длинных свипах, из-за большого хода штока гидроцилиндра происходит повышенный

расход рабочей жидкости. Дефицит производительности насоса на начальном низкочастотном участке свипа покрывается за счет жидкости, накопленной в пневмогидравлических аккумуляторах. Есть опасение, что для длинных свип-сигналов ёмкости аккумуляторов может оказаться недостаточно и эффективность излучения начальных низких частот из-за этого может упасть.

Однако, в ходе полевых экспериментов в Оренбургской области с использованием группы вибраторов НОМАД-65 при возбуждении длинных свипов не было замечено каких-либо серьезных отклонений от штатной работы вибраторов. Но конечно, если на какой-то конкретной площади будет принято решение об использовании длинных свипов, то в ходе предварительных ОМР необходимо тщательным образом проверить возможность их излучения в данных условиях, обращая особое внимание на работоспособность вибраторов.

▼ Табл. 2. Зависимость отношения сигнал/уровень КШ от длительности применяемого конуса. Свип: $dF = 5-85$ Гц, длительность $T = 40$ сек.

Интервал анализа, мс	Отношение сигнал / уровень КШ				
	0.200-1000	1000 - 2000	2000-3000	3000 - 4000	4000-5000
Без конуса	47	56	60	63	65
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 0.5 с	48	73	90	100	107
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 1 с	50	87	103	113	119
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 1.5 с	53	94	110	120	126
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 2 с	55	99	115	124	131
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 3 с	62	107	122	131	138
Отношение сигнал/КШ, дБ, конус 4 с	71	111	127	136	143

В заключение этого раздела можно констатировать, что длинные свипы имеют достаточно много достоинств. И их применению в практике полевых сейсморазведочных работ следовало бы уделять больше внимания.

4. Частотно – зависимое затухание вибросейсмических сигналов в среде.

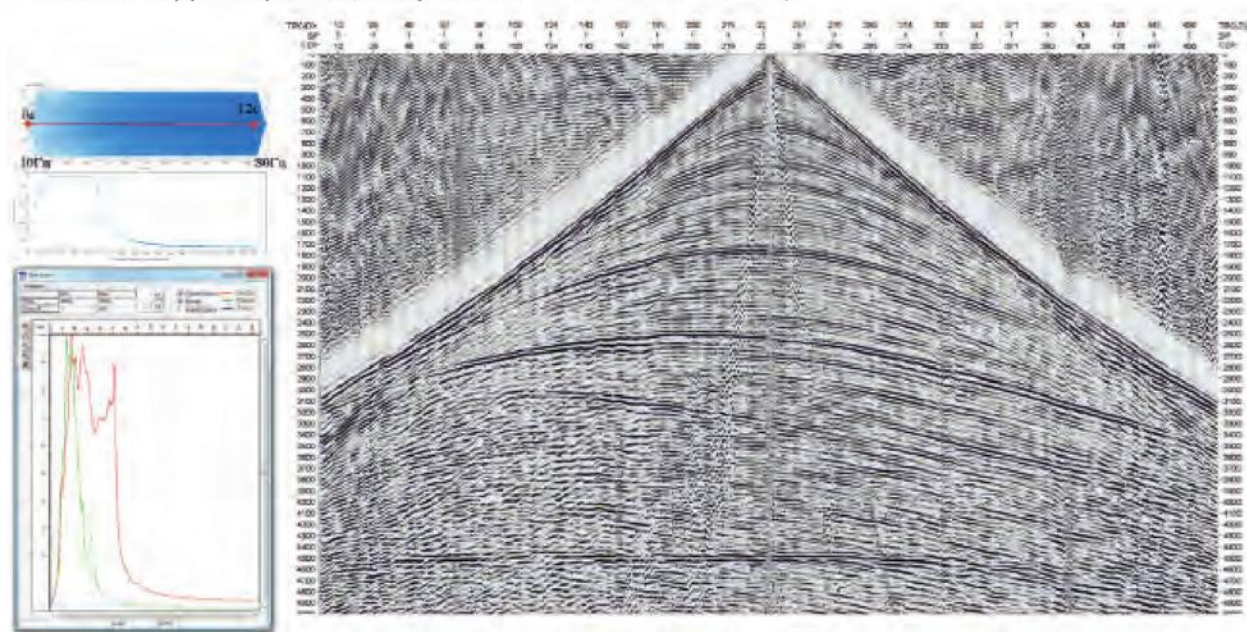
При излучении вибрационного сигнала в недра закачивается длительный широкополосный сигнал. Известно, что при его прохождении через земную толщу происходит частотно-зависимое затухание сигнала. При этом чем выше частота, тем интенсивнее затухание. Предлагалось достаточно количество методов, как зарубежных, так и отечественных, по некоторой коррекции и компенсации этого затухания. Однако, к сожалению, они не дают того эффекта, который от них ожидают. Прежде всего это объясняется ограниченностью времени излучения. Из чисто практических соображений нет никакой возможности увеличить время возбуждения сигнала в разы или даже десятки раз для компенсации частотно-зависимого затухания

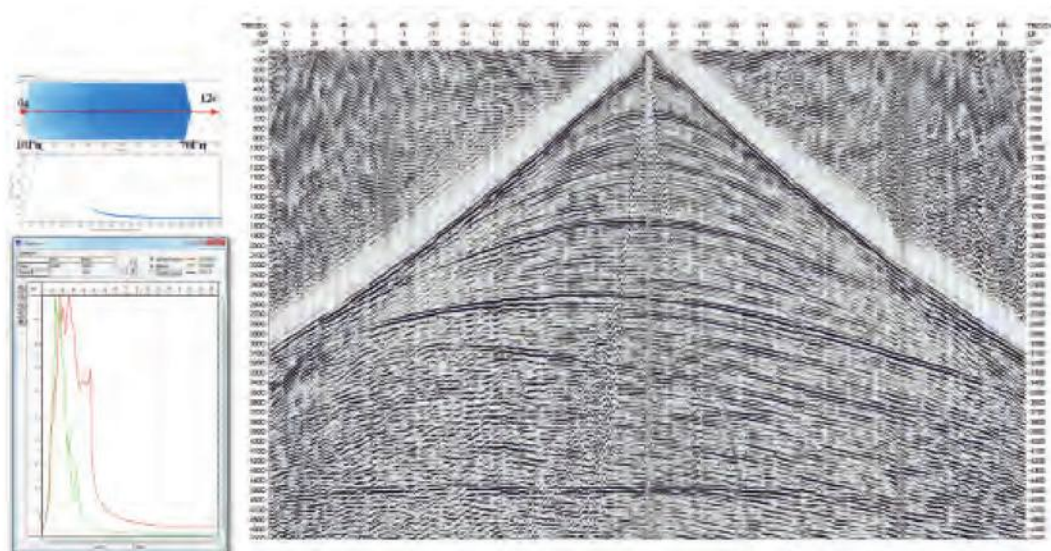
излученного сигнала в среде, т.к. это резко снизит производительность труда.

Величина затухания верхних частот свипа по отношению к самой низкой в разных сейсмогеологических условиях может достигать нескольких десятков раз. Как говорилось выше, у стандартной группы вибраторов нет достаточного времени на точке, чтобы полностью компенсировать это затухание. Для сохранения производительности можно было бы многократно увеличить количество вибраторов в группе, при этом мощность излучаемого сигнала бы увеличилась. Но вновь из практических соображений следует отметить, что это также невозможно из-за возникающего в этом случае существенного увеличения себестоимости работ, уже не говоря о дополнительных проблемах с размещением такой большой группы вибраторов на ПВ.

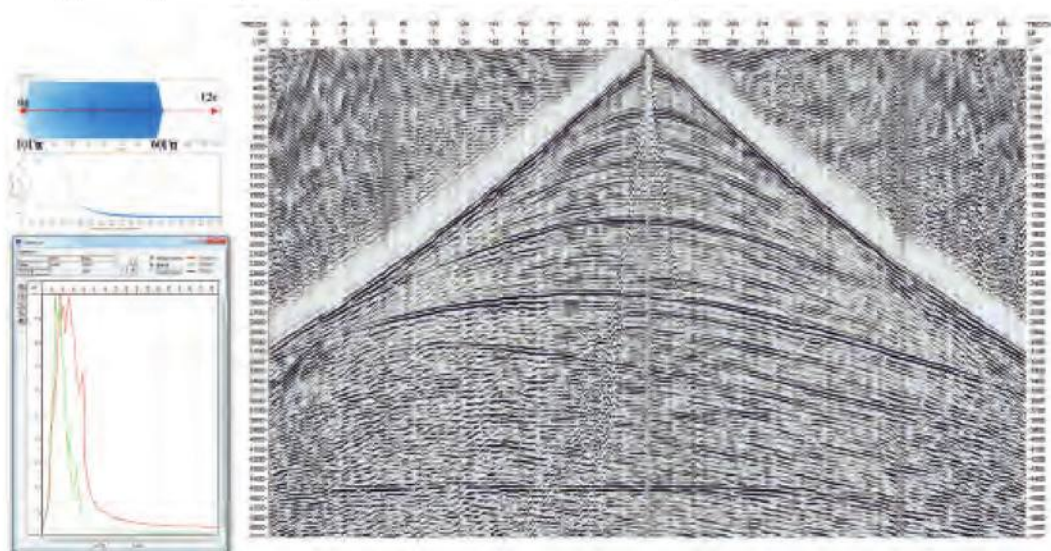
Если же оставить время возбуждения на одной точке тем же самым, то увеличить длительность излучения на верхних частотах можно лишь единственным способом - пропорционально уменьшив длительность излучения на основных

▼ Рис. 12. Коррелограмма, полученная со СВИПом 10-80 Гц.

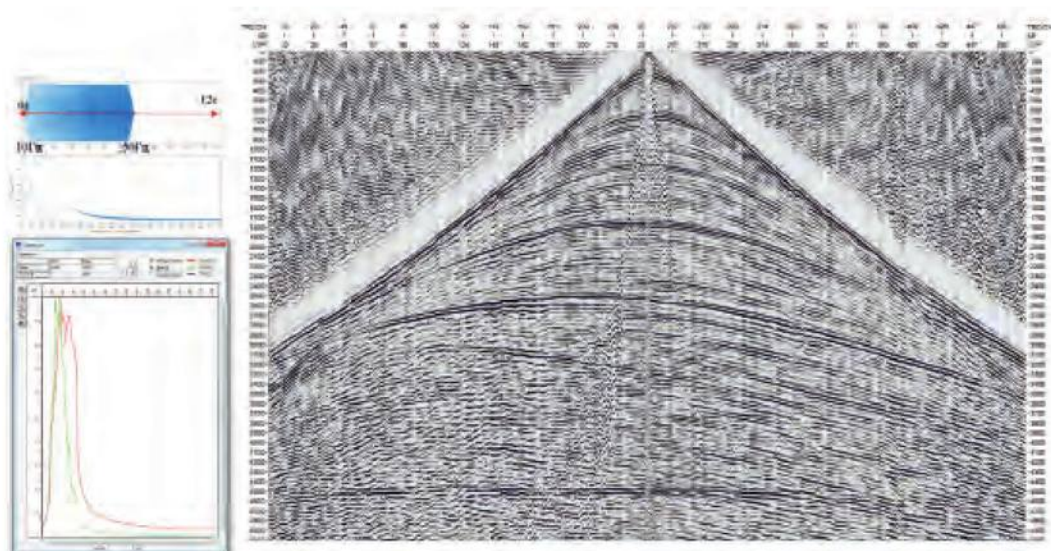




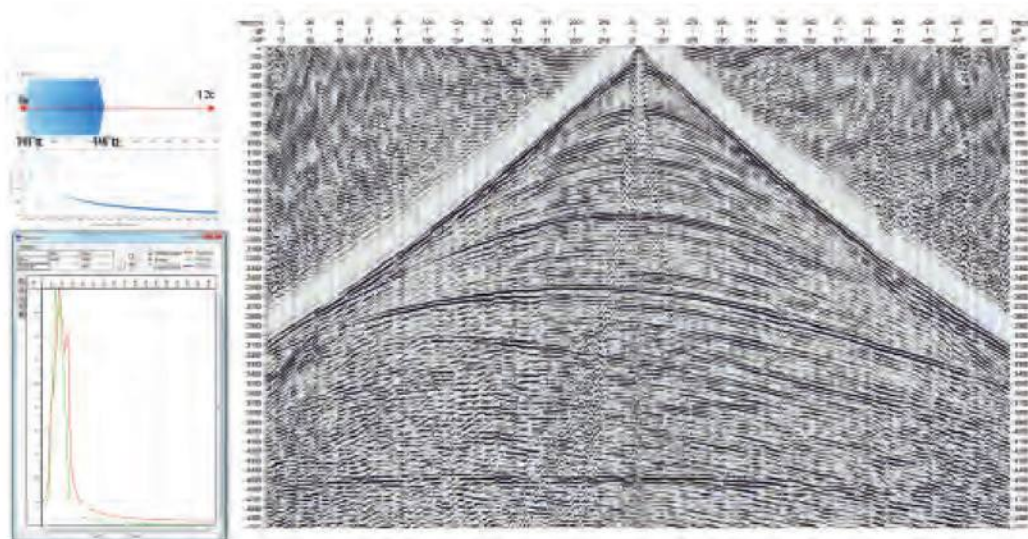
▲ Рис. 13. Коррелограмма, полученная со СВИПом 10-70 Гц.



▲ Рис. 14. Коррелограмма, полученная со СВИПом 10-60 Гц.



▲ Рис. 15. Коррелограмма, полученная со СВИПом 10-50 Гц.



▲ Рис. 16. Коррелограмма, полученная со СВИПом 10-40 Гц.

полезных частотах.

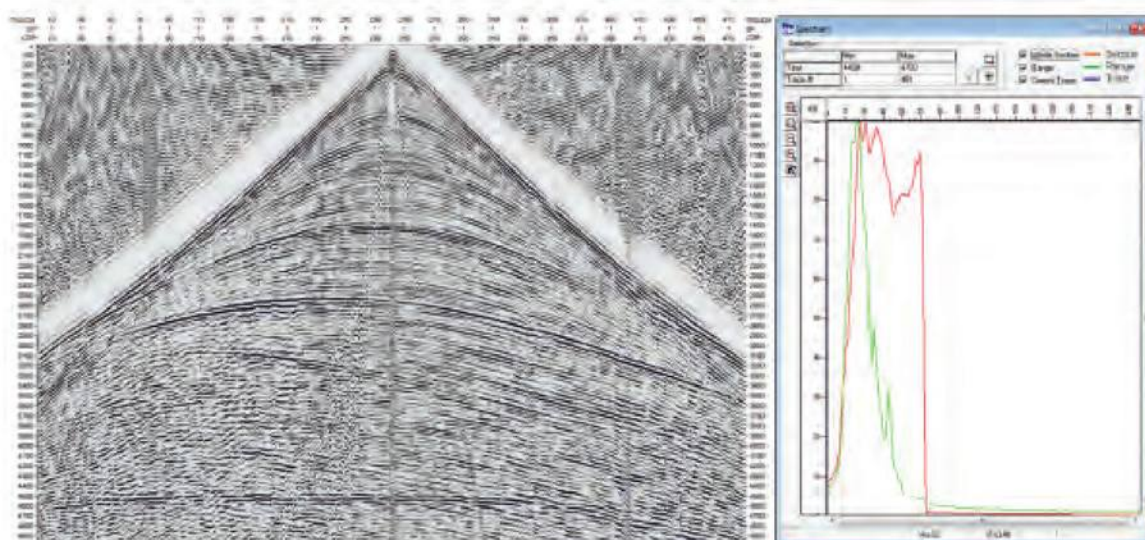
Иными словами, в погоне за призрачным увеличением высокочастотной составляющей, мы были бы вынуждены резко ослаблять основной сигнал в его низко- и среднечастотной части. Иным вариантом является лишь увеличение длительности свипа или количества накоплений, т.е. резкое снижение производительности работ. Вряд ли кто-то на это пойдет, учитывая, что, например, 4-кратное снижение производительности в этом случае никого не удовлетворит, т.к. затухание высоких частот намного больше. Но никто не пойдет даже на 4-

кратное снижение производительности, не говоря уж о более высоких цифрах...

Вопрос частотно-зависимого затухания сейсмического сигнала в среде очень важен и авторы планируют посвятить этому в недалеком будущем отдельную статью.

А пока эффект серьезного затухания высоких частот можно проиллюстрировать с помощью серии рисунков, на которых показаны результаты корреляции исходной виброграммы с укороченными свипами: 10-80 Гц, 10-70 Гц, 10-60 Гц, 10-50 Гц, 10-40 Гц.

При этом длительность полевой



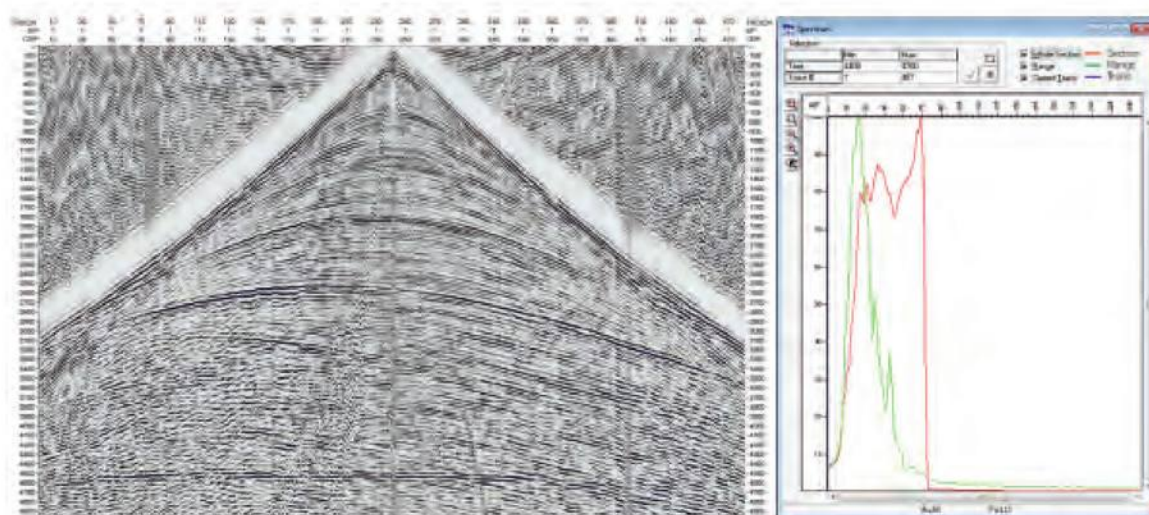
▲ Рис. 17. Коррелограмма без весовой корреляции и ее спектр.

виброграммы, естественно, все время остается равной 10 сек., а вот длительность опорного сигнала непрерывно уменьшается, и из процесса корреляционной обработки последовательно исключается высокочастотная составляющая.

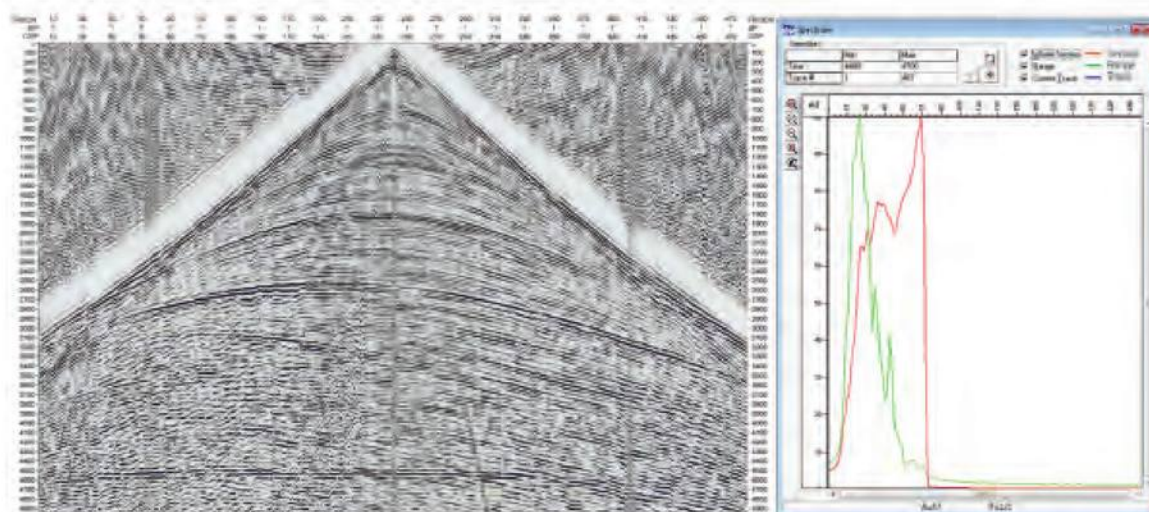
Из приведенных выше рисунков можно сделать заключение, что несмотря на то, что изначально в земную толщу был послан сигнал с $\Delta F=10-80$ Гц, коррелограммы, полученные с укороченными свипами, имеют вид, вполне сравнимый с изначальной записью (см. рис 12-16). При этом в них убирается высокочастот-

ный шум, а полезный сигнал не приобретает каких-то видимых искажений. Это с нашей точки зрения объясняется тем, что реальные отраженные сигналы в зарегистрированных виброграммах за счет частотно-зависимого затухания в среде уже не имеют высокочастотной составляющей, а корреляция с исходным свипом дает нам в области высоких частот лишь усиление высокочастотной помехи.

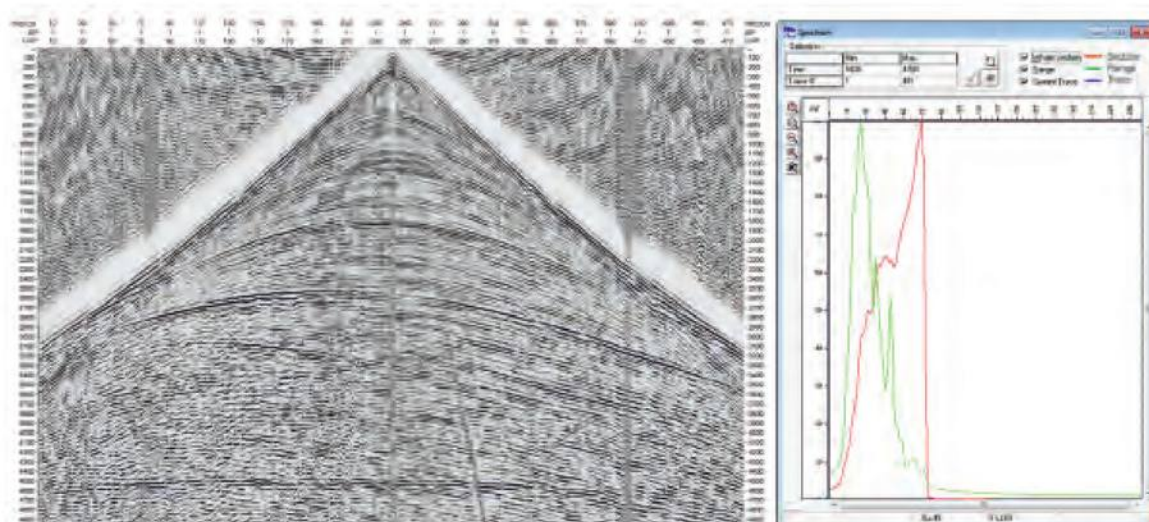
Иными словами, несмотря на то, что был излучен вибросейсмический сигнал с частотным диапазоном 10-80 Гц, корреляция полученной виброграммы со свипами 10-70 Гц, 10-60 Гц, 10-50 Гц и 10-



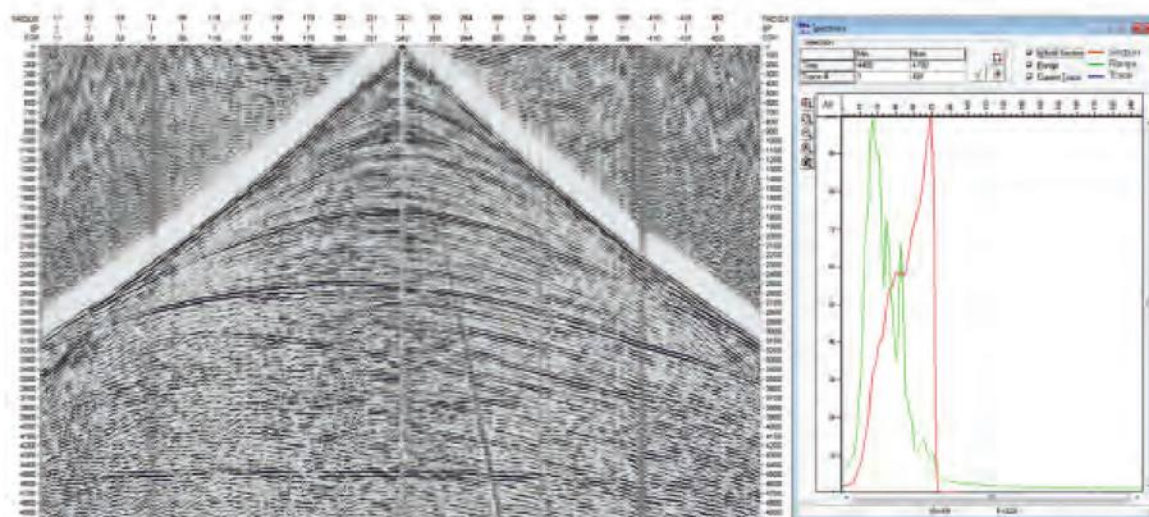
▲ Рис. 18. Коррелограмма и ее спектр. Весовая корреляция с амплитудным соотношением низких и высоких частот в свипе 1/1,5.



▲ Рис. 19. Коррелограмма и ее спектр. Весовая корреляция с амплитудным соотношением низких и высоких частот в свипе 1/2



▲ Рис. 20. Коррелограмма и ее спектр. Весовая корреляция с амплитудным соотношением низких и высоких частот в свипе 1/4.



▲ Рис. 21. Коррелограмма и ее спектр. Весовая корреляция с амплитудным соотношением низких и высоких частот в свипе 1/8.

40 Гц дает результат, визуально почти не отличающийся от корреляции со свипом 10-80 Гц. А ведь при обработке с укороченными свипами исключалась не просто высокочастотная составляющая, но и соответствующая энергия возбужденного сигнала на этих частотах. При этом коррелограммы, полученные с укороченными свипами по динамике мало различаются, что подтверждает тот факт, что высокочастотная составляющая сигнала очень мала и не вносит хоть какого-то вклада в формирование результирующих коррелограмм.

Одним из наиболее простых способов

хоть как-то увеличить взнос высоких частот в формирование корреляционной функции представляется применение обычной простейшей весовой корреляция, когда при корреляционной обработке амплитуда свипа (опорного сигнала) линейно (или по какому-то иному закону) увеличивается одновременно с увеличением частоты до какого-то заранее заданного уровня. Таким образом происходит коррекция частотно-зависимого затухания не в процессе излучения, а в процессе обработки данных. При этом сам возбуждаемый сигнал имеет обычную, равномерную АЧХ. При наличии в

отраженном сигнале высокочастотной составляющей весовая корреляция могла бы помочь его "вытащить".

Приведем примеры весовой корреляции на примере полевых сейсмических материалов, полученных в районе Прикаспийской впадины.

Из вышеприведенных рисунков видно, что с увеличением весовых коэффициентов от 1 до 8, визуально, хоть и немного, но повышается частотный состав записи. То же самое мы видим на приведенных спектрах.

Однако, одновременно мы можем наблюдать, что эффект увеличения высокочастотной составляющей не приводит к какому-то существенному улучшению качества реальной записи в целом. Это объясняется с нашей точки зрения тем, что в исходной записи в отраженных сигналах уже нет этой самой высокочастотной составляющей. Она полностью затухла при прохождении земной толщи, а мы с помощью весового корреляционного преобразования лишь усиливаем высокочастотные помехи.

Таким образом весовая корреляция в принципе может помочь повысить разрешенность полученных коррелограмм лишь при условии, что высокочастотный полезный сигнал реально присутствует на этих записях.

Следует отметить, что авторы не призывают тотально использовать низкочастотные свипы вместо широкополосных. Приведенные рисунки просто иллюстрируют тот непреложный факт, что излученные высокие частоты серьезно затухают в среде и не дают ожидаемого эффекта.

Поэтому перед началом работ рекомендуется в ходе ОМР определить в первую очередь оптимальный частотный состав излучаемого сигнала.

При этом на практике, как мы знаем,

заказчики зачастую требуют от исполнителей поднимать верхние частоты излучаемого сигнала необоснованно высоко.

В то же время приведенные выше примеры говорят нам, что без предварительного изучения закона частотно-зависимого затухания в земной толще нельзя просто умозрительно выбирать верхнюю частоту излучаемого сигнала, потому что необоснованно завышенная частота приводит к потере производительности труда за счет бессмысленного излучения высоких частот, к излишнему износу вибраторов и снижению качества сейсмограмм за счет увеличения высокочастотных шумов.

В заключение, резюмируя вышеизложенное, можно сказать следующее:

1). На всей протяженности коррелограммы всегда присутствуют КШ, как неотъемлемая часть самого метода ВИБРОСЕЙС. При этом особенно сильны они на первой секунде после любой зарегистрированной регулярной волны. В связи с этим необходимо всерьез учитывать влияние КШ на форму АЧХ при расчете спектров в выбранном окне и применять различные методики, помогающие снижать уровень КШ.

2). Эффективным средством для подавления КШ является применение конуса. При опытных работах рекомендуется подбирать оптимальную длительность конуса, исходя из баланса между желаемым отношением сигнал/шум и учетом потери части энергии излучаемого сигнала в случае выбора необоснованно длительного конуса.

3). Для повышения производительности полевых работ следует обратить внимание на использование одиночных длинных свипов вместо коротких, требующих последующего накопления. Одновременно длинные свипы за счет

медленной скорости изменения частоты позволяют получить в спектре излученного сигнала более выраженную низкочастотную часть.

4). Частотно-зависимое затухание сейсмического сигнала в среде является, с одной стороны, широко известным фактом, а с другой стороны, оно часто не учитывается при выборе частотного диапазона излучаемого свипа. Заказчикам и исполнителям вибросейсмических работ следует уделять очень серьезное внимание изучению этого явления на выбранной площади. И затем в соответствии с полученными результатами выбирать частотный диапазон свипа. Зачастую, исходя из самых благих побуждений, необоснованно выбирается верхняя частота в пределах 100 Гц и более. Хотя при этом, как правило, в зарегистрированном полезном сигнале частоты выше 60-80 Гц не наблюдаются (напоминаем, что на расчетном спектре высокие частоты могут проявиться, но не надо забывать, что, как говорилось выше, это, скорее всего, лишь влияние КШ и других помех). Отрицательным следствием выбора необоснованно высокой верхней частоты свипа является снижение производительности работ, ухудшение отношения сигнал/помеха, дополнительный износ вибраторов, а также излишний расход горючего.

Подробнее об авторах



Абдулвалиев
Марат Талгатович

к.т.н.,
Технический
директор НТЦ ПАО
«Геотек - Сейсморазведка»



Навроцкий
Александр Олегович

к.г.-м.н.,
начальник Управления
комплексного
сопровождения
ГРП ФГБУ «ВНИГНИ»

Пути повышения производительности вибросейсморазведки

- Жуков А.П., ООО «Геофизические Системы Данных», г. Москва
- Скирта Д.А., Московский государственный университет, г. Москва
- Шехтман Г.А., ООО «НПП «Спецгеофизика»», г. Москва

Повышение производительности вибросейсморазведки (ВСР) с самого начала ее применения стало едва ли не наиболее важной проблемой. Обусловлено это было тем, что требуемое отношение сигнал/помеха достигалось в ВСР путем увеличения продолжительности свип-сигнала, а платить за это приходилось неизбежным снижением количества физических наблюдений, т.е. производительности [Гридин и др., 2014]. Поэтому одной из важнейших задач, стоящих перед сейсморазведчиками, стало повышение производительности ВСР с минимальным ущербом для качества полевых материалов.

Производительность вибросейсмических исследований можно оценить так:

$$Q = \frac{3600 \cdot N}{T_v + T_n + t},$$

где Q – производительность (число физических наблюдений в день), N – число одновременно отрабатываемых пунктов возбуждения (ПВ); T_v и T_n – затраты времени на возбуждение и приём колебаний, соответственно; t – затраты времени на переезд источников на новое место [Шнеерсон, Жуков, 2013].

Таким образом, производительность может быть увеличена либо путем сокращения времени отработки ПВ либо путем одновременной отработки нескольких ПВ. Рассмотрим возможности повышения производительности ВСР в рамках каждого из этих направлений.

1. Снижение длительности единичного цикла возбуждения.

В рамках данного направления прора-

батываются способы снижения временных издержек при отработке отдельных ПВ: временных затрат на перемещение источников, возбуждение и приём колебаний.

1.1 Попеременная отработка несколькими группами.

Данное решение представляет собой рациональный подход к организации работы нескольких групп источников на исследуемой площади. Идея заключается в том, чтобы в течение интервала времени от начала возбуждения колебаний первой группой и до полного завершения регистрации полезных колебаний, сформированных этой группой, вторая группа вибраторов перемещалась и была готова к работе на следующем ПВ. Этот способ, получивший название *flip-flop*, сокращает временной цикл отработки каждого ПВ на время, необходимое для перемещения группы вибраторов с точки на точку. В тех случаях, когда оперативное перемещение одной из групп вибраторов затруднено, используют 3-4 группы вибраторов.

1.2 Применение длительных управляющих сигналов.

При проведении вибросейсмических исследований до сих пор практически повсеместно проводится *накапливание сигналов*, т.е. отработка одного и того же ПВ несколько раз с последующим суммированием полученных записей. При этом заметно увеличивается отношение сигнал/помеха. Однако тот же эффект может быть достигнут увеличением длительности управляющего сигнала. В этом случае отпадает необходимость в приёме и регистрации колебаний после

каждого воздействия, что ведёт к повышению производительности работ.

1.3 Оптимизация навигационных систем.

Производство недорогих и при этом миниатюрных GPS-чипов привело к появлению на рынке большого количества автономных регистрирующих систем. Широкие возможности для применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) существуют как для пунктов приема (ПП), так и для ПВ. Последние в случае вибросейсморазведки сами определяют свои координаты и начало возбуждения свип-сигнала, что позволяет развивать новые высокопроизводительные методики наблюдений с автономными источниками и приемниками. При этом наблюдения проводят не только на открытой местности, но и в сложных поверхностных условиях, включая населенные пункты.

В современных методиках наземной сейсморазведки спутниковая система позволяет не только определить координаты ПП и вибраторов, но также осуществить режим наведения вибраторов на следующие виброточки. Это позволяет реализовать съемки без предварительной разбивки пикетов, что также повышает общую производительность работ.

1.4 Автоматизация установки сейсмических датчиков.

Заглубление датчиков давно получило признание в сейсморазведке как эффективное средство для уменьшения уровня микросейсм и повышения частоты контактного резонанса вплоть до выведения ее за пределы рабочей полосы частот. Наибольшую востребованность заглубленные датчики получили в бескабельных системах. К примеру, бескабельная система NuSeis содержит регистраторы NRU, снабженные встроенными высокочувствительными приемниками, распо-

ложенными в нижней части обтекаемого сигарообразного корпуса длиной около 20 см. Такая конструкция регистраторов позволяет осуществлять их почти полное погружение в грунт или плотный снег.

Заглубление регистраторов в бескабельных системах, осуществляемое вручную, приводит к существенному снижению производительности работ. Это привело к необходимости разработать автоматизированные установщики. Для модулей NRU в США были разработаны колесные и гусеничные «автоматы», управляемые одним человеком. Они содержат до 300 заглубляемых модулей. По команде оператора осуществляется выдавливание или пробивка углублений в грунте в заданных ПП, сбрасывание в эти углубления модулей NRU из заранее заряженных кассет и последующее обдавливание модулей, обеспечивающее хороший контакт с грунтом.

Завершается разработка «динамического автомата» на дронах с возможностью устанавливать и собирать модули NRU на ходу, что бесспорно повысит производительность полевых работ.

1.5 Применение дронов и роботов.

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА), получивший в англоязычных странах в разговорной речи название *дрон* (от английского drone – трутень), находит все большее применение в разведочной геофизике. Использование таких аппаратов обеспечивает автоматизацию полевых работ и, соответственно, резкое увеличение их производительности. Кроме того, появление модификаций легких и доступных дронов позволило отказаться от пилотируемых вертолетов и существенно снизить стоимость контроля бескабельных расстановок.

Университет Хьюстона значительно продвинулся в вопросах роботизации и

занился конструированием «сейсмического дрона» [Stewart et al., 2016]. В Техасе были проведены опытные работы с дроном-квадрокоптером, в четырех лапах-опорах которого были установлены сейсмоприемники для регистрации сейсмических колебаний (рис. 1). Такой автономный регистрирующий прибор способен перелетать с места на место по команде оператора и в нужные интервалы времени регистрировать сейсморазведочные данные.

Контакт сейсмоприемников с грунтом у сейсмического дрона получается намного хуже, чем у сейсмоприемников, вдавленных в грунт вручную. На записях, полученных от сейсмоприемника, прикрепленного к дрону, наблюдаются помехи резонансного характера, наиболее заметные на участках с высокой травой (рис. 2). В целом же качество сейсмограмм сопоставимо, что доказывает хорошие перспективы применения сейсмических дронов в случае относительно мягкого грунта (поля с невысокой травой, пашня и т.п.).

В настоящее время разрабатывается множество дронов и самоходных наземных аппаратов, содержащих сейсмоприемники (рис. 3). Отметим, что практика сейсморазведочных работ не вполне поспевает за их автоматизацией и роботизацией, которым сопутствует неизбежное ухудшение качества сейсмических

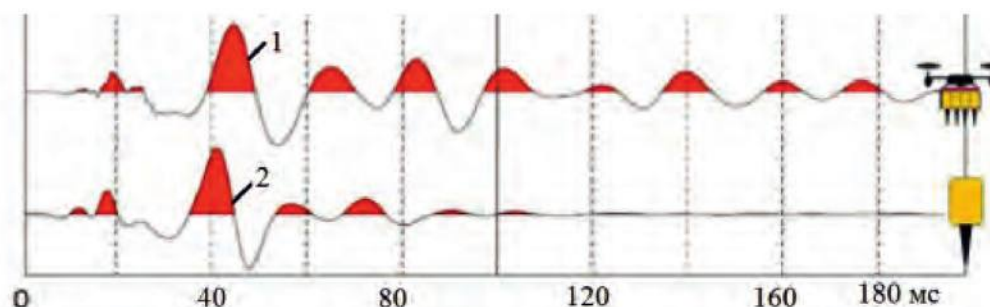


▲ Рис. 1. Сейсмический квадрокоптер с прикрепленной к нему четвероногой записывающей платформой с сейсмоприемниками в каждой из ног. Модифицированный рисунок из [Stewart et al., 2016].

записей, полученных с использованием дронов и прикрепленных к ним роботов. Предстоит еще многое сделать, чтобы справиться с резонансными колебаниями, возникающими на контакте сейсмоприемника со средой.

Устройства, сопряженные с легкими дронами, пока не в состоянии обеспечить надежный контакт с грунтом, исключая регистрацию резонансных помех. Возможно, один из путей преодоления этих трудностей состоит в использовании такого же подхода к данной проблеме, как и в буксируемых наземных косах (стримерах) [Кузнецов, 2013]. Суть его заключается в использовании утяжеленных самоориентирующихся

▼ Рис. 2. Сопоставление записей, полученных путем использования дрона (1) и от заглубленного сейсмоприемника, содержащего концентратор (2). Модифицированный рисунок из [Stewart et al., 2016].





▲ Рис. 3. Самоходный шестирычажный робот, транспортируемый дроном. К каждому рычагу прикреплен сейсмоприемник. Модифицированный рисунок из [Stewart et al., 2016].

геофонов на кардановом подвесе.

2. Увеличение количества одновременно работающих вибраторов.

Сущность такого подхода к решению проблемы вполне ясна из его определения: увеличив количество одновременно работающих источников, мы получим большее количество данных за единицу времени, т.е. напрямую увеличим производительность.

Строгую классификацию методов этой группы составить довольно затруднительно в силу их многообразия и технологической сложности. Танг и Кампман [Tang, Campman, 2016] рассмотрели эти методы с точки зрения когерентности волновых полей отдельных источников (в таком случае большинство методов являются некогерентными) и предложили собственную схему когерентного излучения. Багаини [Bagaini, 2010] выделил три типа методов: одновременное излучение (*simultaneous shooting*), каскадный свип (*cascaded sweep*) и скользящий свип (*slip-sweep*), в зависимости от длительности времени слушания (и наличия такового). В его же работе

[Bagaini et al., 2012] описан более общий подход, согласно которому всю совокупность методов подразделяют на две категории: независимое одновременное вибрирование (*Independent Simultaneous Shooting, ISS*) и управляемое одновременное вибрирование (*Managed Simultaneous Shooting, MSS*). К первой категории относятся методы, в которых отдельные источники действуют совершенно независимо; в методах второй применяют определённые правила их расположения и времени начала работы.

При одновременной работе нескольких вибраторов возбуждаемые ими волновые поля накладываются друг на друга, что создаёт помехи на результирующем изображении. Эти помехи впоследствии довольно успешно устраняются методами обработки, однако результат во многом зависит от качества исходных коррелограмм. Поэтому каждая методика, подразумевающая одновременную работу источников, предлагает свои способы разделения волновых полей на этапе излучения. Авторы настоящего обзора предлагают взять именно этот принцип за основу классификации методик из данной группы. Таким образом, все методики с увеличением числа одновременно работающих вибраторов можно распределить в три категории:

- разделение во времени и в пространстве (в области $t-x$);
- разделение в частотной области (по частотному спектру);
- разделение в фазовой области (по фазовому спектру).

2.1 Методы, основанные на разделении сигналов в пространстве и времени.

Разделение сигналов в методиках этой группы осуществляется за счёт определённых расстояний на местности между источниками и/или временных сдвигов между отсчётами старта их работы. При

этом сигналы либо совершенно разделены во времени, либо излучаются таким образом, чтобы одна и та же частота спектра не излучалась двумя источниками одновременно. Такие методы получили довольно широкое распространение в силу относительной простоты реализации при высокой эффективности.

1) Скользящий свип (*slip-sweep*).

Основы метода впервые предложены в работе [Rozemond, 1996]. Возбуждение колебаний следующей группой проводят в то время, когда предыдущая ещё продолжает работу, с использованием того же свип-сигнала. При этом формируемые ими волновые поля разделены во времени: интервалы между точками старта работы отдельных групп (*slip time*) выбирают с учётом необходимости полного освещения разреза. Это условие позволяет исключить совпадение моментов вступления свип-сигналов, соответствующих целевым отражениям, формируемым разными группами вибраторов, и обеспечивает временную селекцию корреляционных импульсов от разных групп. Последовательности перекрывающихся таким образом вибросейсмических записей сохраняются в памяти регистрирующей системы и затем с использованием отметки момента для каждого возбуждения коррелируются с соответствующим управляющим сигналом.

По оценке разработчиков данного способа, потенциальный максимум его производительности может составить 360 физических наблюдений в час при использовании 4-х групп вибраторов и временном цикле отработки каждого пикета, равном 10 с. К недостаткам данного способа следует отнести мешающее влияние гармонических помех, формируемых вследствие нелинейных искажений высокоамплитудных колебаний, регистрируемых в области первых

вступлений при последующих воздействиях и включаемых в конечные интервалы виброграммы от предыдущих воздействий. Уровень таких помех возрастает по мере того, как временной цикл отработки пикетов приближается ко времени прослушивания. Однако эти помехи могут быть определены экспериментально либо расчетным путем и затем исключены из каждой коррелограммы путем вычитания. Тем самым в принципе возможно поддерживать временной цикл отработки пикетов близким ко времени прослушивания.

Способ давно внедрён в сейсморазведочную практику, в том числе в России, он демонстрирует высокую эффективность (например, [Исмагилов и др, 2013], [Смирнов, Бондарев, 2017]).

2) Динамический скользящий свип (*dynamic slip-sweep*).

Данный способ является модификацией скользящего свипа и отличается от него наличием дополнительного изменяемого параметра – дистанции между одновременно работающими источниками (*slip distance*). Параметры взаимозависимы: чем выше дистанция, тем меньше временной интервал, и, следовательно, выше производительность. Соотношение этих характеристик (т.н. *time-distance rules*, TDR) выбирается с целью оптимального подавления интерференционных и гармонических помех. Основы способа изложены в работе [Liu et al., 2014].

3) Одновременное вибрирование с разделением по расстоянию (*Distance Separated Simultaneous Sweeping*, DSSS, или DS3), предложено в работе [Boushka, 2010]. Принцип технологии довольно прост: действующие одновременно источники располагаются друг от друга на расстоянии, превышающем удвоенный максимальный вынос: таким обра-

зом, зона интерференции волновых полей будет располагаться ниже целевого интервала исследований. В той же работе приводится пример успешного применения метода при широкоазимутальных высокоплотных наблюдениях в Омане. Также описано его применение при изучении угольных залежей [Batting et al., 2019].

4) Метод псевдослучайных временных сдвигов (*pseudorandom time delays*).

Технология, предложенная в работе [Hampson et al., 2008], напоминает метод скользящего свипа, но с различными псевдослучайными сдвигами между временами старта отдельных источников. Такой подход позволяет снизить когерентность интерференционных помех.

5) Методика независимого возбуждения сигналов (*Independent Simultaneous Sweeping, ISS*).

Метод является зарегистрированной технологией компании British Petroleum и впервые описан в работе [Howe et al., 2008]. Он основан на использовании современных систем ГНСС и непрерывной регистрации. Вибраторы, оснащенные системами GPS, работают совершенно независимо друг от друга и возбуждают один или несколько сигналов различной длительности, с тем, чтобы суммарная энергия воздействия на всех ПВ была одинакова. Радиосвязь между вибраторами и сейсмостанцией в этой методике не обязательна, а время начала возбуждения свип-сигналов и времена сейсмических отсчетов присваиваются при помощи системы GPS. Взаимное влияние волновых полей источников друг на друга на выборках равных удалений приобретает характер случайного шума и устраняется стандартными процедурами обработки.

Метод позволяеткратно повысить производительность работ (увеличение зависит только от количества одновременно работающих вибраторов) без потери качества окончательных изображений. Существенно, что поломка одного из источников мало влияет на ход работ.

Примеры успешного применения метода описаны в ряде статей, в том числе [Stone, Tailor, 2010; McCarthy et al., 2017; Коротков, Жуков, 2020]. Известны также примеры применения ISSN, т.е. технологии ISS с нодальными регистрирующими системами [Howe et al, 2013; Ahmad et al., 2013; Dvorak et al., 2014].

6) Сверхвысокопроизводительная методика (*Ultra High Productivity, UHP*).

Технология, разработанная специалистами компании Petroleum Department Oman, во многом схожа с технологией ISS, но подразумевает сочетание некоторых минимальных правил расположения источников в пространстве и временных сдвигов между отсчётами старта их работы. Подробное описание метода и пример его применения на практике приведены в статье [Zhao et al., 2018]. Отметим, что, несмотря на название этого метода, технология ISS позволяет добиться более высоких показателей производительности (более 40 тыс. ПВ в сутки против 25-30 тыс. у метода UHP).

2.2 Методы, основанные на разделении сигналов в частотной области.

Для данной группы методов также не происходит одновременного излучения одной и той же частоты спектра, но этот эффект достигается видоизменением самого сигнала, внесением изменений в его частотный спектр либо в закон изменения частоты во времени.

1) Взаимно ортогональные сигналы (*upsweep + downsweep*).

Управляющие сигналы (также называемые свип-сигналами или вибросейсмическими развёртками) представляют собой квазигармонические колебания с изменяющейся во времени частотой. При этом частота может со временем как возрастать (*upsweep*), так и снижаться (*downsweep*). Взаимно ортогональными называют свип-сигналы, взаимная корреляция которых стремится к нулю: пара *upsweep + downsweep* относится именно к таким сигналам..

Исторически одним из первых способов, нацеленных на повышение производительности ВСП, был способ, в котором применяется отработка двух ПВ с использованием взаимно ортогональных вибросейсмических сигналов при регистрации записей на один носитель. При этом с первого ПВ задают ЛЧМ-сигнал типа *upsweep*, а для второго ПВ – такой же по длительности и по частотному диапазону ЛЧМ-сигнал типа *downsweep*. При корреляционной обработке такой записи с разными свип-сигналами получают соответствующие им коррелограммы.

Этот способ позволил примерно в 2 раза повысить производительность работ. Однако при этом на коррелограммах присутствует фон помех, связанный с работой другого ПВ. Для устранения этого недостатка потребовалась некоторая модернизация. Модернизированный способ для каждого из двух ПВ предусматривает применение ортогональных сигналов, но в виде четного количества разнополярных сегментов комбинированного сигнала. При этом кодовые функции последовательностей сегментов комбинированных сигналов выбирают, исходя из условия полного исключения взаимного влияния волновых полей, возбуждаемых разными группами вибраторов [Deluchi et al., 1987]. Поскольку модернизация ориги-

нального метода помимо обращения зависимости частоты от времени подразумевает также фазовое кодирование сигнала, в нашей классификации она может быть отнесена также к методам с разделением сигналов в фазовой области.

2) Взаимно ортогональные сигналы с переменным диапазоном частот (*orthogonal vibroseis sweeps*).

Данный метод также предполагает излучение взаимно ортогональных сигналов, но построены они на нескольких иных принципах. В работе [Xia et al., 2005] предлагается использовать развёртки, состоящие из набора сегментов. Длительность и спектральный состав каждого сегмента выбираются таким образом, чтобы одновременно излучаемые сегменты относились к разным, не перекрывающимся, диапазонам частот, и, следовательно, были бы взаимно ортогональны.

3) Смешанный сбор данных с распределённым массивом источников (*blended acquisition with dispersed source array*).

Теоретические основы метода изложены в работе [Berkhout, Blacquiére, 2011]. Он подразумевает одновременное излучение множества узкополосных сигналов с различными центральными частотами, в сумме перекрывающих нужный диапазон частот. Метод подразумевает рассеянное размещение излучателей (*Dispersed Source Array, DSA*) на площади, так как в соответствии с критерием Найквиста расстояния между источниками должны быть меньше половины длины излучаемой волны. Такой подход позволяет перейти к узкополосным виброисточникам более простой конструкции. В дальнейшем метод получил развитие: в работе [Ishiyama, Wei, 2021] предлагается дополнить оригинальную технологию различ-

ными и/или модулированными свип-сигналами. Кроме того, в другой работе авторов исходного метода [Berkhout, Blacquiére, 2013] показано, что использование смешанных наблюдений позволяет даже повысить отношение сигнал/помеха на исходных данных относительно стандартной вибрационной сейсморазведки благодаря увеличению временной плотности энергии источников.

4) Псевдослучайные сигналы (*pseudo-random sweeps*).

Псевдослучайными называют свип-сигналы, зависимость излучаемой частоты от времени в которых носит характер, близкий к случайному (хотя в действительности они задаются в соответствии с определённым законом). Такие сигналы известны довольно давно: они, как и многие другие нелинейные развёртки, были описаны в статье [Goupillaud, 1976], однако сейчас интерес к ним снова пробуждается в связи с развитием методов повышения производительности вибрационной сейсморазведки. К примеру, в отечественной технологии Shuffle. Исходный ЛЧМ сигнал (или сигнал другого типа) разбивают на интервалы, которые соизмеримы между собой по временной продолжительности, при этом продолжительность отдельного интервала на два порядка меньше продолжительности управляющего сигнала. После этого интервалы сигнала стыкуют между собой в виде новой последовательности, причем место каждого из выделенных ранее интервалов в этой последовательности определяют по датчику случайных чисел [Гридин и др., 2016]. Поскольку закон, по которому изменяется частота в псевдослучайной развёртке, меняется от источника к источнику, результирующие сигналы довольно слабо коррелируют между

собой при одновременном излучении, что значительно снижает уровень интерференционных помех.

Различные типы псевдослучайных сигналов подробно описаны в работе [Dean, 2014]. Один из примеров применения подобных сигналов в контексте повышения производительности приведён в статье [Zhukov et al., 2017], где отмечается повышение доли высоких частот на результирующей записи. В работе [Scholtz, 2014] предлагается способ оптимизации псевдослучайных сигналов для расширения спектра записи в область низких частот.

5) Свип-сигналы переменной длительности (*dithered sweep length*).

В работе [Dean et al., 2016] предложено использовать при одновременном излучении свип-сигналы со слегка изменяющейся длительностью. Такой подход менее эффективен с точки зрения разделения волновых полей (в сравнении с методами фазопеременных сигналов), но зато менее чувствителен к нерегулярности съёмки и позволяет подавлять гармонические помехи в ситуациях, когда невозможно применить фазопеременные развёртки.

2.3 Методы, основанные на разделении сигналов в фазовой области.

В таких методах разделение сигналов происходит посредством внесения изменений в их фазовые спектры.

1) Каскадные свип-сигналы (*cascaded sweeps*).

При использовании данного метода свип-сигналы, идентичные по длительности и частотному диапазону, излучаются один за другим без временных задержек (эти развёртки часто рассматриваются как сегменты одного каскадного свипа). Каждый последующий сегмент сдвигается в фазовой области на $2\pi/n$, где

n – число сигналов в серии. Затем проводится корреляция со свип-сигналом, имеющим соответствующий набор фазовых сдвигов и один дополнительный сегмент, идентичный первому: это нужно для эффективного подавления гармонических искажений, о которых пойдёт речь далее. Метод разработан компанией Exxon Mobil и впервые описан в патенте [Andersen, US Patent № 5410517 (Apr. 25, 1995)]. В работе [Benabentos et al., 2006] описано применение метода в рамках полевого эксперимента в Мексике.

2) Вибрационная сейсморазведка повышенной надёжности (*High-Fidelity Vibratory Seismic*, HFVS).

Данный метод, впервые описанный в статье [Allen et al., 1998], основан на использовании при обработке данных сигнала, записанного акселерометрами, установленными на опорной плите и инерционной массе виброисточника (*ground-force* сигнала). Это позволяет повысить достоверность данных, поскольку при таком подходе устраняется искажающее влияние кратных гармоник, изгибания опорной плиты и неоднородностей внутри излучающих групп. Кроме того, авторы кратко затрагивают тему фазового кодирования сигналов при одновременной работе нескольких источников. Эту тему продолжает работа [Moldoveanu, Tite, 1999], в которой описывается способ повышения отношения сигнал/помеха для метода HFVS в сложных геологических условиях путем перемещения групп с перекрытиями и разделения частотного диапазона развёртки на несколько сегментов. Затем в статье [Moldoveanu et al., 2017] рассматривается применение в полевых условиях комбинации фазового и частотного кодирования, что повышает ортогональность сигналов отдельных источников и

снижает эффект зашумления кратными гармониками.

Специфические проблемы, характерные для методов одновременного излучения:

1) Необходимость непрерывной регистрации крупными приёмными расстановками (т.н. «супер-спредами») и в течение длительного периода времени.

Эта проблема характерна для всех методов одновременного излучения и является их неотъемлемой составляющей. Такое требование накладывает соответствующие издержки для исполнителя работ с точки зрения технического обеспечения, логистики и контроля; этот факт должен учитываться при расчёте экономического эффекта от применения метода. Отчасти связанные с этим фактором неудобства могут быть нивелированы использованием бескабельных систем регистрации, однако они имеют свои недостатки, связанные с автономностью модулей, невозможностью контролировать их состояние и качество регистрируемых данных.

2) Невозможность проведения контроля качества данных в реальном времени.

Из непрерывности и продолжительности записи следует невозможность контролировать её качество в реальном времени стандартными методами. В настоящее время значимость полевого контроля качества (QC) снижается; тем не менее, этот фактор накладывает дополнительные риски на производство работ.

3) Подавление интерференционных помех (*деблендинг*).

Главной и основополагающей проблемой при использовании методов с одновременным излучением является устранение взаимного влияния волновых полей отдельных источников друг на друга. Ранее уже были рассмотрены

способы снижения этого влияния на этапе проведения полевых работ. Ниже речь пойдёт о подавлении интерференционных помех, остающихся на записях после корреляции.

В целом сейчас выделяются три принципиальных подхода к решению данной проблемы. Первый подход заключается в том, чтобы полностью отказаться от её решения: при корреляции, сортировке и дальнейшем суммировании, по мнению некоторых авторов, обеспечивается достаточное для решения большинства геологических задач качество итоговых изображений. Так, подобная точка зрения отстаивается в работе [Нюо et al., 2011]; вместе с тем, её авторы признают необходимость деблендинга при контроле качества данных.

Второй подход, назовём его здесь *фильтрационным*, более содержателен. Время начала излучения в методах с одновременной работой нескольких источников, как правило, случайно; тогда на коррелограммах сигнал когерентен во всех сортировках, в то время как интерференционные помехи – только в коррелограммах ОПВ. Методы на основе фильтрации используют некогерентность помех в других сортировках и подавляют их как случайный шум. Примеры успешного использования такой схемы подавления интерференционных помех представлены в работах [Hampson et al., 2008; Коротков, Жуков, 2020].

Третий, инверсионный, подход рассматривает вопрос деблендинга как проблему итерационного приближения к некоторому свободному от помех результату. Такие методы используют разделение сигналов в других областях (например, в $f-k$). Разработано множество способов деблендинга в рамках инверсионного подхода; с некоторыми из них можно ознакомиться в работах

[Mahdad et al., 2011; Wapenaar et al., 2012; Ibrahim, Sacchi, 2015; Dong et al., 2018; Song et al., 2019; Nakayama et al., 2019; Shipilova et al., 2020, Bilsby et al., 2021].

В уже упомянутой ранее статье [Bagaini et al., 2012] проводится прямое сравнение перечисленных подходов; наилучшие результаты достигаются при использовании *инверсионных* методов, однако они при этом являются наиболее затратными и сложными в реализации.

4) Гармонические искажения.

Вибрационной сейсморазведке, как известно, присуща проблема возникновения нелинейных искажений – *кратных гармоник*, которые возникают на сейсмических изображениях вследствие нелинейности гидравлической системы источника, уплотнения грунта под воздействием опорной плиты и её неидеальной жёсткости. Специфическим для методов одновременного излучения является тот неприятный факт, что интенсивные кратные гармоники (как правило, третья) от последующего излучения накладываются на данные предыдущего. Описание и примеры подобного влияния приведены в работе [Bagaini, 2010].

Хорошие результаты в подавлении гармонических помех показывают методы, использующие фазоманипулированные сигналы. Этот подход известен как способ Рича [Rietsch, 1981], он в полной мере реализован в методе каскадного свипа, описанном ранее. Также для этих целей могут применяться, пусть и с меньшей эффективностью, свип-сигналы переменной длительности (*dithered sweep length*). Кроме того, в приложении к статье [Bagaini, 2010] описан способ подавления гармоник, основанный на предсказывающей деконволюции.

5) Корреляционные помехи.

В работе [Денисов, Шалашников,

2011] описан специфичный для метода *slip-sweep* тип корреляционных помех, обусловленный наличием в виброграмме выраженного цуга поверхностных волн, а также способ устранения этих помех.

Заключение

Разнообразие устоявшихся и новых технологий, нацеленных на повышение производительности вибросейсморазведки, не снимает вопроса об обеспечении при этом достаточно высокого качества сейсмических записей, необходимо для решения тонких динамических задач. Совершенствование технических средств и программно-алгоритмического обеспечения должны в целом обеспечивать оптимизацию решения поставленных задач путем сокращения затрат без снижения точности получаемых результатов.

Разработка новых технологий вибросейсморазведки будет наиболее эффективна, если она будет осуществляться на стыке разных направлений. К примеру, в скважинно-наземной сейсморазведке, а также в проектах, где используются разные типы излучателей упругих волн.

Литература

- Гридин П. А., Жуков А. П., Шехтман Г. А. Способ вибрационной сейсморазведки // Патент РФ № 2570587 от 22.10.2014, опубл. 10.12.2015 Бюл. № 34.
- Гридин П. А., Жуков А. П., Шехтман Г. А. Способ вибрационной сейсморазведки // Патент РФ № 2623655 от 01.07.2016, опубл. 28.06.2017 Бюл. № 19.
- Денисов М.С., Шалашников А.В. Способ подавления помех на коррелограммах, полученных при использовании высокопроизводительной схемы наблюдений *slip-sweep*. // «Геомодель – 2011», г. Геленджик, 11–15 сентября 2011 г.
- Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками // Тверь, ООО «Издательство ГЕРС», 2011. – 412 с.
- Исмагилов А.Ф., Гилаев Г.Г., Манасян А.Э. и др. Опыт проведения сейсморазведочных работ МОГТ-3D по методике *Slip-Sweep* // Нефтяное хозяйство. - 2013. - № 4. - С. 82-85.
- Коротков И.П., Жуков А.П. Независимое одновременное возбуждение свип сигналов для повышения производительности вибросейсморазведки. // ГеоЕвразия – 2020. Труды конференции. 2020, Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», том 2, с. 93-96.
- Кострыгин Ю.П. Вибросейсмический и кодоимпульсный способы сейсмической разведки. // Краснодар: Просвещение-Юг, 2014, 494 с.
- Кузнецов И.М. Буксируемая сейсмическая коса – это актуально! // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 1, 2013, с. 11-18.
- Кузьмичев В.Е. Время сделать следующий шаг в сейсморазведке (RT SYSTEM 2) // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 2014, с. 50-58.
- Мужно Д.А. Высокопроизводительный вибросейс // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 3, 2004, с.9-11.
- Мужно Д.А., Череповский А.В. Использование глобальных навигационных спутниковых систем в полевой геофизике // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 2012, с.47-50.
- Смирнов В.Н., Бондарев Е.Б. Современное состояние, возможности и недостатки комплекса вибросейс Nomad по сравнению с взрывным источником сейсмических колебаний в зимних условиях ЯНАО. // Технологии сейсморазведки, № 2, 2017, с. 108–122.
- Череповский А.В. Сейсморазведка с одиночными приемниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съемок // Тверь, ООО

«Издательство ГЕРС». 2012. – 134 с.

Череповский А.В., Мужно Д.А. Оправдан ли переход на бескабельные системы регистрации? // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 2, 2011, с.16-20.

Череповский А.В., Овчинников В.А. Повышение качества сейсмических данных и снижение рисков травматизма путем автоматизации и роботизации полевых работ // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 2, 2019, с.26-31.

Шехтман Г.А., Жуков А.П., Харисов Р.Г. Способ вибрационной сейсморазведки // Патент РФ № 2627549 от 02.11.2016, опубл. 08.08.2017, Бюл № 22.

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современные технологии возбуждения сейсмических волн. // Приборы и системы разведочной геофизики 3(45), 2013, с. 6-22.

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современное состояние вибрационной сейсморазведки. Обзор методик. // Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 2015, с.11-18.

Ahmad K., Manning T., Dvorak M., Bradley J. The impact of ISS(R) blending on amplitude fidelity for AVO analysis. // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, London, UK, 10-13 June 2013.

Allen K.P., Johnson M.L., May J.S. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998, p. 140-143.

Andersen K.D. Method for cascading sweeps for a seismic vibrator. // US Patent №5,410,517 (Apr. 25, 1995).

Bagaini C. Acquisition and processing of simultaneous vibroseis data. // Geophysical Prospecting, vol. 58, pp. 81–99, - 2010.

Bagaini C., Daly M., Moore I. The acquisition and processing of dithered slip-sweep vibroseis data. // Geophysical Prospecting, 2012, 60, 618–639.

Batting E., Schijns H., Grant M., Millar N.

High-productivity, high-resolution 3D seismic surveys for open-cut coal operations. // ASEG Extended Abstracts, 2019:1, 1-4.

Benabentos M., Ortigosa F., Moldoveanu N., Munoz P. Cascaded sweeps – a method to improve vibroseis acquisition efficiency: a field test. // 9th Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas, 2006.

Berkhout G., Blacquiére G. Effect of noise in blending and deblending. // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 94-98.

Berkhout G., Blacquiére G. Blended Acquisition with Dispersed Source Arrays, the Next Step in Seismic Acquisition? // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 16-19.

Bilsby P., Clark A., Busanello G., Jackson Z., Alexander G. Innovative simultaneous source separation of high-density land data – a case study from Prudhoe Bay, Alaska. // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition 2021, Volume 2021, p.1–5.

Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition. // Geophysical Prospecting, vol. 58, pp. 123–153, 2010.

Dean T., Iranpour K., Clark M., Poole A. Dithered sweep length – a new technique for attenuating harmonic noise in vibroseis data. // 78th EAGE Conference & Exhibition 2016, Vienna, Austria, 30 May–2 June 2016.

Dean T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys. // Geophysical Prospecting, 2014, vol. 62, pp. 50–74.

Deluchi I., Marchall R. and Werner H. 3-D seismic survey of the Gaggiano Oil Field with quaternary encoding dual-source Vibroseis technique // Expanded Abstracts, Technical Program SEG, 1987, S8.2, 570-573.

Dong L.Q., M.G. Zhang, C.H. Wang, Y.M. Zhang, Y. Zhu. Blended noise suppression using a hybrid median filter, normal moveout and complex curvelet transform approach. // 80th EAGE Conference & Exhibition 2018, 11-14 June 2018, Copenhagen, Denmark.

Dvorak M., Tough K., Eller M. Smith M. Imaging a mature oil field using simultaneous source technology – the processing of the Iraq Rumalia ISSN Survey. // 76th EAGE Conference & Exhibition 2014, Amsterdam RAI, The Netherlands, 16-19 June 2014.

Goupillaud P.L. Signal design in the “vibroseis” technique. // *Geophysics*, vol.41, №6, 1976, p. 1291-1304.

Hampson G., Stefani J., Herkenhof F. Acquisition using simultaneous sources. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008, 2816-2820.

Howe D., Allen T., Dvorak M., Buddery D., Foster M., Manning T., Pfister M. High productivity cable less acquisition in Libya with the ISSN technique – from field trial to a production survey. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, London, UK, 10-13 June 2013.

Howe D., Foster M., Allen T., Taylor B, Jack I. Independent Simultaneous Sweeping -a method to increase the productivity of land seismic crews. // SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2826-2830, 2008.

Huo S., Tsingas C., Kelamis P., Xu H., Pecholcs P. Debending in the simultaneous source data – is it necessary? // 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, Vienna, Austria, 23-26 May 2011.

Ibrahim A., Sacchi M. D. Fast simultaneous seismic source separation using Stolt migration and demigration operators. // *Geophysics*, vol. 80, 6, p.1-17, 2015.

Ishiyama T., Wei T. Blended acquisition with temporally signatored/modulated and spatially dispersed source array: productivity enhancement in a pilot survey. // Conference Proceedings, 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition 2021, Netherlands, Amsterdam.

Liu Yi, Qi Yongfei, Tao Longshu, E Dianliang, Hou Chengfu. Application and effect analysis of Dynamic Slip Sweep in a high channel and high productivity seismic acquisition project. // CPS/SEG Beijing 2014 International Geophysical Conference, p. 163 – 166.

Mahdad A., Doulgeris P., Blacquièrre G., Campman X. Separation of blended sources – application to land seismic data. // 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, Vienna, Austria, 23-26 May 2011.

McCarthy D., Berhaud A., Mahrooqi S., Henin G., Shorter J. The benefits of simultaneous shooting on land for improved productivity and enhanced data quality through dense source sampling. // 79th EAGE Conference & Exhibition 2017, Paris, France, 12-15 June 2017.

Moldoveanu N., Jones P., Totten S., Rosso R. Vibroseis simultaneous shooting using encoded sweeps: a field experiment. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017, 146-150.

Moldoveanu N., Tite G. High Fidelity Vibratory Seismic in a Difficult Geologic Area. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999.

Nakayama S., Blacquièrre G., Ishiyama T., Ishikawa S. Blended-acquisition design of irregular geometries towards faster, cheaper, safer and better seismic surveying. *Geophysical Prospecting*, 2019, vol. 67, pp. 1498–1521.

Rietsch E. Reduction of harmonic distortion in vibratory source records. // *Geophysical Prospecting* 29, 1981, 178–188.

Rozemond J. H. Slip-sweep acquisition. // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1996, 64-67.

Scholtz P. Broadband pseudo-random vibratory sweeps for productivity enhancement. // EAGE Workshop on Land and Ocean Bottom - Broadband Full Azimuth Seismic Surveys, Apr 2014, Volume 2014, p.1–3.

Shipilova E., Barret M., Bloch M., Boelle J.-L., Collette J.-L. Simultaneous seismic sources separation based on Matrioshka Orthogonal Matching Pursuit, application in oil and gas exploration. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, 2020, p. 1-18.

Song J., Li P., Wang W., Qian Z., Sun P., Xue

H. Separating Highly-Blended 3D Land Data by Sparse Inversion. // 81st EAGE Conference and Exhibition, 2019, Volume 2019, p.1–5.

Stewart R.R., Chang Li., Sudarshan S. K.V., Becker A.T., Huang Li An unmanned aerial vehicle with vibration sensing ability (seismic dron)//SEG International Exposition and 86th Annual Meeting, Dallas, 18-21 October 2016.

Stone J., Taylor B. BP's (ISSTM) Technique for High Quality, Fast, Efficient 3D Vibroseis Acquisition in Challenging Desert Terrain. // Developments in Land Seismic Acquisition for Exploration, 2010, p. 1-5.

Tang Z., Campman X. A Coherent Simultaneous Shooting Scheme and its Source Separation. // 78th EAGE Conference & Exhibition, 2016, Volume 2016, p.1–5.

Xia J., Geier N.A., Miller R.D., Tapie C.R. Orthogonal vibroseis sweeps. // Geophysical Prospecting, 2005, 53, p. 677–688.

Wapenaar K., Joost van der Neut, Thorbecke J. On the relation between seismic interferometry and the simultaneous-source method. // Geophysical Prospecting, 2012, 802–823.

Zhao Jie, Jin Hengjie, Zhu Yang, Yasin Charles, Clow Forbes. Vibroseis Ultra High Productivity blended Acquisition: Field Trial and Full Scale implementation in Oman. // SEG Global Meeting Abstracts, 2018, 150-153.

Zhukov A., Korotkov I., Sidenko E., Nekrasov I., Gridin P., Galikeev T. Simultaneous pseudo-random shuffle sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. // SEG Annual Meeting. Houston. – 2017.

Подробнее об авторах



Жуков
Александр Петрович

Генеральный директор
ООО «Геофизические
Системы Данных»,
г. Москва. Доктор
технических наук,
профессор.



Скирта
Дмитрий Андреевич

Аспирант кафедры
сейсмометрии
и геоакустики
Московского
государственного
университета
им М.В.Ломоносова.



Шехтман
Григорий Аронович

Ведущий научный
сотрудник
ООО «НПП
«Спецгеофизика»»,
г. Москва
Доктор технических
наук.

Контроль качества сейсмических высокоплотных исследований при высокой производительности работ

■ Закариев Ю.М., Грибов Э.Н., Дрибинский И.В., Марутян В.Г.,
Рябошапка С.М., НПЦ «ГеоСейсКонтроль», г. Москва.

В России по разным, в т.ч. объективным причинам, плотность наблюдений и производительность сейсмических работ ниже относительно достигнутых соответствующих показателей за рубежом, особенно в пустынных регионах планеты и на севере Канады.

Но следует отметить, что в последние годы в России производительность от 1000 до 3000 вибросейсмических наблюдений в сутки за полярным кругом в Тюменской области уже не является пределом.

На рисунке 1 приведен фактический отстрел с использованием виброисточников с одной из площадей в Западной Сибири. Стоит отметить заложенную в план производительность 1300-1500 фн. При этом максимальная фактическая производительность превышала 2400 физических наблюдений в сутки.

Составляющие высокой производительности хорошо известны исполнителям сейсморазведочных работ: напряжённая слаженная работа коллектива партии, высокой культуры производства

с соблюдением требований технического задания и надежная работа геофизического оборудования.

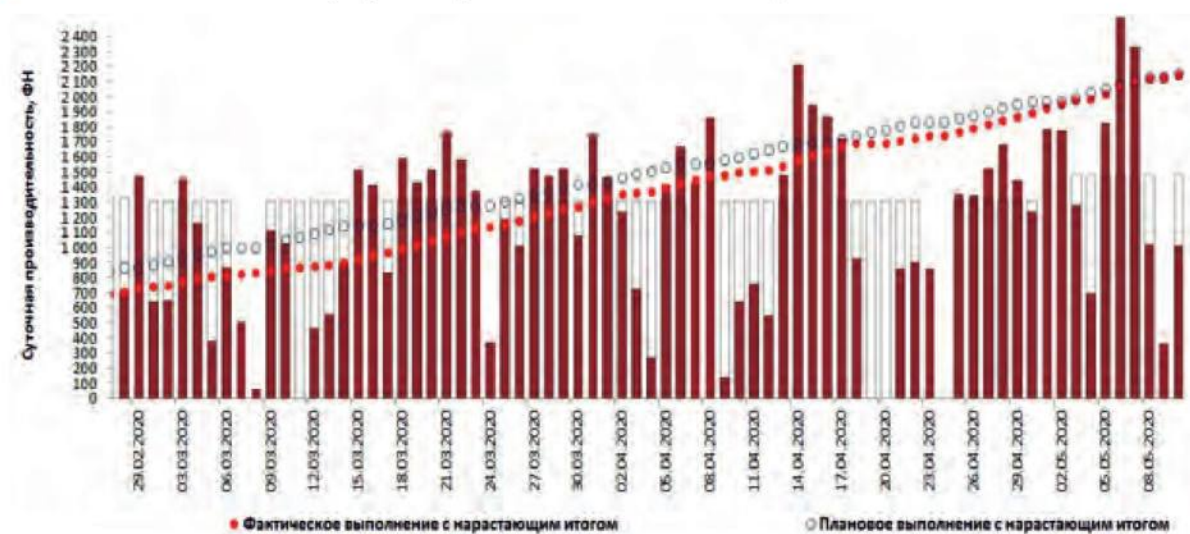
Для упрощения рассмотрения попробуем разобраться, в чём заключаются проблемы высокой производительности на примере работ с вибросейсмической технологией, как более производительной по отношению к взрывной.

Возможность проведения полевых сейсмических исследований высокой производительности начинает закладываться с этапа проектирования. Серьезное изучение требований заказчика, формализованных Проектом позволяет понять, возможно ли предстоящие работы провести с высокой производительностью или нет.

Основные элементы проекта, влияющие на высокую производительность:

- полнота и актуальность представленной сейсмогеологической характеристики района работ, волновая картина и возможные факторы, влияющие на качество сейсмической информации;

▼ Рис. 1. Фактический график отработки одной из площадей сезона 2020 года.



- обоснованность методики производственных работ исходя из геологических задач Заказчика;
- система наблюдения и возможность её отработки без пропусков и изменений;
- программа опытных работ;
- препятствия, осложняющие высокопроизводительную «конвейерную» работу;
- априорная топо-геодезическая информация, наличие рекогносцировки площади: сведения по техногенной инфраструктуре, сельхоз- и лесо-угодьям, гидрографии, возможной ледовой ситуации на акваториях;
- вспомогательные геофизические исследования – ВЛС, МСК, МПВ и др.;
- соответствие возможностей геофизической аппаратуры требованиям предлагаемой методики работ.

Немаловажным фактором этапа проектирования являются сроки проведения конкурса (тендера) среди потенциальных исполнителей. Если он проведен в первой половине года, то у Исполнителя достаточно времени (май - июнь) на проработку и подготовку проекта, позволяющие снизить возможные риски.

Вовремя заключенный контракт и вовремя составленный проект позволяют начать следующий этап – организационный. Именно в этом главный залог высокой производительности сейсмических исследований. Своевременное начало - это мобилизация, геодезические работы, рубка, подготовка аппаратуры, оборудования, техники, жилья, обеспечение запасными частями, расходными материалами, спецодеждой и т.д. Важнейшее слагаемое успеха – комплектование партии профессиональными специалистами – чем раньше начинается проект, тем больше шансов у исполнителя найти хороших специалистов.

К сожалению, существует немало примеров подведения итогов тендеров в сроки, близкие к началу полевого сезона.

При качественно проработанном проекте, своевременно проведенном этапе организации, специалистам партии и супервайзерам остаётся только контролировать реализацию планов. По возможности, оптимизируя технологию производственного процесса для более производительной работы без ущерба для качества получаемой информации.

Слагаемые высокой производительности.

Определяющим фактором получения качественного полевого материала является тщательное выполнение коллективом партии под контролем главных специалистов партии и супервайзеров, утверждённой Заказчиком программы опытных работ, в результате выполнения которой выбираются оптимальные параметры регистрации полевых наблюдений – «Задание на регистрацию».

Контроль качества полевых исследований при неукоснительном соблюдении требований «Задания на регистрацию» проводится специалистами партии и представителями Заказчика – супервайзерами по контролю качества сейсмических исследований.

При высокопроизводительной сейсморазведке специфика работы коллектива партии – это круглосуточная сменная работа вибросейсмических отрядов (при взрывной технологии – нескольких бригад взрывников), операторов на сейсмостанции, состоящая из:

- вечернего ежедневного планирования работы на следующий день, подготовка данных руководством партии для составления сводки Заказчику о выполненных работах за сутки;

- выезд бригад на площадь (геодезистов, сейсморабочих, машинистов вибраторов);

- утренняя подготовка полевого материала к приёмке геофизиком-обработчиком партии и приёмка качества отработанного материала за сутки;

- выезд специалистов партии на контроль качества установки сейсмического оборудования, работы геодезических и вибросейсмических бригад, операторов сейсмостанции.

Супервайзер по контролю качества сейсмических исследований обязательно:

- участвует в ежедневном планировании работ,

- получает от Исполнителя данные для сводки Заказчику,

- ведёт приёмку качества полевого материала,

- проводит полевой контроль качества установки сейсмического оборудования, работы геодезических и вибросейсмических бригад, операторов сейсмостанции,

- контролирует ремонт сейсмического оборудования (аппаратуры) и его тестирование.

Данные пункты, кроме «приёмки качества полевого материала», понятны специалистам-практикам, имеющим за выполнения сейсмических полевых

работ, и особого разбирательства не требуют. Однако, уделять им необходимо не меньше внимания, чем приёмке получаемых материалов.

Оценка качества материала

Главная задача супервайзера - приёмка качества полевого материала. И в России этот процесс в корне отличается от работы супервайзера на высокопроизводительных партиях зарубежья. Примерный график работы супервайзера представлен на рисунке 2.

Качество полевого материала контролируется супервайзером совместно с партийным геофизиком. Просматриваются тесты, присваивается геометрия, рассчитываются атрибуты, просматривается весь массив сейсмограмм, представленных к приёмке.

Как правило, геофизик только просматривает полевые тесты и отчёты по работе взрывных и невзрывных источников, проверяет геометрию и отбраковывает явные некондиционные сейсмограммы. Более углублённый анализ, как правило, проводит супервайзер.

Львиную долю времени занимает просмотр сейсмограмм. С увеличением активной расстановки увеличивается и время просмотра. Но и время на анализ тестов тоже увеличивается.

Требования к контролю со стороны

▼ Рис. 2. Примерный временной график проведения приёмки материала.



заказчиков возросли и простого просмотра тестов в “блокноте” уже недостаточно. Производители геофизического оборудования многие параметры, помимо текстовых отчетов, дублируют в заголовки сейсмических файлов или иные служебные файлы. И заказчик требует контроля отчётных параметров именно в этих файлах справедливо полагая, что данные цифры нельзя или трудно сфальсифицировать. Тем более, что к контролю информации в заголовках трасс можно вернуться и на этапе обработки и даже интерпретации.

Однако, эти данные часто представлены в разрозненном виде, а их быстрое сопоставление и анализ просто невозможен. Требуется обработка (сортировка, удаление лишнего, выборка, суммирование, осреднение), что, в свою очередь, требует некоторых дополнительных знаний, и не всегда временные затраты на обработку, анализ сопоставимы со временем, выделяемым на приёмку. Супервайзерами используются аналитические функции табличных редакторов и средства анализа БД типа MS Access. В программах контроля качества, например, как Пикеза-4 также появились функции чтения и некоторого анализа заголовков.

Время на обработку тестов практически одинаково что для десятка физ. наблюдений, что для тысячи. И чем удобнее представлены отчётные данные, тем быстрее проходит их анализ. При увеличении производительности, то есть увеличении количества физических наблюдений за смену или день, на первый план выступает анализ работы аппаратуры и оборудования и во вторую очередь уже осуществляется волновой анализ сейсмограмм.

В России базовым представлением определения качества сейсмограммы (в

т.ч. и на высокопроизводительных сейсмических исследованиях) является «оконная» оценка, представляющая собой следующее: сейсмограмма должна подвергаться анализу (в т.ч. программному, помимо визуального) с целью определения параметров (атрибутов) её записи (в «окнах» помех и полезного сигнала) в соответствии утверждённого «Задания на регистрацию» и «Требований к сейсмической записи и критериев приёмки полевых наблюдений» Заказчика.

К основным аппаратным параметрам сейсмограммы (представляются к началу приёмки в табличной форме на все принимаемые наблюдения) относятся следующие показатели:

- энергия микросейсм, определяемая до первых вступлений;
- энергия сигнала отражений в целевом интервале времени записи;
- достаточность энергии отражений - отношение средних, абсолютных амплитуд сигнал/микросейсм - A_c/A_m ;
- доминантная частота;
- энергия волн-помех, в т.ч. поверхностных.

К приёмке готовятся таблицы SPS-файлов и качества отработки вибраторами каждого ПВ (так называемые, VAP-сы).

Процесс визуального анализа сейсмограмм (на экране компьютера, например, 2500 ф.н.) и параметров всех перечисленных таблиц (подготавливаемых геофизиками Исполнителя) занимает от 5 до 8 часов рабочего времени специалистов партии и супервайзеров в зависимости от объёма отработанных наблюдений.

У супервайзера практически не остаётся времени на полевой контроль работы геодезических, сейсмических и вибро-сейсмических бригад. То есть на его

обязанности по остальным, вышеперечисленным четырём пунктам.

Полная автоматизация процесса оценки качества сейсмограмм пока не поддерживается Заказчиками в России, при том, что программы для такой приёмки существуют (например, на тех же обрабатывающих ВЦ, имеющих современное ПО контроля качества).

Иная парадигма принципов работы супервайзера

В отличие от процесса полевой приёмки сейсмического материала в России, за рубежом на высокопроизводительных объектах применяется автоматизированная оценка качества наблюдений. Информация отработанного наблюдения (сейсмограммы, качество отработки вибратором ПВ, SPS-файлы) передаётся по соответствующему каналу связи на обрабатывающий ВЦ, с которого практически в реальном времени возвращается автоматизированная оценка качества наблюдения.

Для внедрения автоматизированной оценки качества наблюдения в партии необходимо иметь не только соответствующее программное обеспечение для обработки сейсмограммы в реальном времени, но и полевой ВЦ. Или же необходим соответствующий канал связи между партией и стационарным ВЦ. Для такого решения, по всей видимости, нужно будет пересмотреть подход к оценке качества сейсмического материала.

В том числе, пересмотр относится и применению оконной оценки качества. Так как, в случае получения сейсмограмм при высокопроизводительной высокоплотной съёмке с одиночными сейсмореприемниками, применение оконных оценок может оказаться неактуальным. Одна из причин заключается в том, что

оценки в области полезных отражений зачастую характеризуют лишь регулярные помехи и микросейсмь, с амплитудами выше полезных отражений, а по частотным характеристикам искажающим реальную картину в связи с наложением указанных помех на полезный сигнал.

Отход от традиционных принципов приёмки физнаблюдений и разработка новых должны производиться совместно с пересмотром и разработкой принципов, условий и стоимости выполнения сейсмических исследований.

Оконная оценка качества наблюдений на этапе внедрения МОГТ имела особое значение, так как резкое повышение производительности по отношению к МОВ приводило к нарушению технологии (культуры производства) сейсморазведочных работ и соответственно качества полевого материала, которое требовалось отслеживать с помощью технических средств для определения брака и его переотработки. Но на современном уровне проведения высокоплотных и высокопроизводительных сейсморазведочных исследований такая технология оценки качества наблюдения стала терять актуальность.

С целью поддержки объективности вышеизложенного имеет смысл привести выдержку из 39-го номера за 2021 г. журнала First Break, в котором, в частности, говорится:

На протяжении всей истории сейсморазведки, развитие систем наблюдений, дизайнов съёмок, методики наблюдений, сложных алгоритмов обработки и мощных вычислительных комплексов – все это способствовало существенному изменению качества отображения разрезов и этот процесс продолжается. Однако мы не можем отрицать тот факт, что резкие изменения



▲ Рис. 3. Увеличение количества трасс на 1 кв.км с начала сейсморазведки.

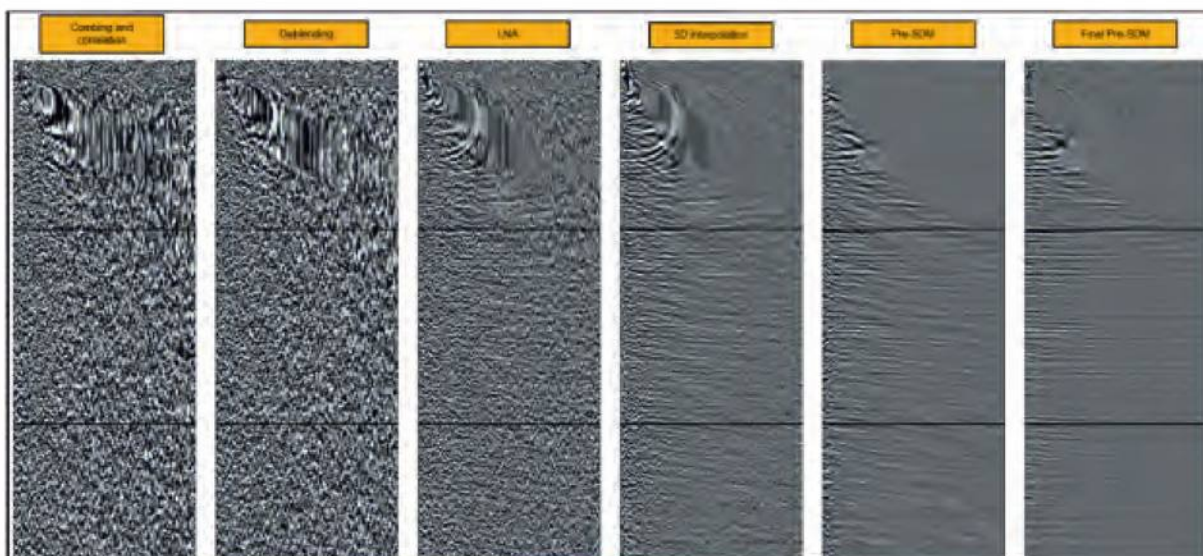
качества данных происходили тогда, когда количество измерений на единицу (площади или плотность съемки) существенно изменялась от этапа к этапу (Рис.3).

Этот фактор, который для нас означает плотность трасс, очень хорошо коррелируется с качеством данных, будь то простой суммарный разрез, сложные AVO анализы и атрибуты. Как правило, чем сложнее требуемые атрибуты, тем большая плотность съемки необходима.

Технология одновременно работающих источников в настоящее время

широко признана как в морской сейсморазведке, так и в наземной вибросейсморазведке как одна из основных инноваций, позволяющих повысить плотность съемки. Это пример предпочтения количества измерений качеству отдельных записей сейсмограмм, основанное на факте, что преимущества увеличения плотности наблюдений превосходят потенциальное понижение качества, связанное с интерференцией от одновременно работающих источников. Та же логика применима к приемникам, когда большие группы сейсμοприемников с легендарно высо-

▼ Рис. 4. Стадии обработки сейсмограмм ОГТ, обычный граф обработки PSDM.



ким отношением сигнал/шум дают трассу (часто с искаженными полезными сигналами) в конечном счете уступают большому количеству одиночных приборов. Несмотря на то, что одиночный прибор дает более шумную трассу по сравнению с группой, одиночные дают гораздо более правдоподобную картину волнового поля и предоставляют гораздо более разрешенные суммарные разрезы на конечных стадиях обработки в результате более детальной регистрации как полезного сигнала, так и шума (Рис.4). Огромный избыток информации и возможность обработки неискаженных данных также играют решающую роль в повышении качества данных.

Как видно из вышеприведенного рисунка, качество полученных сейсмограмм можно оценить только после соответствующей предобработки.

Заключение и выводы

В России есть отставание в плотности и высокой производительности сейсмических исследований, но при этом очевидно, что хоть и медленно, но плотность и производительность сейсморазведки растёт.

Видно и нам в РФ не избежать процесса перехода к высокоплотным и высокопроизводительным работам в сейсморазведке, в котором одним из важнейших факторов производства является скорость отработки объектов. В связи с этим Заказчикам сейсмических исследований и Исполнителям сейсморазведочных работ необходимо осмыслить многие аспекты, связанные с процессом перехода на высокоплотные, широкоазимутальные и высокопроизводительные работы, в том числе, процесс оценки качества полевых данных.

Обзор систем стабилизации и контроля кварцевых генераторов в современной донной сейсморазведке

- Казанин А.Г., Базилевич С.О., Зимовский А.В., Куома Д.Г., АО «МАГЭ», г. Москва
- Зиборов А.В., Долотказин И.Н., Кошелев Е.А., ООО «МТЦ», г. Санкт-Петербург
- Ерофеев Ю.Г., ООО «Моргеокомплекс», г. Мурманск

Автономность любого регистрирующего оборудования от информационного поля глобального времени, при записи условного события, всегда требует точной привязки данного события к метке времени для его дальнейшего воспроизведения. Чем более длительна и прерывиста автономная работа регистратора, тем стабильнее должны быть его внутренние часы. Роль таких часов в донной сейсморазведке выполняет генератор частоты каждого донного регистратора, от стабильности и точности которого, зависит работоспособность всего сейсмического комплекса. В настоящей статье рассматриваются перспективные направления стабилизации кварцевых часов регистраторов донных станций, аппаратных и программных алгоритмов контроля и коррекции частоты (ОСХО) кварцевых генераторов, а также времени сейсмической записи, на примере развития инновационного комплекса донной сейсморазведки «Краб».

Введение

Непрерывная сейсмическая запись, полученная с донной сейсморазведочной станции, в многоволновой сейсморазведке на акватории также как и с буксируемой косой имеет отметки начала и конца регистрации, но с одним существенным отличием - время начала записи в донном регистраторе не имеет прямой синхронизации с глобальным временем GPS (обычно UTC), так как донная станция в момент регистрации находится под водой [4]. Это означает что, каждая отметка времени включает в себя разницу между GPS временем и временем часов каждой станции (dt). При нормальных условиях работы генератора частоты или осциллятора для каждой последующей записи, dt будет линейно возрастать или отклоняться от времени GPS, данный эффект называется линейным дрейфом времени осциллятора. При единовременном поднятии со дна нескольких тысяч станций и последующей второй синхронизации времени часов станций с глобальным временем GPS, для каждой станции и отметки

времени начала записи (t_0) вводится поправка, полученная интерполяцией значений на полном временном интервале регистрации ($t_{start} - t_{end}$, первая - вторая синхронизации), которая позволяет привязать t_0 каждой сейсмической трассы к спутниковому эталону времени GPS [5]. В не модельных условиях после ввода такой поправки на сейсмической записи остаются остаточные смещения, состоящие из наложения собственного шума кристалла генератора и нелинейных отклонений времени $f_s(dt)$, которые зависят от целого ряда временных и конструктивных факторов. Если величина отклонений превышает половину шага дискретизации сейсмической записи тогда при накоплении ошибки и округлении, например в большую сторону, происходит смещение времени регистрации что может привести к фазовому сдвигу на сейсмической записи и искажению геологической информации. В действительности, при выполнении сейсмической съёмки 3D-4C с использованием часов донных станций на основе термостатированного кварцевого гене-

патора (ОСХО - Oven Controlled Crystal Oscillator) [2], максимальным временем жизни приемной расстановки из 3000 донных станций 2 месяца и дискретизацией записи 2 мс, линейный дрейф времени кристалла генератора не превышает $0.192 \cdot 10^{-10}$, то такая система времени считается стабильной и не требует коррекции [3]. Если значительный линейный дрейф времени можно скомпенсировать простой интерполяцией, то нелинейные отклонения частоты кристаллов требуют новых технических решений и использования математических алгоритмов. Причиной нелинейного дрейфа частоты для пьезоэлектрических осцилляторов является естественный процесс остаточного старения кристалла, огранка кристалла, его качество и чистота, влажность, радиация и даже гравитация. Гравитационная перегрузка также может навсегда изменить частоту генератора. Главной проблемой для осцилляторов остается изменение температуры, вызванное нестабильностью источника питания кристалла.

Как показывает опыт работ с донными станциями и глубоководными донными сейсмометрами большинство типов часов только с термостабилизацией кварца и схемой управления питанием, не подходят для получения кондиционных сейсмических материалов в случае привязки пунктов наблюдения к точным координатам, а не отработки пикетов сейсмического профиля по равным интервалам времени [1].

Общие тенденции развития алгоритмов контроля кварцевых генераторов в донной сейсморазведке

С начала 80-х годов прошлого столетия кварцевые генераторы с температурной компенсацией дрейфа пьезоэлектрических кристаллов (ТСХО-Temperature

Compensated Crystal Oscillator) активно использовались для морских сейсморазведочных работ КМПВ. Производители донных сейсмометров, увеличивая кратковременную стабильность частоты кристаллов (дисперсия Алана) с $3 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-8}$, и повышая точность до $1 \cdot 10^{-7}$, столкнулись с проблемой невозможности получения истинных значений температуры на поверхности кристалла и как следствие корректной обратной связи для компенсации возникающего дрейфа времени. Причиной данной проблемы была не совершенность используемых материалов и существующие на тот момент ограничения технологии сварки кристаллов. (ТСХО)- термокомпенсированные кварцевые осцилляторы, температурный уход частоты которых, скомпенсирован встроенной схемой обратной связи. Такая схема позволяла производить кварцевые генераторы с температурной нестабильностью в пределах от 0.5 ppm до 10 ppm в широком диапазоне температур. Генераторы с системой термической коррекцией потребляли минимум энергии; однако ТСХО не смогли обеспечить приемлемо низкую ошибку времени для длительной регистрации донной станции [6]. Для стабилизации температурного градиента стали производить генераторы с микроконтроллерной компенсацией температурного ухода частоты (МСХО-Microprocessor Corrected Crystal). В этом случае частота генератора контролируется микропроцессором и может быть скорректирована по определенной программе, такие генераторы также имеют индекс С (ССХО-Coefficient Corrected Crystal Oscillator).

Отвечая запросам рынка сейсморазведки конца 80-х и начала 90-х годов постепенно увеличивалось количество донного оборудования и возрастала

кратность двумерных систем наблюдений. Появились новые пленочные материалы и прецизионные технологии сварки кристаллов кварца, улучшилась герметичность упаковки кристалла и базовой микросхемы. В это же время происходило развитие технологии производства генераторов с управляемым подогревом кристалла (ОСХО). В термостатированных генераторах (ОСХО) благодаря нагреву поверхности кристалла через плату контроллера, конструкторам удалось на порядки улучшить стабильность частоты. Такие кварцевые генераторы включают в себя схему подогрева и устанавливаются в специальный корпус, что позволяет поддерживать рабочую температуру генератора постоянной и получать высокую стабильность частоты, вплоть до $\pm 0.1 \text{ ppb}$. В большинстве случаев, у термостатированных генераторов есть функция частотной подстройки, либо управляющим напряжением, либо механически. Так большинство современных высоко стабилизированных осцилляторов с индексом ОСХО имеет температурный датчик и схему обратной связи (TCVCXO Temperature Compensated/Voltage Controlled) а также систему контроля напряжением в цепи питания основного генератора (OCVCXO Oven Controlled/Voltage Controlled Crystal Oscillator), где в качестве источника питания используется автогенератор.

Кварцевые генераторы в эпоху зарождения донной сейсморазведки, потребляли более одного ватта мощности и поэтому были не способны выдерживать длительные сейсморазведочные работы из-за ограничений энергоемкости и внутреннего источника питания (опорного генератора) без подзарядки. Им на смену, были разработаны новые ОСХОs со значительно более низким энергопотреблением, обычно менее двухсот

милливатт, которые способны обеспечить значительное улучшение производительности в отношении уменьшения временных ошибок и работы с низким энергопотреблением.

Следующим значительным шагом в развитии ОСХО осцилляторов стало появление устройств с получением pps сигнала (pulse per second) из записи при уже состоявшейся ранее синхронизации осциллятора с источником точного времени. В ноябре 1997 года успешно завершилась первая 95-дневная миссия на Марс лунохода Sojourner частично укомплектованного осцилляторами французского концерна Syrnix из линейки Ewos. Тогда эта миссия показала возможность стабильной работы в космосе относительно недорогих кварцевых часов (GPSDXO-GPS Disciplined Crystal Oscillator) и послужила началом новой эры в разработке программных алгоритмов коррекции кварцевых генераторов в режиме удержания (без доступа к точным отметкам времени). Современная версия SGTm16 Ewos оснащена компактной платой встроенного генератора, что позволяет копировать сигнал pps с точностью до наносекунды. Эта функция синхронизации является основой производительности донного оборудования и его погружения в течение периода от нескольких недель до нескольких месяцев. Оказавшись под водой, встроенный модуль Sgtn вычисляет прошедшее время и обеспечивает синхронизацию и замену временного участка на участок модели времени, имеющей аналогичные температурные условия и профиль старения из встроенной памяти. В конце сейсмической съемки производится повторная синхронизация с истинным GPS временем, и часовой дрейф полного времени регистрации измеряется заново. После обработки этих данных вре-

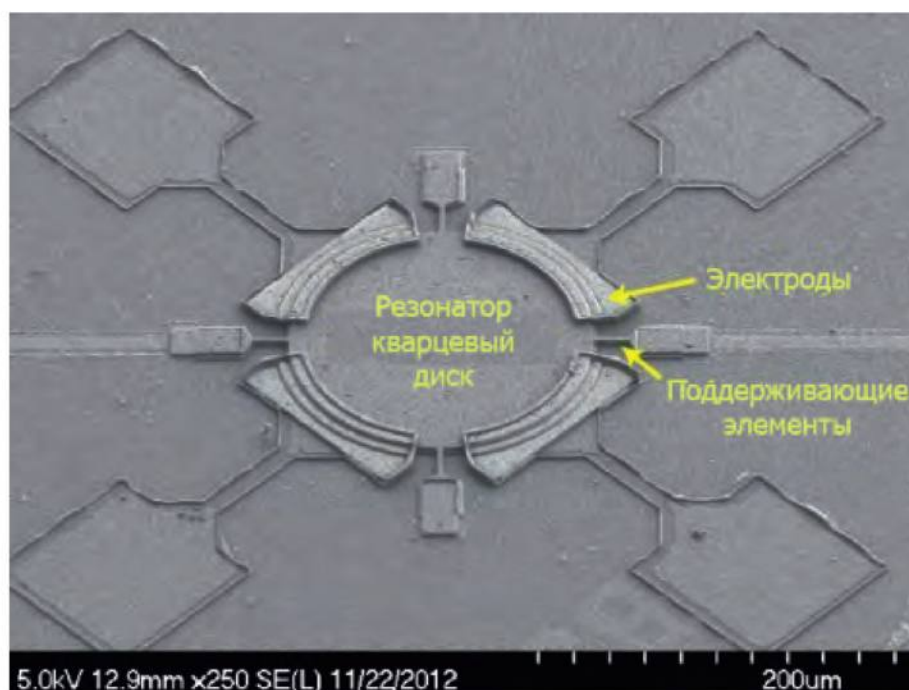


Рис. 1.
Микромеханическая
система осциллятора
типа Wine Glass
с использованием
кварцевого
актюатора.

менные дрейфы могут быть линейно или параболически скомпенсированы.

В 2005 году на рынке появились первые модели MEMS микромеханических осцилляторов, представляющих собой микромеханические машины, элементы которых вырезаны из пластин кремния или полимеров, а в качестве резонаторов могут быть использованы как микромеханика, так и газ или другие пластичные наполнители. Различают два основных типа MEMS осцилляторов:

1. Микромеханическое движение подвижного элемента системы преобразуется в электрический импульс;

2. MEMS система формирует электрический импульс с помощью подвижного актюатора, это могут быть зеркала для источников света, пьезоэлектрические элементы или сообщающиеся сосуды с мембранами для жидкости или инертного газа.

Тенденция к уменьшению MEMS-осцилляторов в совокупности с применением технологии печати микроэлектронных компонентов плат управления 90 нанометров и менее, открывает практи-

чески безграничные возможности по совершенствованию стабильности микромеханических систем. Например, MEMS-осцилляторы (1-125 МГц) 2006 года выпуска от компании SiTime имели размеры 2×2,5×0,85 мм. Резонаторы SiT 15xx (1-32 кГц, 2013 год) оказались на 85% меньше, в 15 раз надёжнее и на 50% экономичнее, чем кварцевые аналоги. Первый кремниевый МЭМС-резонатор, выполненный в пластмассовом корпусе SiT1052, позиционировался SiTime как заведомо бездефектный продукт. Наиболее перспективной принципиальной MEMS системой в плане реализации стабильности частоты и пригодности для донной сейсморазведки на данный момент времени является дисковая система типа Wine Glass с кварцевым ОСХО актюатором (рис.1).

Микромеханические осцилляторы имеют более сложную систему реализации, но пока их слабой стороной является значительный фазовый шум – джиттер, уступающий кварцевым осцилляторам. Тем не менее MEMS осцилляторы в 10-ки раз надёжнее и долговечнее кварцевых

систем и обладают колоссальным запасом прочности к перегрузкам. Стабильность MEMS осцилляторов растёт с каждым годом. На данный момент производителям удалось приблизиться к точности данных устройств до 2 ppm.

Беспрецедентной на данный момент времени остается стоимость MEMS осцилляторов что примерно в 100 раз меньше, чем у кварцевых и гибридных систем.

По мнению экспертов, MEMS-приборы

▼ Табл. 1. Сравнительные параметры осцилляторов .

	Кварцевые генераторы частоты и времени				Микромеханические кремневые генераторы	Атомные генераторы частоты и времени		
	ТСХО	МСХО	ОСХО	GNSS ОСХО (GPSDXO)	MEMS	Rubidium	RbXO	Cesium (CeXO)
Точность	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-11}$
Старение (в год)	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-11}$ ***	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-15}$
Температура стабилизация	$5 \cdot 10^{-7}$ (-55до+85)	$3 \cdot 10^{-8}$ (-55до+85)	$1 \cdot 10^{-9}$ (65до+85)	$5 \cdot 10^{-10}$ (-10до+45)	$1 \cdot 10^{-8}$ (-40до+105)	$3 \cdot 10^{-10}$ (-55до+68)	$5 \cdot 10^{-10}$ (55до+85)	$2 \cdot 10^{-11}$ (-28до+70)
Коротко временная стабильность	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	Возможна до $1 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-11}$
Размер (см ³)	10	30	20-200	5	0,1-20	200-800	500-1000	17-6000
Время прогрева	0.03 (до $1 \cdot 10^{-7}$)	0,03 (до $2 \cdot 10^{-8}$)	4 (до $1 \cdot 10^{-8}$)	4 (до $1 \cdot 10^{-8}$)	0.03 (до $1 \cdot 10^{-6}$)	3 (до $5 \cdot 10^{-10}$)	3 (до $5 \cdot 10^{-10}$)	20 (до $2 \cdot 10^{-11}$)
Потребляе мая энергия	0.04	0.04	0.09-0.6	0.105	0.14	2-20	0.4-0.65	0.15-0.30
Стоимость (\$США)	10-100	<1000	200-2000	2000-4000	1-200	2000-8000	<4000	<6000

***-Для MEMS генераторов с кварцевым актюатором.

способны вытеснить с рынка менее компактные и устойчивые к механическому шоку и вибрации, но более дорогие кварцевые осцилляторы. Благодаря разработке упаковки, совместимой с традиционной CMOS-архитектурой, новые MEMS-устройства активно приобретаются компаниями, замещая кварц кремнием в технологиях синхронизации.

Другие типы источников времени, такие как атомные часы с чип-шкалой (CSAC) активно начали применяться в донной сейсморазведке с 2008 года. CSAC способны значительно снизить временную ошибку, но все же потребляют в два-три раза больше энергии, чем последние версии кварцевых генераторов ОСХО, а также в несколько раз отличаются по стоимости.

В таблице №1 представлены сравнительные параметры ранее представленных осцилляторов.

Заключение

Термостатированный кварцевый осциллятор сегодня это отлаженная десятилетиями разработок и поиска инновационных решений, система генерации точных сигналов времени. Точность новых модификаций термостатированного кварцевого генератора ОСХО постепенно приближается к атомным часам и уже составляет $1 \cdot 10^{-10}$. В данной статье рассмотрена научно-техническая проблема, которая заключается в стабилизации и контроле кварцевых генераторов в современном донном сейсморазведочном оборудовании, а также показана история развития кварцевых генераторов в Российской Федерации. Подводя итог, можно сказать, что несмотря на интенсивное развитие и повышение стабильности новых MEMS осцилляторов, а также внедрение в отрасль более дорогих атомных цезие-

вых часов, термостатированный кварцевый осциллятор остается на сегодняшний день самым доступным и востребованным измерителем времени и синхронизатором тактовых сигналов для решения задач современной донной сейсморазведки.

Список литературы:

1. Бескаравайный Ю. М. Патент RU 2 607 414 C2. Автоматический контроль качества работы кварцевых генераторов, дублирование при сбоях, индикация, подавление высших гармоник сигнала. – 2017.
2. Казанин А.Г., Базилевич С. О., Куома Д. Г. и др. Инновационный цифровой сейсмический комплекс морской сейсморазведки "Краб". Разработка, внедрение и перспективы развития отечественных донных станций // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 12(253). – С. 28-35.
3. Лаверов Н. П. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. – 2011. – №. 4. – С. 4-13.
4. Левченко Д. Г. и др. Способ регистрации сейсмосигналов на акватории моря и устройство для его осуществления. – 2006.
5. Рей К. Х. и др. Способ и устройство для регистрации сейсмических данных. – 2011.
6. Самойлов К. Н., Альтшуллер Г. Б. Кварцевый генератор. – 2003.

- Ван Ж., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
- Жуков А.П., Калимулин Р. М., ООО «Геофизические Системы Данных», г. Москва

С 1950-х годов для проведения разведочных работ на нефть и газ в юго-западной части Каспийского бассейна применялись различные геофизические методы. По состоянию на 2009 год в Астраханской области насчитывается около 20 крупных разведанных месторождений нефти, газа и газоконденсата [2].

Ключевые слова: прикаспийская впадина, линейный, адаптивный, низкочастотный, широкополосный свип-сигнал, взрывное возбуждение.

Прикаспийская впадина

Центрально-Прикаспийская депрессия

Алибонко - Астраханская зона поднятий

Прикумско-Кавказский прогиб

Уралы

Структура чехла

Структура фундамента

Восточно-Прикаспийский блок

Стратиграфические комплексы

Центрально-Прикаспийский блок

0 50 100 150 км

Геологический разрез осадочного чехла Прикаспийского бассейна

Легенда:

- Ч-Ч - плейстоцен-четвертичный
- Р - палеогеновый
- К - меловой
- Т - юрский
- З - триасовый
- Р - верхнепермский
- В-В - нижнепермский (хемогенная соль)
- С-С - верхнекаменноугольный-нижнепермский
- С-С - среднекаменноугольный-верхнедевонский
- С-С - нижнекаменноугольный-верхнедевонский
- С-С - нижнекаменноугольный-верхнедевонский (хемогенная соль)
- С-С - кембрийско-среднедевонский
- Р - рифейский
- Р-В - среднепротерозойский
- Р-В - архейско-протерозойский
- Р-В - разломы
- Р-В - границы стратиграфических комплексов

Участок исследования расположен в Каспийском бассейне, на западном борту Актюбинско-Астраханской зоны поднятий и на левом берегу реки Волги. Конкретное местоположение показано красной стрелкой на рис. 1.

Геолого-геофизическая изученность

Поисково-разведочные работы на нефть и газ в Астраханской области начали проводить еще с 40-х годов прошлого столетия. Но начало планомерным геолого-геофизическим исследованиям юго-западной части Прикаспийской впадины было положено в начале 50-х годов.

С 1968 года в пределах Астраханского выступа Астраханской геофизической экспедицией начали проводиться сейсморазведочные работы МОВ, а с 1973 года – МОГТ с использованием сейсмостанции «Прогресс». В августе 1976 года в разведочной скважине 5-Астраханская, находящейся в шести километрах северо-восточнее ст. Досанг, был получен первый промышленный фонтан газа с конденсатом из башкирских отложений среднего карбона, ознаменовавший открытие крупного газоконденсатного месторождения в Астраханской области. Газоносный горизонт здесь залегает на глубине 3900–4100 м, дебит газа достигает 400 тыс. кубометров в сутки. Большой своей частью (около 65%) месторождение расположено на левобережье рек Волга и Ахтуба. Остальная территория месторождения находится в пойме указанных рек и на правобережье [3].

С целью уточнения особенностей геологического строения подсолевых отложений, прогноза пространственного положения предполагаемых залежей и выработки рекомендаций по точкам заложения поисково-разведочных скважин на территории левобережного участка Астраханского свода в 2017 году

Оренбургской геофизической экспедицией были выполнены сейсморазведочные работы 2D МОГТ.

Позднее были проведены опытно-методические работы, результаты которых рассматриваются в данной статье.

Параметры съёмки 2D для взрывных и вибрационных данных

Параметры методики для взрывных и вибрационных данных приведены в табл. 1 и табл. 2.

Для взрывных данных, вес заряда взрывного источника 0.8–2.0 Кг, шаг ПВ 60 метров, шаг ПП 30 метров, 240 каналов в активной расстановке, максимальная кратность 60, длина записи 18 секунд. Профиль был отработан с применением

▼ Табл. 1. Параметры съёмки 2D для взрывных данных.

Вид работ	МОГТ 2D
Шаг ПВ, м	60
Шаг ПП, м	30
Кол-во каналов в активной расстановке	240
Мин. и максимальное удаление ПВ-ПП, м	30 и 7200
Максимальная кратность	60
Способ возбуждения сейсмических колебаний	Взрывной
Глубина заложения заряда, м	23
Вес заряда, кг	0.8 – 2.0
Тип сейсмоприемников	GS-20DX
Кол-во сейсмоприемников в группе	12
Вид группирования	линейный
База группирования приемников, м	30
Тип сейсмостанции	Прогресс-Т2
Шаг дискретизации, мс	2
Длина записи, с	18
Формат записи	SEG-D

Вид работ	МОГТ 2D			
Шаг ПВ, м	60			
Шаг ПП, м	30			
Кол-во каналов в активной расстановке	240			
Мин. и максимальное удаление ПВ-ПП, м	30 и 7230			
Максимальная кратность	61			
Способ возбуждения сейсмических колебаний	Вибрационный			
Тип вибрационных источников	Nomad 65			
Система управления вибрационными источниками	GDS-II			
Кол-во источников в группе	4			
База группирования источников, м	36			
Усилие воздействия, %	60			
Тип свип-сигнала	линейный	адаптивный	низкочастотный	широкополосный
Начальная частота, Гц	6	8	3	3
Граничная частота, Гц	-	-	6	6
Конечная частота, Гц	100	96	96	96
Параметр нелинейности, дБ/Гц, %	-	15 %	-	0.1 дБ/Гц
Длина свип-сигнала, с	12	12	16	16
Конус, с	0.75 / 0.5	0.5 / 0.5	1.0 / 0.5	1.0 / 0.5
Кол-во накоплений	4	1+4	4	4
Тип сейсмоприемников	GS-20DX			
Кол-во сейсмоприемников в группе	12			
Вид группирования	линейный			
База группирования приемников, м	25			
Тип сейсмостанции	Sercel 428 XL			
Шаг дискретизации, мс	2			
Длина записи, с	6			
Формат записи	SEG-D			
Объем работ	1625 ф.н. (5 * 285 ф.н. + 2 * 100 ф.н.)			

▲ Табл. 2. Параметры съёмки 2D для вибрационных данных.

взрывного возбуждения полевой партией Астраханской геофизической экспедиции.

Этот же профиль был повторен полевой вибрационной партией АО «ТНГ-ГРУПП» практически с теми же параметрами расстановки. Для вибрационных данных, шаг ПВ 60 метров, шаг ПП 30 метров, 240 каналов в активной расстановке, максимальная кратность 61, длина запись 6 секунд и количество накоплений 4.

Возбуждались пять типов вибрационных сигналов, параметры которых представлены ниже.

Линейный свип-сигнал (ЛЧМ-сигнал)

Диапазон частот сигнала составляет 6-100 Гц, частота сигнала увеличивается линейно, длина сигнала составляет 12 секунд, конусы в начале и в конце сигнала составляют 0.75/0.5 секунды соответственно (рис.2).

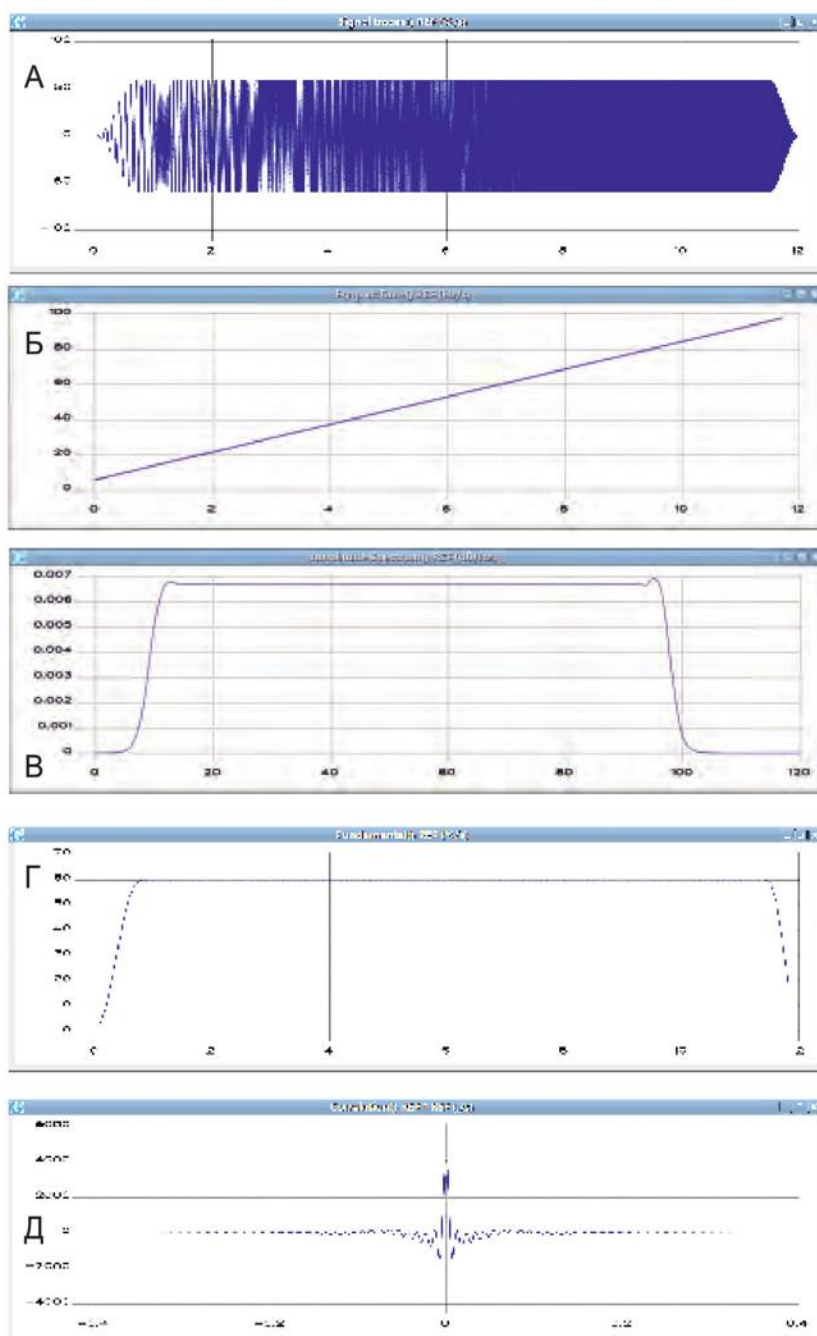


Рис. 2.
а) Линейный свип-сигнал
б) Мгновенная частота линейного сигнала
в) Спектр линейного сигнала
г) Мгновенная амплитуда линейного сигнала
д) Автокорреляционная функция линейного сигнала.

Адаптивный свип-сигнал

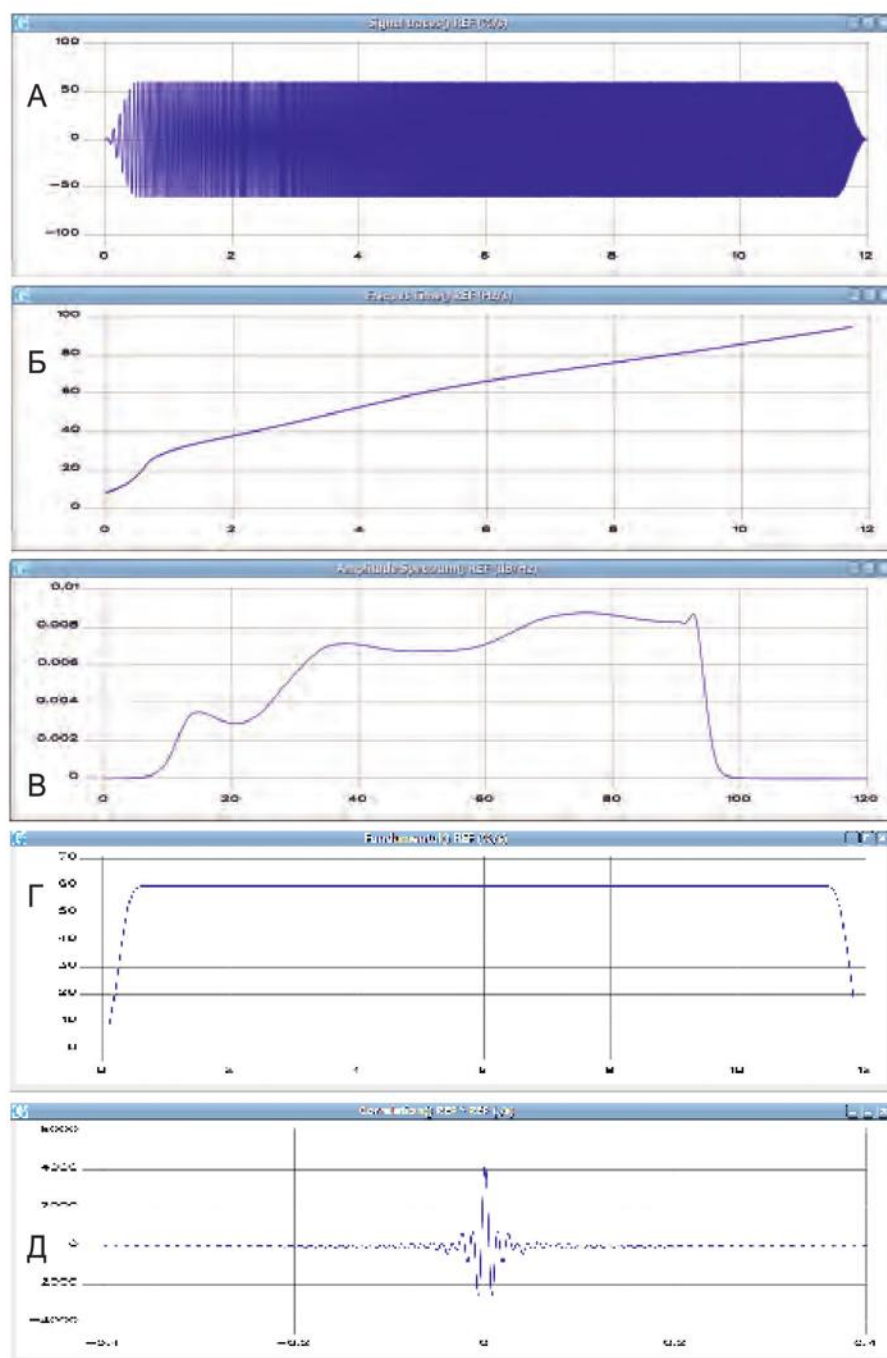
Диапазон частот сигнала составляет 8-96 Гц, 15% параметр регуляризации, длина сигнала составляет 12 секунд, конусы в начале и в конце сигнала составляют 0.5/0.5 секунды соответственно.

Количество накоплений для адаптивного свип-сигнала составляет 1+4, при первом накопления на каждом ПВ генерируется ЛЧМ-сигнал, производится регистрация отклика среды на этот сигнал, виброграмма передается в програм-

му VibroEqualizer для анализа и расчета коэффициентов адаптивного вибросигнала, передача рассчитанных коэффициентов в шифратор GDS-2 станции для расчета нового свип-сигнала (адаптивного) на основании полученных коэффициентов, передача рассчитанного адаптивного нелинейного свип-сигнала в дешифратор (Decoder) вибрационных источников по радиоканалу для генерации последующих 4 накоплений на данном ПВ[4][5] (рис.3).

► Рис. 3.

- а) Адаптивный свип-сигнал
- б) Мгновенная частота адаптивного сигнала
- в) Спектр адаптивного сигнала
- г) Мгновенная амплитуда адаптивного сигнала
- д) Автокорреляционная функция адаптивного сигнала.



Низкочастотный (Low dwell) свип-сигнал

Частотный диапазон сигнала составляет 3-6-96 Гц, длина сигнала составляет 16 секунд, конусы в начале и в конце сигнала составляют 1.0/0.5 секунды соответственно (рис.4).

Широкополосный сигнал

Частотный диапазон сигнала составляет 3-6-96 Гц, 0.1 дБ/Гц нелинейности, длина сигнала составляет 16 секунд,

конусы в начале и в конце сигнала составляют 1.0/0.5 секунды соответственно [6] (рис.5).

Обработка данных

Все сейсмические данные обрабатывались с использованием единого графа обработки (табл.3).

В результате были получены временные разрезы, соответствующие каждому сигналу [7].

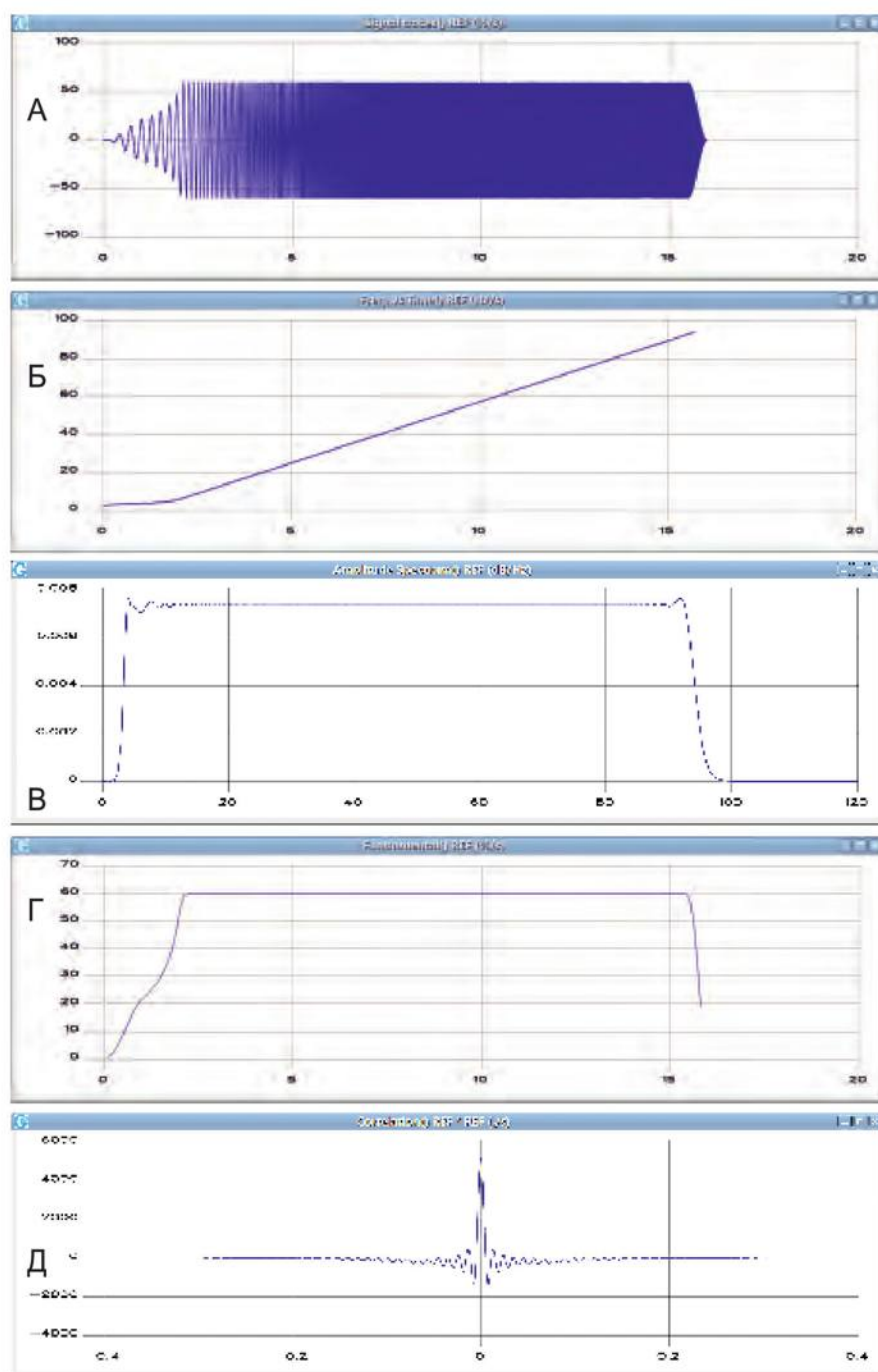


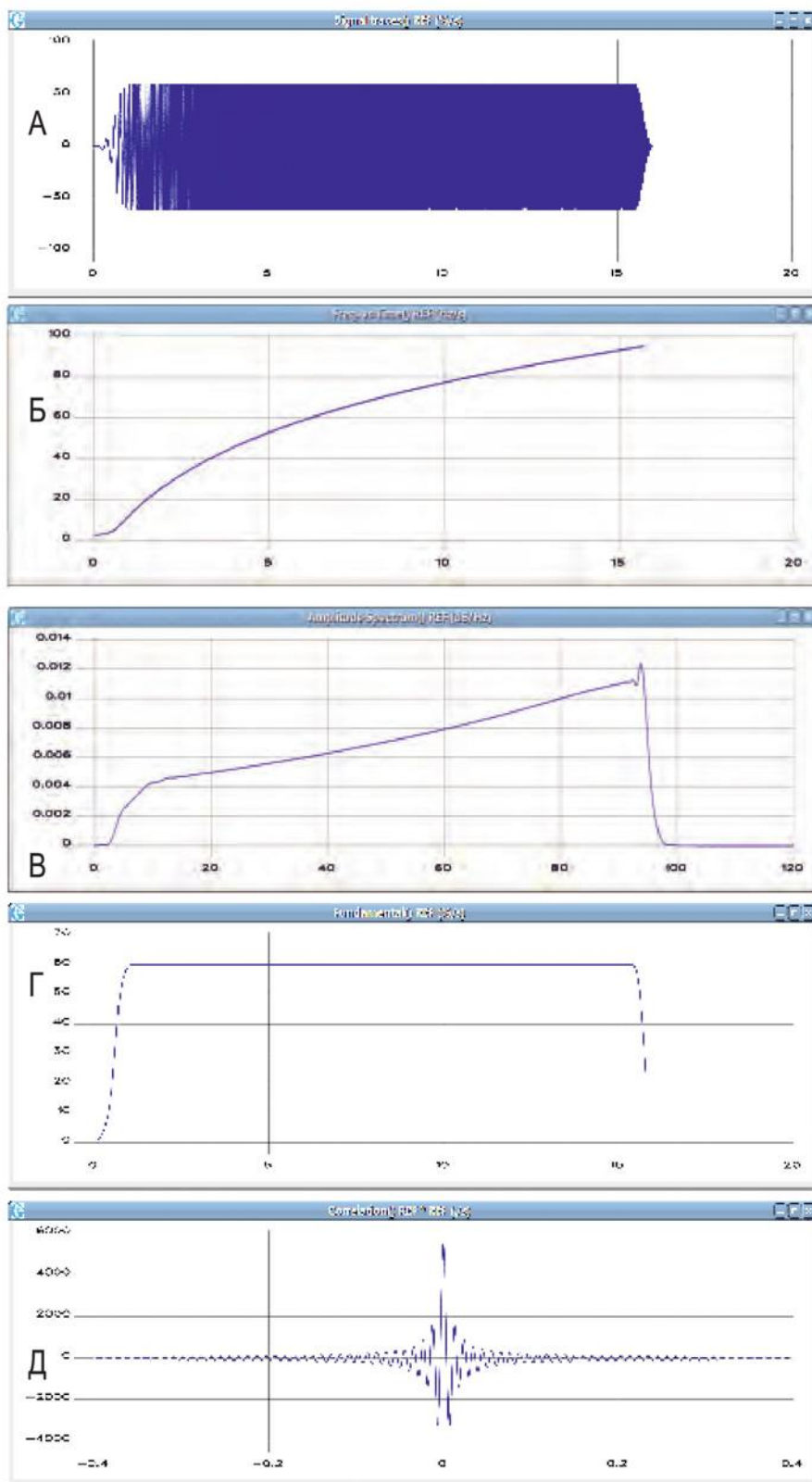
Рис. 4.
а) Низкочастотный (НЧ) свип-сигнал
б) Мгновенная частота НЧ сигнала
в) Спектр НЧ сигнала
г) Мгновенная амплитуда НЧ сигнала
д) Автокорреляционная функция НЧ сигнала.

Амплитудные спектры

На Рис. 6 приведены спектры для различных временных разрезов. Достаточно хорошо видно, что все спектры, полученные при излучении вибрацион-

ных сигналов стабильнее и шире по сравнению со взрывными данными. Спектр адаптивного сигнала по низким частотам совпадает со спектром взрывных данных, но значительно шире и

► Рис. 5.
 а) Широкополосный свип-сигнал
 б) Мгновенная частота широкополосного сигнала
 в) Спектр широкополосного сигнала
 г) Мгновенная амплитуда широкополосного сигнала
 д) Автокорреляционная функция широкополосного сигнала.



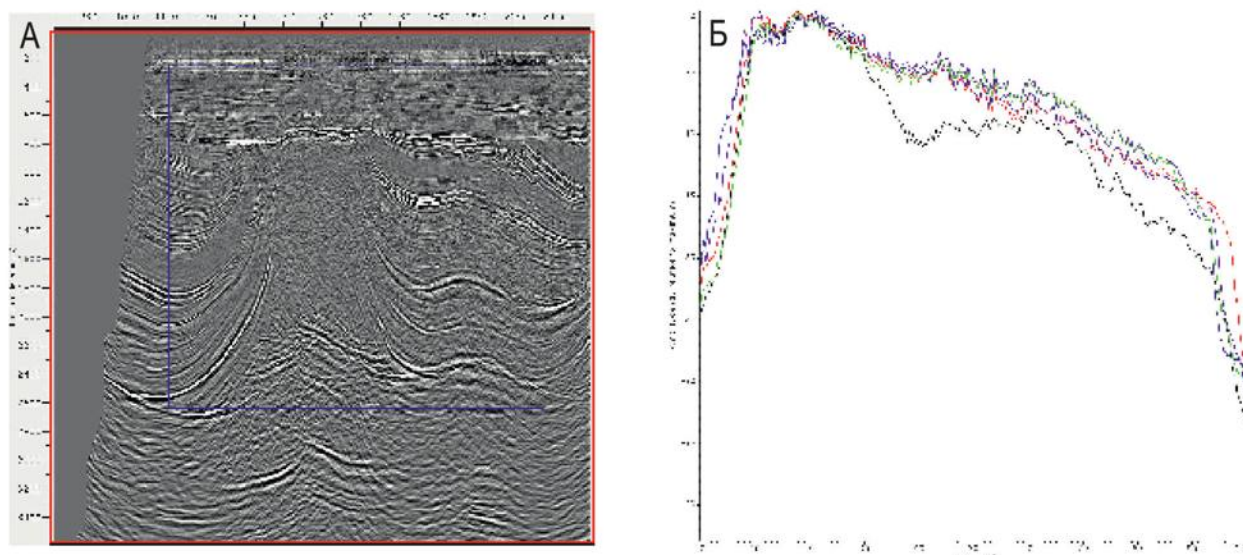
№	Задание	Процедуры
1	Ввод данных и присвоение геометрии	Описание геометрии наблюдений
		Контроль качества присвоения геометрии
2	Кинематическая обработка	Расчет априорных статических поправок по рефрагированным волнам
		Коррекция кинематических и остаточных статических поправок
3	Предварительная обработка	Регулировка амплитуд за сферическое расхождение
		Ввод априорных и остаточных статических поправок
4	Шумоподавление до деконволюции	Подавление регулярных и нерегулярных помех
5	Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд	Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд
6	Деконволюция	Нуль-фазовая деконволюция (минимально-фазовая для взрывных данных)
7	Шумоподавление после деконволюции	Подавление регулярных и нерегулярных помех
8	Временная миграция до суммирования	Временная миграция Кирхгоффа до суммирования
9	Кинематическая обработка	Коррекция кинематических поправок
10	Поверхностно-несогласованная коррекция статических поправок (трим-статика)	Поверхностно-несогласованная коррекция статических поправок на основе корреляции с внешней моделью
11	Регулировка амплитуд	Автоматическая регулировка амплитуд
12	Суммирование / Обработка после суммирования	- / FX-Decon

▲ Табл. 3. Граф обработки взрывных и вибрационных данных.

устойчивее по средним и высоким частотам. Спектр низкочастотного сигнала расширен в сторону низких частот и совпадает со спектром ЛЧМ-сигнала по средним и высоким частотам. Спектр широкополосного сигнала расширен как в область низких, так и в сторону высоких частот (рис.6).

Временные разрезы после временной миграции до суммирования

На Рис. 7.8 приведены временные разрезы, полученные с различными сигналами. Визуальная оценка полученных изображений позволяет также сделать вывод в пользу низкочастотного и широкополосного сигналов. В последнем случае не теряется глубинность исследо-



▲ Рис. 6. а) Окно для расчета спектры; б) Спектр различных временных разрезов (чёрный – взрывной источник, красный - линейный сигнал, зеленый - адаптивный сигнал, синий - низкочастотный сигнал, фиолетовый- широкополосный сигнал).

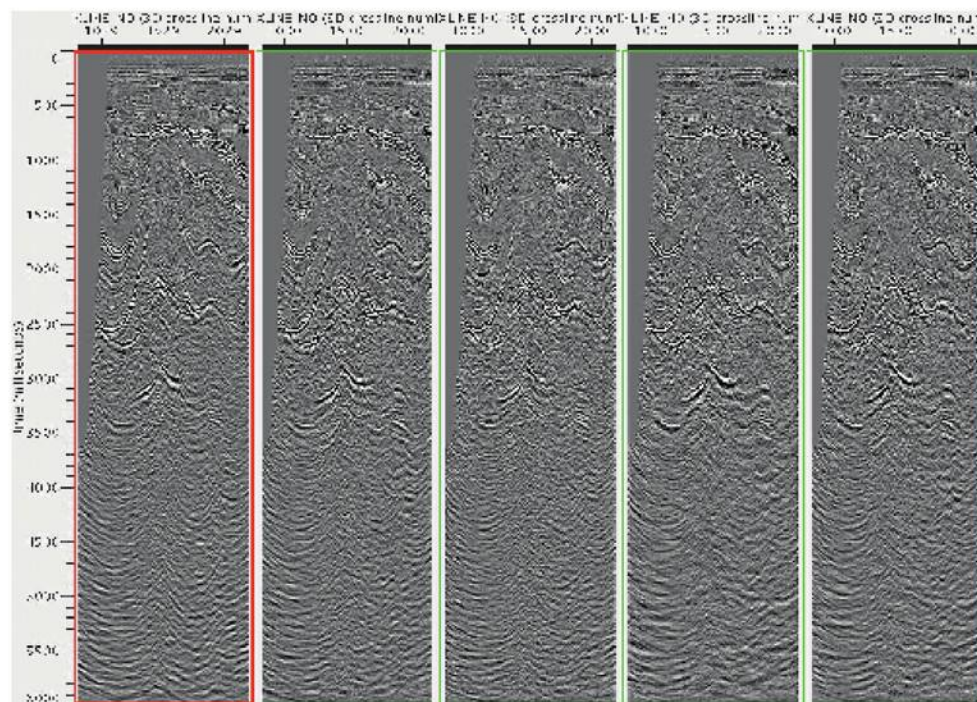
ваний и значительно возрастает динамическая выразительность отражающих горизонтов (рис.7.8).

Фильтрация по октавам

На Рис. 9 приведены результаты полосовой фильтрации по октавам каждого набора обработанных данных. Каждый набор данных был отфильтрован в пяти диапазонах частот (рис.9).

Как видно на приведенном рисунке, данные широкополосного сигнала демонстрируют существенное расширение амплитудного спектра и более высокую визуальную разрешенность на самом разрезе в сравнении с другими данными, особенно в низкочастотном диапазоне (3-6Гц). Dwell-конус со специальной нелинейной частотной и амплитудной модуляцией, обеспечивает нормальную,

► Рис. 7. Временные разрезы вдоль тестового профиля после временной миграции (0–6000 мс), слева направо— —разрезы взрывного источника, линейного сигнала, адаптивного сигнала, низкочастотного сигнала, широкополосного сигнала.



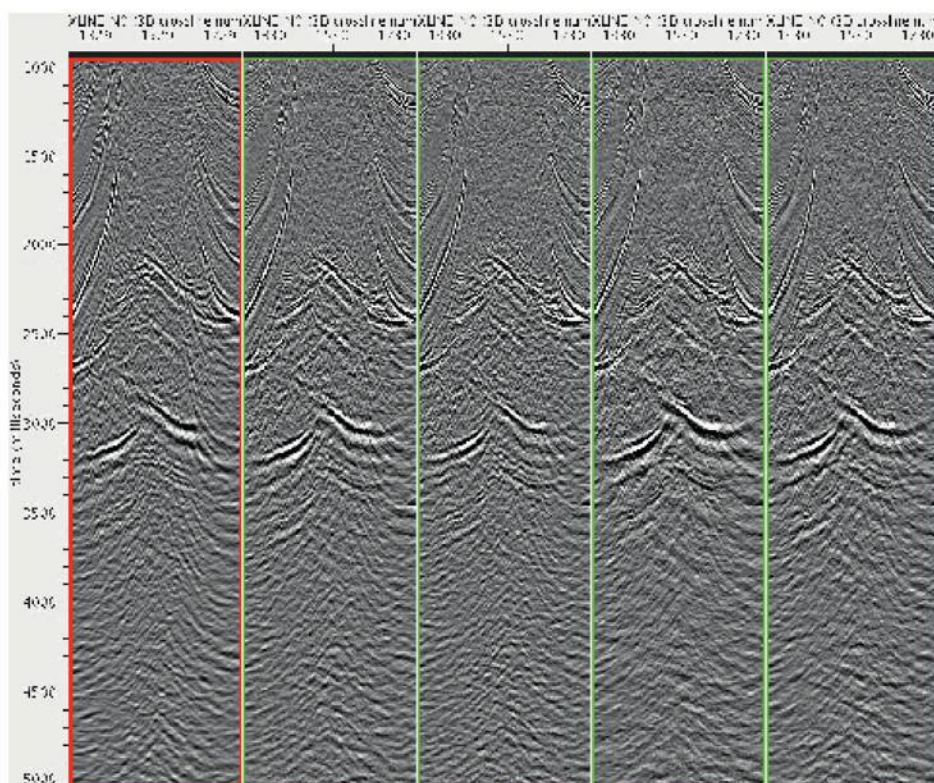


Рис. 8. Временные разрезы вдоль тестового профиля после временной миграции (1000–5000 мс), слева направо — разрезы взрывного источника, линейного сигнала, адаптивного сигнала, низкочастотного сигнала, широкополосного сигнала.

абсолютно безопасную работу виброустановки в области ультранизких частот.

Результат интерпретации

На основе временного разреза полученного широкополосного сигнала была построена геологическая модель, изучаемого пространства которая представлена на рис.10.

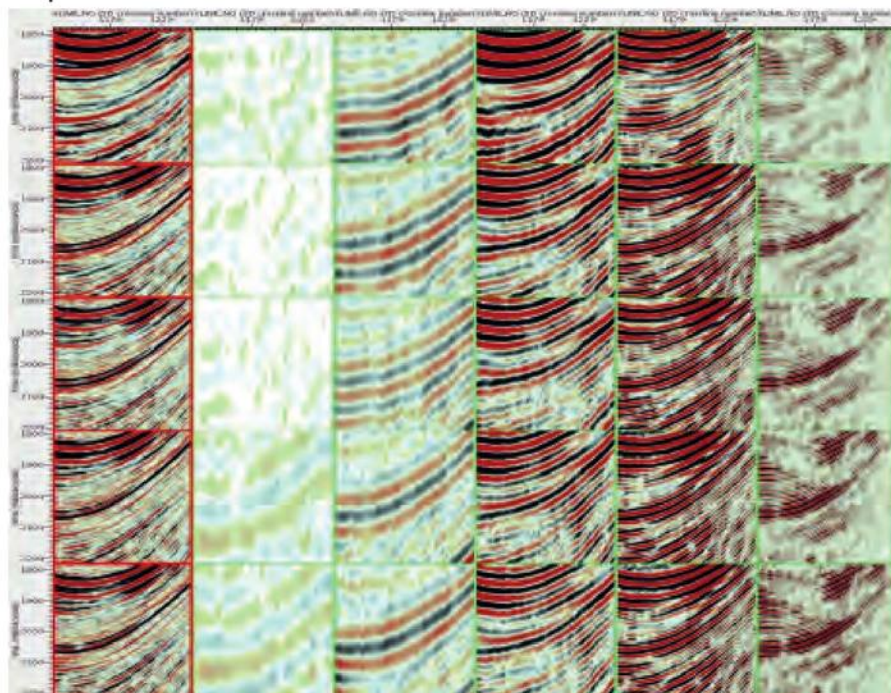


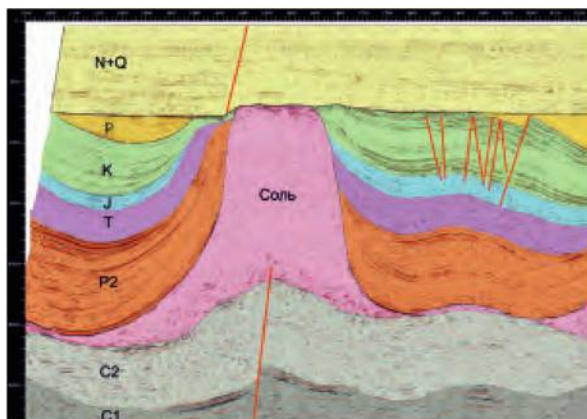
Рис. 9: Временные разрезы (1800–2200 мс, номер CDP 1129–1259) после фильтрации по октавам (узкополосная фильтрация), слева направо — нефльтрованный временный разрез, 3–6 Гц узкополосная фильтрация, 6–12 Гц узкополосная фильтрация, 12–24 Гц узкополосная фильтрация, 24–48 Гц узкополосная фильтрация, 48–96 Гц узкополосная фильтрация, сверху вниз — взрывные данные, данные линейного сигнала, данные адаптивного сигнала, данные низкочастотного сигнала, данные широкополосного сигнала.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Вибрационное возбуждение как минимум не уступает по качеству полученных результирующих данных взрывному.

2. Среди вибрационных сигналов



▲ Рис. 10. Результат интерпретации на основе широкополосных данных.

наиболее оптимальным является широкополосное возбуждение, позволяющие расширять спектр возбуждаемых колебаний как в сторону низких, так и высоких частот.

3. Вибрационное возбуждение можно рекомендовать изучение подземного пространство в Прикаспийской впадине. Наиболее оптимальном является широкополосное возбуждение.

Литература

1. Быстрова И. В., Смирнова Т.С. и др. Особенности палеотектонического развития астраханского свода и перспективы нефтегазоносности западной части прикаспийской впадины // Геология, география и глобальная энергия — 2017, № 3. С.77-86

2. Великанов Э.Б., Чуйков Ю.С. Об экологической обстановке в районе Астраханского газоконденсатного месторождения // Астраханский вестник экологического образования — 2014, № 14. С.192-200

3. Демидова Е.И., Ефимова Е.А., Захаров А.В., Быков В.Ю. Из истории Астраханского газового комплекса // Научный журнал Российского газового общества — 2016, №1. С.71-80

4. Жуков А.П., Коротков И.П. и др. Адаптивные технологии вибрационной

сейсморазведки. Часть 1 // Приборы и системы разведочной геофизики — 2021, № 2. С.44-57

5. Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Издательство ГЕРС, Тверь, 2011. С. 411

6. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах. Издательство ГЕРС, Тверь, 2002. С. 415

7. Öz Yilmaz. SEISMIC DATA ANALYSIS. Society of Exploration Geophysicists, 2001. 2065 p

Подробнее об авторах



Ван
Жуйчжэ

аспирант кафедры
сейсмометрии
и геоакустики МГУ
им. М.В. Ломоносова



Жуков
Александр Петрович

Генеральный директор
ООО “Геофизические
системы данных”
доктор технических
наук



Калимулин
Ренат Маратович

ведущий геофизик
ООО “Геофизические
системы данных”

Интерпретация результатов наблюдений сейсмо-электрического эффекта над газовым месторождением без дополнительной "подсветки" электрическим полем

■ Шайдуров Г. Я., Баландин П. В., Потылицын В. С.,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Представлены материалы экспериментальных наблюдений сейсмо-электрическим методом на Минусинском газоконденсатном месторождении с использованием невзрывного импульсного сейсмо-электрического источника «Енисей КЭМ-4» без дополнительной «подсветки» электрическим полем. Получены трехмерные изображения связи сейсмических и электрических сигналов. По этим данным построена структура отражающих слоев.

Ключевые слова: интерпретация, сейсмо-электрический, метод, месторождение, газоконденсатное.

Работы проводились в 2015-2017 гг. на Быстрянской площади Минусинского газоконденсатного месторождения (респ. Хакасия) хорошо разведанный различными геофизическими методами и бурением. Газовый пласт находится на глубине 1500-2000 м. На рис. 1 представлена геологическая карта площади, где пунктиром показаны изолинии положения продуктивного пласта, а стрелкой отмечен исследуемый профиль. На рис. 2 изображена схема эксперимента.

Невзрывной импульсный сейсмический излучатель «Енисей КЭМ-4» с силой удара 100 т устанавливается в начале профиля, а сейсмическая коса с 41 сейсмоприемниками располагалась вдоль профиля в северо-восточном направлении на расстоянии от источника 500 м. Сейсмоприемники устанавливались с разносом в 12.5 м и подключались через сейсмокосу к сеймостанции. В один из резервных каналов сеймокосы подключился электрический заземленный диполь длиной 200 м, на выходе которого был установлен фильтр нижних частот в диапазоне 0.1-20 Гц, позволяющий подавить промышленные помехи до уровня –80 дБ.

При обработке сигналов на сеймостанции использовался алгоритм вычис-



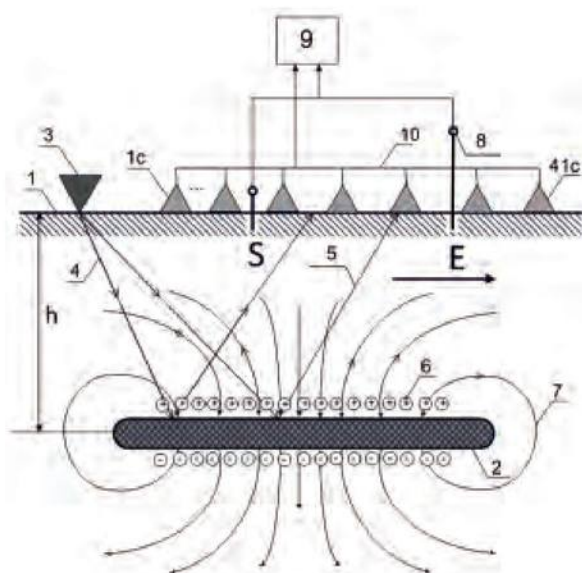
▲ Рис. 1. Геологическая карта Быстрянской площади Минусинского газоконденсатного месторождения.

ления коэффициента взаимной корреляции (КВК) сейсмического и электрического полей:

$$B(\tau_e, \tau_s) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{E}(t - \tau_e) \bar{S}(t - \tau_s) dt \quad (1)$$

Где: $E(t)$ и $S(t)$ – соответственно нормированные по дисперсиям электрические и сейсмические сигналы; а τ_e и τ_s – сдвиги временных окон этих сигналов; T – период повторения.

Длительность сейсмоимпульса источника составляло $\tau = 5$ мс.



▲ Рис. 2. Схема эксперимента.

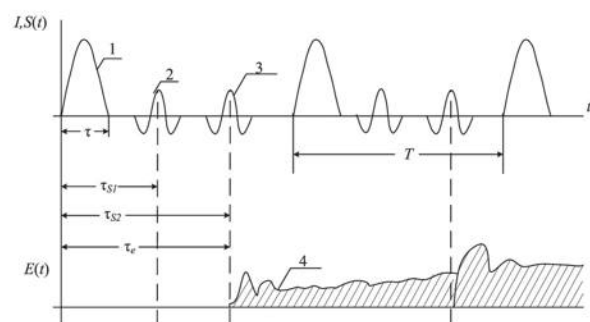
На рис. 3 показаны эпюры излучаемых и принимаемых сигналов, где: τ_e и τ_s соответственно сдвиги временного окна сейсмических и электрических сигналов; $\tau = 5$ мс длительность импульса сейсмического удара; $T = 10$ с – период повторения.

Поскольку вычисление КВК производилось для всех значений временных сдвигов τ_e и τ_s , то это позволяло при обработке получить трехмерную картину зависимостей КВК от времен прихода сейсмических и электрических сигналов вызванных сейсмическими ударами источника.

За начало отсчета параметра КВК принималось время вступления сейсмического сигнала отраженного от границы очередного слоя георазреза.

Путем перемещения по времени этого сигнала и сверткой с сигналами электрического диполя вычислялся КВК, который наносился на трехмерный график зависимости КВК от времен задержки τ_e и τ_s .

На рис. 4, для примера приведены трехмерные зависимости в четырех точках наблюдения. Точка 1 находилась в районе скважины 8-р, а 41 – в районе скважины 14-р.

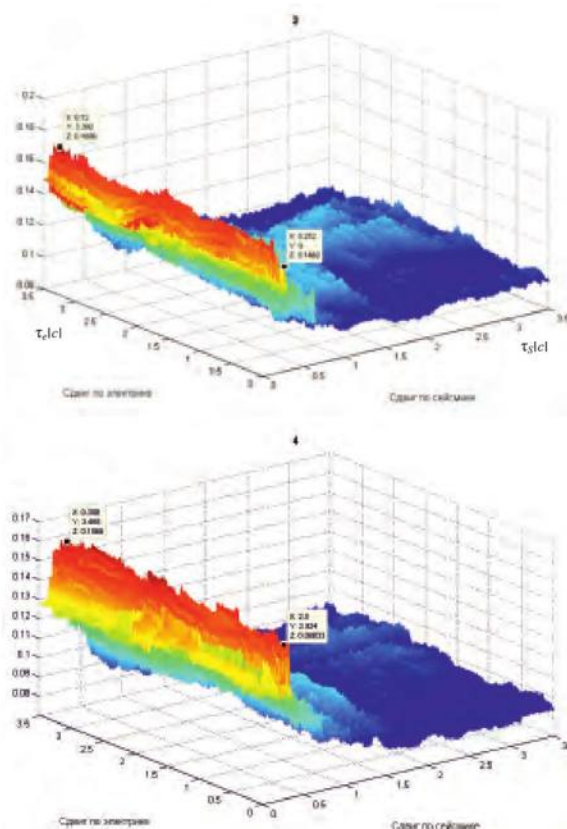


▲ Рис. 3. Эпюры наблюдаемых сигналов
1 – импульсы сейсмоисточника;
2 – сейсмический импульс у поверхности пласта;
3 – отраженный сигнал в районе сейсмоприемника;
4 – вторичное поле СЭ эффекта.

Все эти графики имеют гребенчатую структуру, по времени существования электрического поля.

Значительное время существования электрического сигнала после сейсмического удара можно объяснить, как

▼ Рис. 4. Трехмерная запись сигналов в нормальной зоне.



процессами перезарядки пористой диэлектрической среды, так и совокупным излучением электрического поля всей поверхностью пласта.

Поскольку длительность возбуждающего пласта сейсмического импульса τ_n много меньше по времени реакции на него электрического поля, то в интеграле (1) функцию $S(t)$ можно принять как короткий дельта импульс $S(\tau) = S_0 \delta(\tau)$.

В этом случае взаимно-корреляционную функцию электрического и сейсмического сигналов можно интерпретировать как импульсную переходную характеристику электрического поля сейсмо-электрического эффекта:

$$B(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T S_0 \delta(\tau) E(t - \tau) dt = S_0 E(\tau) \quad (2)$$

Постоянную времени электрического разряда определим через эквивалентную емкость C смещаемую сейсмическим ударом поверхность пласта и активное сопротивление R , через которое проходит ток разряда

$$\tau_p = RC, \quad (3)$$

Где, согласно [1],

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 L_1 L_2}{Z}; \quad Z = \frac{\tau_u P_2}{V_2 \rho_2} \quad (4)$$

$$R = \frac{E_0 \cdot Z}{I}; \quad I = \frac{E_0 Z \sigma_2 L_1 L_2}{h_2} \quad (5)$$

$$\tau_p = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \sigma_2}{h_2} \quad (6)$$

Здесь: ε , σ_2 – относительная диэлектрическая среда и электропроводность пласта

E_0 – стационарное электрическое поле Земли

I – ток разряда

L_1 , L_2 – продольный и поперечный размер пласта

h_2 – его мощность

Z – смещение верхней границы пласта под ударами сейсмоисточника

V_2 , ρ_2 – соответственно скорость распространения сейсмической волны и плотность углеводородной среды пласта

τ_u – длительность сейсмического удара

P_2 – давление сейсмического удара на пласт, при глубине его положения 1000 м.

Для примера, при следующих частных значениях параметров, приведенных в работе [1]:

$\varepsilon = 10$; $\sigma_2 = 10^{-5} \text{ см/м}$; $E_0 = 120 \text{ в/м}$; $L_1 = 3000 \text{ м}$; $L_2 = 1000 \text{ м}$; $h_2 = 10 \text{ м}$; $V_2 = 500 \text{ м/с}$; $\rho_2 = 100 \text{ кг/м}^3$; $\tau_u = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $P_2 = 1000 \text{ Н}$; $Z = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, получим $\tau_p \geq 10 \text{ с}$.

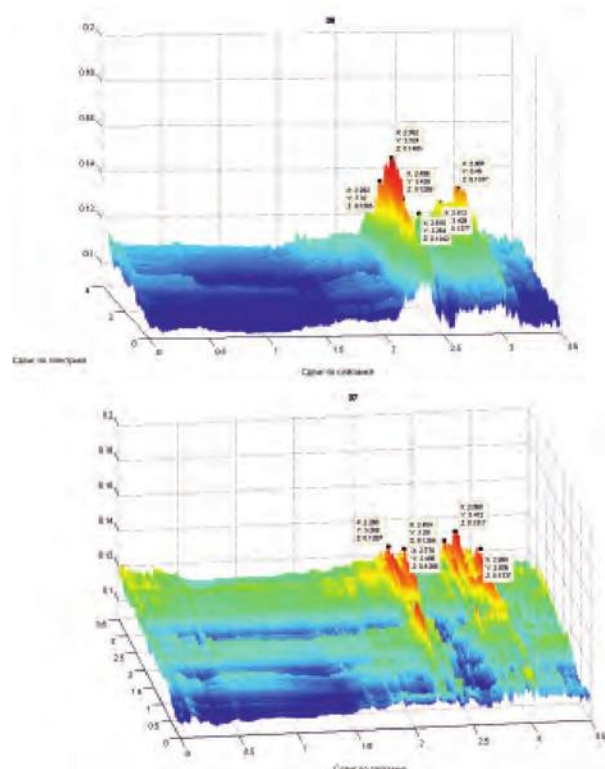
Поскольку постоянная времени разряда пласта превышает период повторения сейсмических ударов $T = 10 \text{ с}$, использованный в эксперименте, то, по мере повторения ударов, электрический сигнал СЭ эффекта должен нарастать, как это изображено на рис. 3.

Величина τ_p , наряду с напряженностью электрического поля СЭ эффекта, также является информационным параметром, позволяющим оценить величины ε , σ_2 , h .

На рис. 5 построен сейсмоэлектрический разрез исследуемого профиля, где граница отражающих слоев определяются временем запаздывания сейсмического сигнала τ_s . Это похоже на результаты построения СЭ разреза полученные на море другими авторами [3, 4].

Судя по графикам рис. 6 продуктивный пласт имеет угловой наклон к горизонту и содержит несколько отражающих границ, из которых нижняя соответствует запаздыванию сейсмической волны по времени $\tau_s = 2.5 \text{ с}$, что при глубине слоя 1600 м соответствует скорости продольной волны 1300 м.

Столь малую скорость можно объяснить низкой плотностью окружающих горных пород, состоящих из песчаника и



▲ Рис. 5. Запись сигналов в аномальной зоне.

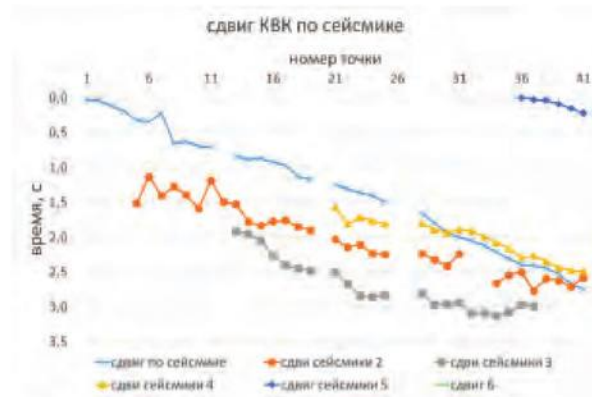
известняка, а также за счет содержания газа в ее порах. Появление электрического поля на малых глубинах в нормальной зоне рис. 3, 4, по-видимому связано с более высокой влажностью поверхностного слоя Земли.

Расчеты показали, что лишь при токе в кабеле 10 А эти заряды сопоставимы.

В патенте США [3] и работах отечественных геофизиков СЭ методом на море [4] применялось дополнительное облучение георазреза электрическим полем большой мощности («бинарная технология»), что как указывают авторы, существенно увеличивает потенциал СЭ эффекта.

При этом, эти же авторы обращают внимание, что постановка подобных работ на суше существенно осложнена необходимостью использования тяжелой транспортной техники для перевозки кабеля, заземлений, мощных источников электропитания.

Описанный выше эксперимент на Минусинском газоконденсатном место-



▲ Рис. 6. Изображение поверхности отражающих слоев.

рождении показал, что на основе взаимно корреляционной обработки сейсмических и электрических сигналов работа СЭ методом на суше, вполне возможна работа без использования бинарной технологии.

Интегральный характер распределения вторичного электрического поля СЭ-эффекта по поверхности Земли, как поля эквивалентного электрического диполя, позволил в описанном выше эксперименте использовать для приема один электрический диполь на профиле длиной 200 м. это показывает на возможность существенного упрощения проведения работ СЭ методом на суше, поскольку не требует раскладки по профилю большого числа приемных электрических датчиков.

Заключение

– Экспериментальные наблюдения показали возможность использования СЭ метода на суше без дополнительной подсветки электрическим полем, то есть без применения бинарной технологии.

– Совместная обработка наблюдаемых сейсмических и электрических сигналов методом взаимной корреляции позволяет повысить чувствительность и помехоустойчивость наблюдений, а также получить дополнительную информацию по структуре сейсмо-электрического разреза.

– Постановка «полуактивного» СЭ метода в отличие от бинарной технологии не требует никаких новых аппаратных решений по сравнению с обычной сейсморазведкой, кроме включения в схему измерений заземленных электрических диполей. По опыту работы, это примерно три диполя на 1 км сейсмической косы).

– Для внедрения в практику этого метода безусловно необходим большой объем экспериментальных работ на различных нефтяных и газовых месторождениях.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-07-00267.

Литература

1. Шайдуров Г.Я. Методика системного анализа сигналов сейсмо-электрического эффекта при поиске углеводородов. Приборы и методы разведочной геофизики. Саратов. ЕАГО. 2021. № 4Б. С. 33-37.

2. Шайдуров Г.Я., Кудинов Д.С., Потылицын В.С., Романова Г.Н. О наблюдении сейсмо-электрического эффекта на газоконденсатном месторождении в естественных электромагнитных и сейсмических полях Земли в диапазоне частот 0.1-20 Гц. Геология и геофизика, 2018. Т. 59. № 5. С. 703-708.

3. Berg A. Method of Seismo-Electromagnetic Detecting of Hydrocarbon deposit. Us Patent № 7730790. October. 2005.

4. Мельников В.П., Лисов В.И., Брюховецкий О.С., Бобровников. Л.З. Инновационная геофизика: бинарные технологии прямых поисков месторождений полезных ископаемых. ч. 1 // Инженер-нефтяник. М.: ООО «Ай Ди Эс Дриллинг», 2011, № 1, с. 47—51.

Подробнее об авторах



Шайдуров
Георгий Яковлевич

д.т.н., профессор
Сибирского федерального
университета
(СФУ), г. Красноярск



Баландин
Павел Васильевич

старший геофизик,
ПАО «Геотек-
-Сейсморазведка»,
г. Тюмень



Потылицын
Вадим Сергеевич

старший научный
сотрудник,
НИЛ «Электроакустика»
СФУ, г. Красноярск

Примечание. В статье [1], по вине автора, в формулах (3), (5) пропущен множитель τ , а в (7), (8), (12) множитель (h_2^{-1}) , что позволяет скорректировать расчетные оценки $E_{\text{хр}}=0.46$ мкВ/м, $Q_3=0.96 \cdot 10^{-8}$ кул, но не изменяет выводов по работе.

Пример планирования и реализация работ ВСП в наклонно - направленной скважине

- Горбачев С.В., Титов А.Б., ООО «РН-Шельф-Арктика», г. Москва
- Черкашнев С.А., ИП Черкашнев С.А., г. Москва

В работе представлены результаты проектирования, подготовки и выполнения вертикального сейсмического профилирования в наклонно - направленной скважине. Особое внимание уделено вопросу выбора оптимальной методики и объемов полевых работ с учетом особенностей и сложностей поверхностных условий, а также конструкции скважины. Продемонстрированы необходимые мероприятия для успешного выполнения полевых работ. Представлены результаты обработки и интерпретации данных ВСП с учетом решения геолого-геофизических задач и сложности полевого материала. По результатам работ делаются объективные выводы по эффективности выполненных работ ВСП и рекомендации для будущих проектов.

Ключевые слова: ВСП [5, 7, 8], планирование и проектирование работ, сейсморазведка 2D и 3D, данные ГИС, анизотропия, трещиноватость, поглощение, эффективность работ.

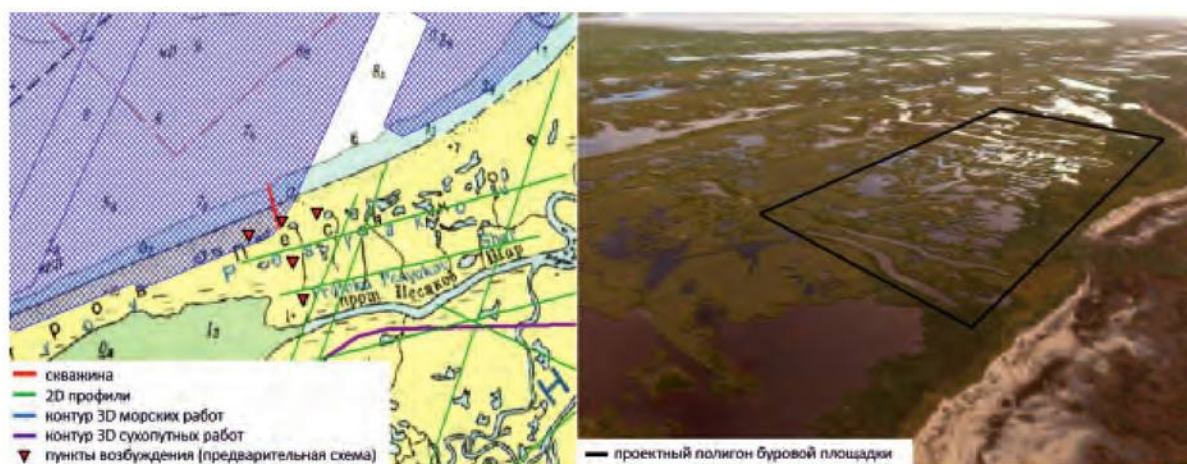
Введение

Успешность и эффективность многих геофизических методов во многом зависит от детальности и качества проработки и реализации каждого из этапов работ (планирования, подготовки, полевых работ, обработки и интерпретации) [2]. Часто, отсутствие точно продуманных и корректно сформулированных геолого-геофизических задач, а также четкого плана реализации проекта может привести к получению неоднозначных результатов и ошибочных выводов, как о геологическом строении, так и об эффективности используемого метода исследований в целом. Это в полной мере касается всех геофизических методов на всех этапах геологоразведочных работ, поэтому вопросам постановки задач и проверки их реализации необходимо уделять особое внимание. Метод ВСП не является исключением, существует много примеров, когда по результатам работ ВСП не были решены поставленные задачи и, как следствие, сделаны выводы о его неэффективности. Анализ результатов предыдущих работ показал, что основными причинами таких непра-

вильных выводов явилось не соответствие применяемой методики поставленным геолого-геофизическим задачам, отсутствие проектирования и моделирования при выборе методики и технологии работ на этапе планирования работ, отсутствие должного контроля на этапе полевых работ, обработки и интерпретации данных. В данной работе представлен опыт планирования и реализации проекта ВСП на примере работы в одной из скважин.

Район исследований расположен в северной части Тимано-Печорской нефтегазовой провинции в прибрежной зоне. В непосредственной близости на суше разрабатываются нефтяные месторождения с большим количеством скважин. С целью подтверждения геологической модели исследуемого района, ее распространения в сторону шельфа, а также оценки продуктивных отложений планировалось бурение наклонно направленной скважины с территории суши и расположением забоя в прибрежной части моря.

Перед работами ВСП первоначально были поставлены все возможные, для



▲ Рис. 1. Обзорная схема (слева) и поверхностные условия (справа) района работ.

данного метода, геолого-геофизические задачи: уточнение скоростной модели; увязка скважинной геолого-геофизической и сейсмической информации; получение разреза в сторону суши; уточнение наличия предполагаемых разрывных нарушений; прогноз кратных волн по данным ВСП и 2D/3D МОГТ; оценка поглощения; оценка анизотропных характеристик; прогноз зон трещиноватости, а также прогноз характеристик разреза ниже забоя скважины.

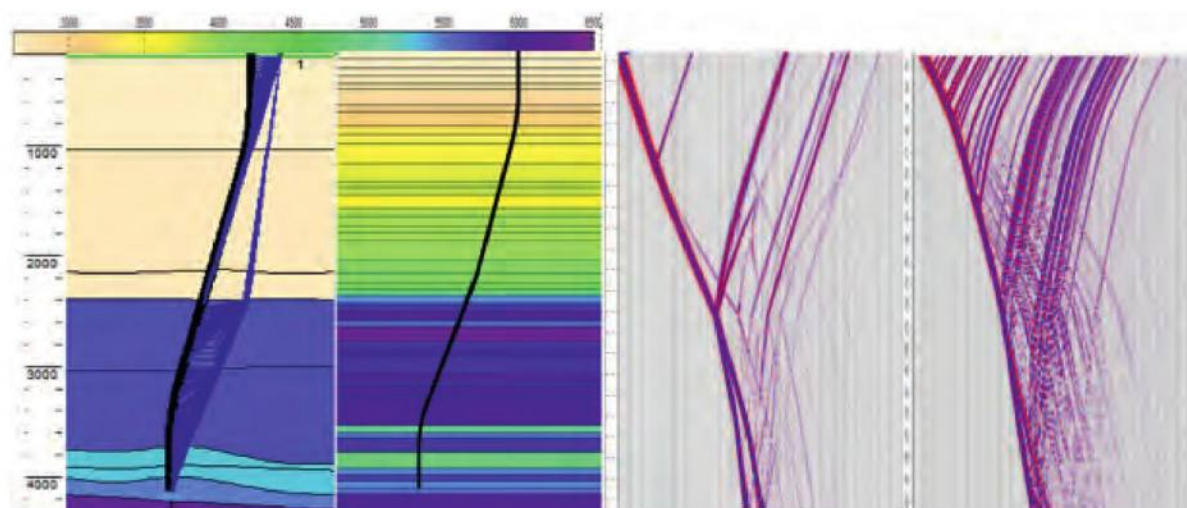
Осложняющими факторами проведения работ ВСП являлась S-образная траектория ствола скважины, сложные поверхностные условия (болота, ручьи и реки) и экологические ограничения, которые препятствовали свободному передвижению и размещению пунктов возбуждения на суше в летний период. Отработка пунктов возбуждения со стороны акватории приводила к необходимости привлечения морского судна с пневмоисточником, осложнялась мелкими глубинами моря, что существенно увеличивало стоимость работ. Все эти ограничения требовали детальной и основательной проработки методики и технологии работ для оценки возможностей решения поставленных геолого-геофизических задач.

Планирование и проектирование работ ВСП

Наиболее корректным способом оценки эффективности применения и получения необходимых геолого-геофизических результатов, а также оценки оптимальности методик и технологий полевых работ для конкретных условий является применение сейсмогеологического моделирования на этапе планирования работ [3].

На первом этапе работ была подготовлена программа исследований, включающая построение толсто- и тонкослоистой моделей (рис.2), анализ методик ВСП, расчет и обработка синтетических данных. Исходными данными для построения глубинно скоростных моделей являлись результаты интерпретации данных МОГТ, ГИС и ВСП ближайших сухопутных скважин. Использование толстослоистой модели на начальном этапе позволило оценить возможные варианты методики полевых работ, особенности распространения волн и их регистрации в S-образной скважине, а также уточнить программу для полномасштабного моделирования по тонкослоистой модели.

Основной геологической особенностью данного региона является контрастный переход терригенных и карбонат-



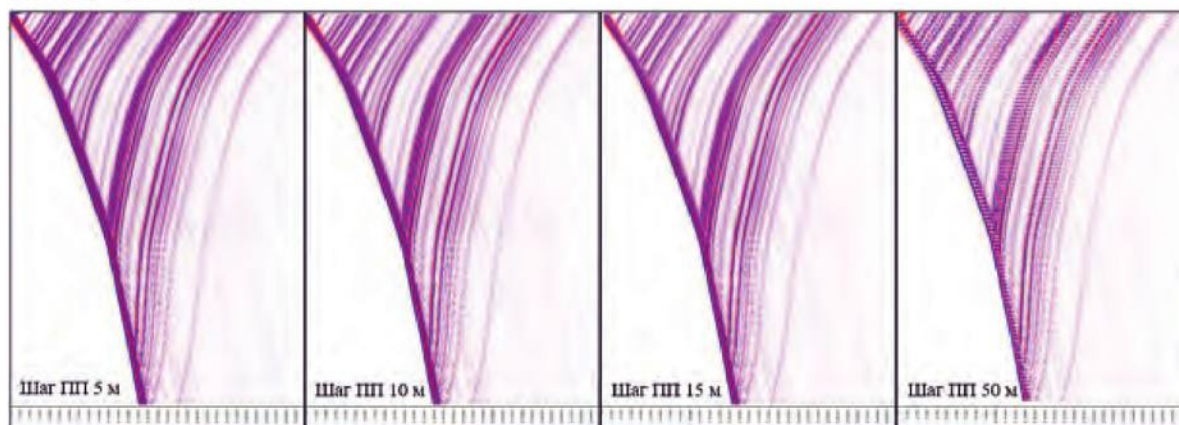
▲ Рис. 2. Пример толсто и тонкослоистой глубинно-скоростных моделей (слева) и синтетические данные (справа).

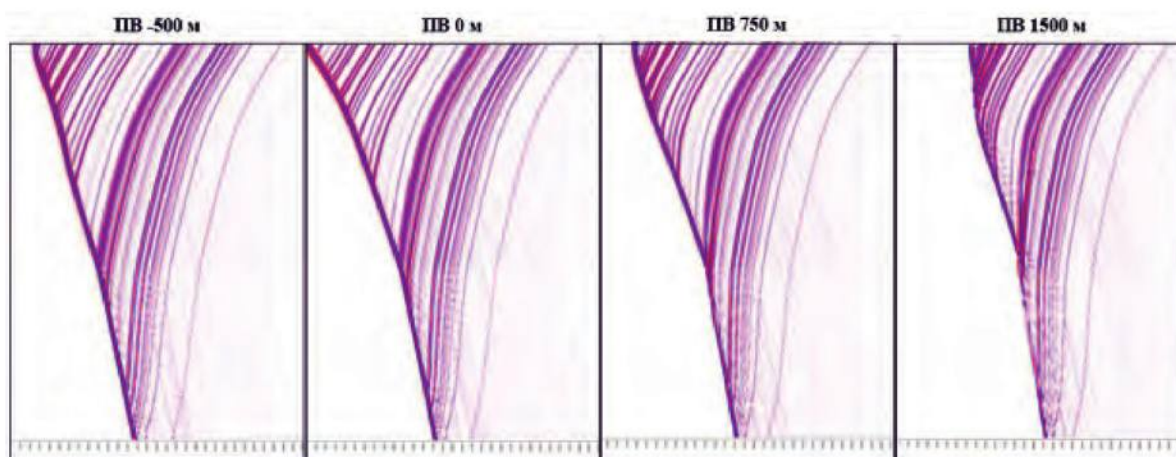
ных пород на глубинах около 2,2 км. Значительный перепад сейсмических скоростей приводит к образованию интенсивных преломленных волн на границе. Данное условие накладывает существенные ограничения на выбор максимального удаления пунктов возбуждения и требует специального подхода при обработке и оценке скоростей.

Еще одной особенностью геологического строения, которая была выявлена на этапе строительства буровой площадки и бурения инженерных скважин, является распространения островной мерзлоты в районе работ, которая может приводит к существенными изменениям скоростей в верхней части разреза и которую необходимо учитывать в процессе обработки данных [9].

Сейсмический импульс для моделирования синтетических данных был выбран на основании оценки частотного состава морских и сухопутных данных работ прошлых лет. Для выбора оптимального шага наблюдений в скважине был выполнен теоретический расчет вертикальной разрешающей способности, а также оценка пространственного аляйсинга для продольных и обменных волн. На рисунке 3 представлены сейсмограммы с разным шагом пунктов приема по стволу скважины, четко видно, что при большем шаге сейсмические данные находятся в аляйсинге, что приведет к существенным проблемам при разделении полей и формировании изображения на этапе обработки данных. В результате прове-

▼ Рис. 3. Примеры синтетических сейсмограмм продольных волн с разным шагом между приборами.





▲ Рис. 4. Пример синтетических данных ВСП тонкослоистой модели для разных пунктов возбуждения.

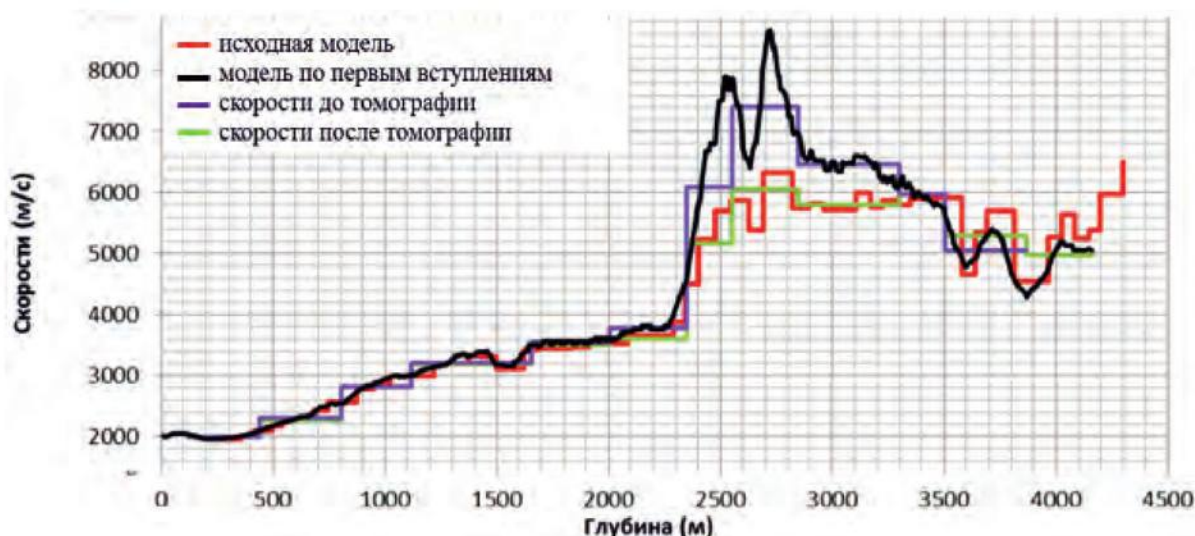
дённому анализу был определен оптимальный шаг между регистрирующими приборами 10 м.

Для реализации работ ВСП рассматривалось несколько возможных методик НВСП, МОГ и их модификации [4, 5, 7, 8]. Для анализа были смоделированы синтетические данные НВСП на разных удалениях вдоль профиля скважины (вынос ПВ -750м, -500м, -350м, -100м, 100м, 300м, 500м, 750м, 1000м, 1500м, 2000м, 2500м, 3000м, 3500м), профиль МОГ ВСП с расположением приборов в разных интервалах по скважине и удалением ПВ -750 от устья и до 3500 м в сторону суши. Дополнительно были проанализи-

зированы синтетические данные с пунктов возбуждения, расположенных на определенном расстоянии в обе стороны от проекции профиля скважины, с целью оценки возможности оценки скоростей, построения изображения и азимутального анализа. На рисунке 4 показаны примеры сейсмограмм, полученных по толстослоистой модели, с различными выносами пунктов возбуждения от устья скважины.

Одной из основных задач ВСП является уточнение скоростной характеристики разреза. Корректное определение скоростей в S-образных скважинах, с учетом контрастных перепадов свойств

▼ Рис. 5. Пример сопоставления модельных скоростей и скоростей оцененных разными способами.



разреза, задача достаточно непростая. Погрешность определения зависит от применения определённых подходов и навыков. Необходимо учитывать влияние кривизны ствола скважины, а также же эффекты преломления. На рисунке 5 представлено сравнение исходной тонкослоистой скоростной модели, модели построенной по первым вступлениям рассчитанной сейсмограммы, скоростей полученных до и после томографии. Для верхней (вертикальной) части скважины значения скоростей близки друг к другу, а начиная с 2200м (сильно преломляющая лучи граница терригенных и карбонатных слоев) имеются отличия до 15%. В результате выполненного анализа можно сделать вывод о необходимости детального подхода к процессу оценки скоростей по данным ВСП для текущих геологических условий и конструкции скважины.

Еще одной особенностью волновой картины, которую выявили в результате анализа и обработки синтетических данных, является интерференция осей синфазности отраженных продольных и обменных волн для глубоких горизонтов. В результате при неполном разделении разных типов волн на финальных разрезах возникает искривление горизонтов, а также ложные разрывные нарушения, что в итоге приводит к получению недостоверной информации и может сказаться на конечном геологическом результате.

Первоначальная схема полевых работ ВСП предполагала отстрел 5 пунктов возбуждения НВСП, два из которых располагались перпендикулярно проекции ствола скважины на равном расстоянии от устья в разные стороны (для изучения анизотропных свойств), ближний пункт возбуждения и два пункта возбуждения в сторону суши с удалением до 3000м. На этапе проектирования

была детально проработана возможность изучения анизотропных свойств среды в условиях S-образной траектории ствола скважины, в результате были сделаны выводы о сложности оценки скоростей в зависимости от азимута и построения корректного сейсмического изображения. Фактически задача свелась к анализу параметров Томпсона, что было подтверждено на реальных данных.

Благодаря выполненному проектированию и моделирования удалось своевременно скорректировать схему работ, отказаться от азимутальных пунктов возбуждения, уменьшить выносы дальних пунктов возбуждения, отказаться от одной точки наблюдений по причине неполучения дополнительной геолого-геофизической информации.

Помимо получения качественных данных ВСП и решения геолого-геофизических задач немаловажным показателем эффективности работ ВСП является оптимальная технология полевых работ, в том числе с точки зрения времени выполнения работ (минимизация времени задействования скважины), количества спускоподъёмных операций. Для оптимизации технологии отработки, на этапе планирования, был выполнен расчет времени выполнения работ ВСП с учетом различного количества регистрирующих приборов (от 4-х до 20-ти), учитывались основные этапы работ: монтаж/сборка, проверка и тестирование оборудования, спуск, контрольные измерения, привязка по глубине, регистрация данных, подъем оборудования и демонтаж. Общий объем работ НВСП составил 4 пункта возбуждения. Необходимо было проработать и выбрать оптимальное количество спускоподъёмных операций с учетом допустимого времени стоянки зондов в скважине, привлечения

необходимого количества взрывных отрядов. На основании выполненных расчетов выбрано оптимальное количество приборов - не менее 12 шт и выполнение работ за две спускоподъёмные операции.

По результатам выполнения этапа планирования и проектирования, с использованием методики сейсмогеологического моделирования, удалось:

- Уточнить возможности решения геолого-геофизических задач с учетом методик и технологий работ ВСП для текущих условий (сложные поверхностные условия, экологические ограничения).
- Исключить нереализуемые геолого-геофизические задачи в текущих условиях.
- Оптимизировать методику и объемы работ ВСП.
- Определить критерии к процедурам обработки и интерпретации данных ВСП.

Полевые работы и технико-методический контроль

Успешность реализации полевых работ ВСП зависит, в том числе от полноты и качества проведенных подготовительных мероприятий непосредственно перед самими полевыми работами.

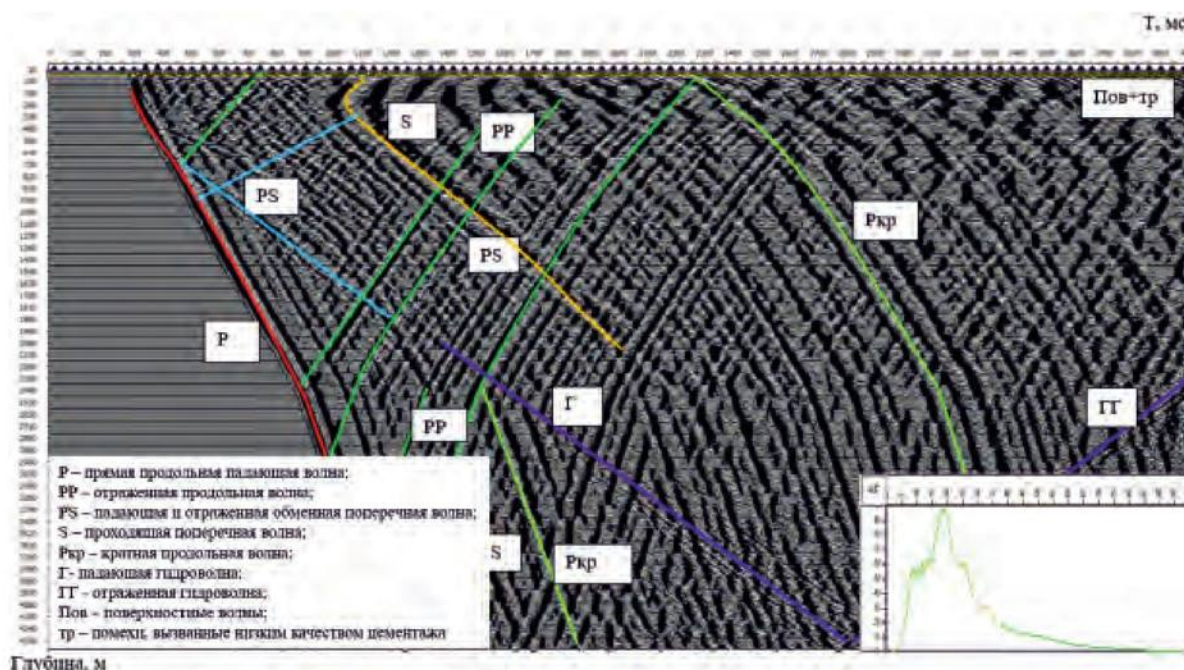
В связи с задержками сроков строительства скважины плановые сроки выполнения работ ВСП неоднократно смещались с осеннего на зимний и в конечном итоге летний период. Такое кардинальное изменение сроков накладывало существенные ограничения к процессу подготовки, применяемому оборудованию и технике в зависимости от сезонности и поверхностных условий работ. В результате все задействованное оборудование и техника прошла необходимый объем тестирования и подготовки в соответствии со стандартами и требованиями.

На подготовительном этапе работ была выполнена детальная проработка вопроса контроля качества данных, объем и порядок передачи информации для принятия решений. Контроль качества в процессе полевых работ состоял из двухэтапов:

- в режиме реального времени (тесты регистрирующего оборудования, контроль прижима, контроль работ источника сигнала и т.д), осуществлялся оператором станции и супервайзером;
- оффлайн контроль (расчет атрибутов, получение монтированных сейсмограмм, анализ волновых полей и т.д), выполнялся в специальном программном обеспечении удаленно из офиса.

Транспортная доступность в район скважины в летний период была ограничена по причине отсутствия автодорог (работа зимника прекращается в апреле). В связи с этим необходимо отметить сложную логистику отряда ВСП на скважину в процессе мобилизации. Все задействованное оборудование, техника, а также взрывчатые вещества и электродетонаторы доставлялись автотранспортом до г. Усинск и далее вертолетами до буровой площадки. Заблаговременное планирование и проработка данного вопроса позволили успешно и безопасно выполнить весь объем операций по мобилизации отряда ВСП в необходимые сроки.

Благодаря качественной и заблаговременной проработке большинства проблемных вопросов и моментов удалось выполнить весь объем работ ВСП с опережением планового графика, минимизировать время задействования скважины. Общее время производственных работ составило 65,5 часов. Всего было отработано 4 пункта возбуждения в рамках 2-х спускоподъёмных операций. По результатам выполненного контроля



▲ Рис. 6. Пример сейсмограммы ВСП ПВ1 Z компонента с анализом типов волн.

качества подтверждено высокое качество полученных данных ВСП. На рисунке 6 представлен пример сейсмограммы ВСП с описанием характерных типов волн.

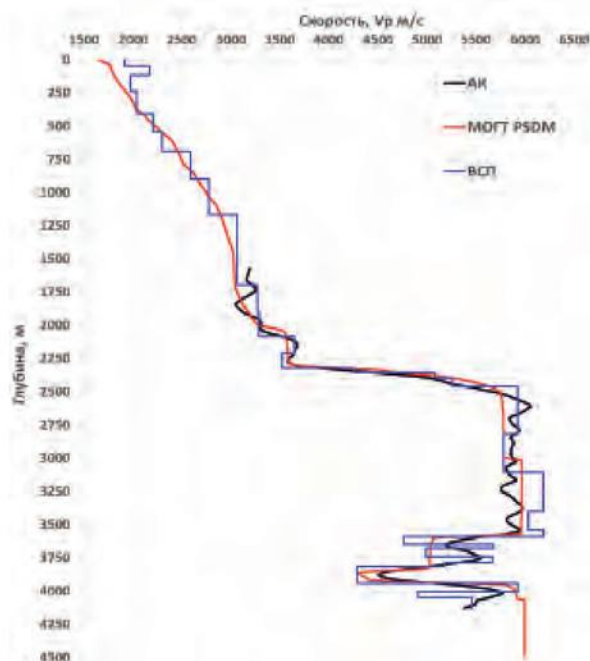
Обработка и интерпретация

Граф обработки и интерпретации данных ВСП состоял из базовых процедур, при этом основные сложности данных были связаны именно с особенностями геометрии ствола скважины и геологией.

Регистрации полевых данных осуществлялась приборами с неориентируемыми сейсмоприёмниками (Z компонента ориентирована вертикально вдоль оси прибора, X и Y компоненты взаимно перпендикулярны в горизонтальной плоскости). Во время спускоподъёмных операций в скважине происходит неконтролируемый поворот зондов относительно друг друга, а также в различных частях скважины приборы расположены под разными углами относительно вертикали. Все эти особенности конструкции скважины и технология

полевых работ приводят к записи сложной волновой картины, продольные, поперечные и обменные волны регистрируются на разных компонентах, что требует внимательного подхода к процедуре ориентации записи. С учетом имеющегося программного обеспечения в результате проведённого тестирования было выполнена процедура ориентация записи ВСП на пункт возбуждения.

Дальнейшие ожидаемые трудности возникли на этапе определения скоростей. На первоначальном этапе были определены скорости без учета преломления, которые плохо коррелировались со скоростями, полученными по АК и модельными данными и, как следствие, влияли на точность привязки данных ГИС, ВСП и МОГТ. Только после учета преломления получена наиболее адекватная скоростная модель ВСП, которая была использована для калибровки общей глубинно-скоростной модели. На рисунке 7 показаны итоговая скоростная модель по данным ВСП, скорости АК, а также обобщенная скоростная модель МОГТ по морским и сухопутным данным.

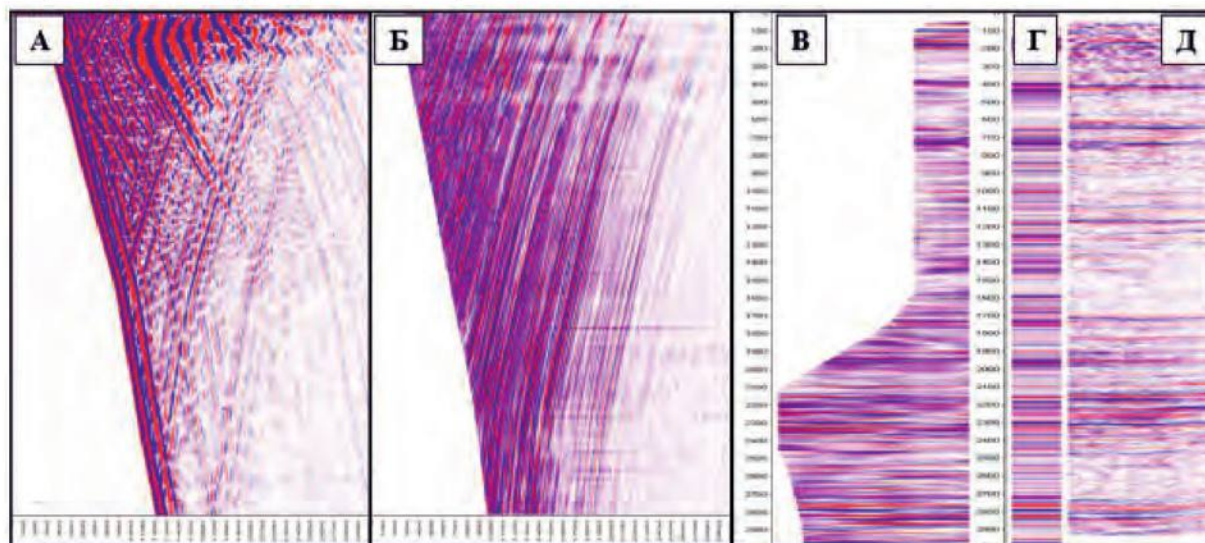


▲ Рис. 7. Сравнение скоростей ВСП, АК и МОГТ.

На рисунке 8 показан пример полевой сейсмограммы, поле отраженных волн после деконволюции, разреза ВСП, трассы однократных отражений и фрагмента 3D куба МОГТ.

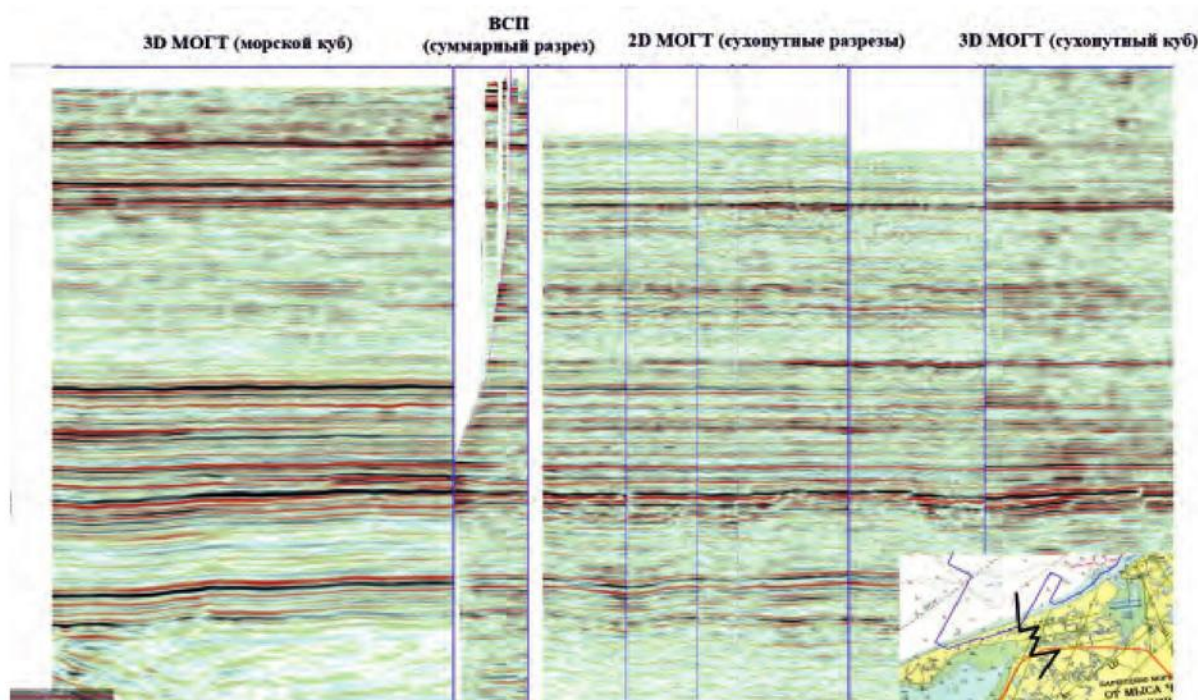
По результатам увязки данных ГИС, ВСП и МОГТ получен довольно высокий коэффициент корреляции как в целевом интервале (0,96), так и более широком окне.

▼ Рис. 8. Сопоставление данных ВСП и МОГТ (А- полевая сейсмограмма, Б – поле отраженных волн после деконволюции, В - разрез ВСП, Г – трасса коридорного суммирования, Д – фрагмент куба 3D МОГТ).



Прогноз анизотропных свойств [1] и оценка зон трещиноватости в настоящий момент является наиболее интересной и актуальной задачей для карбонатных объектов и данного региона. Как и ожидалось, для текущих условий удалось лишь частично решить данную задачу, в нашем случае была выполнена оценки VTI анизотропии. Наиболее достоверное значение параметров Томпсона ϵ получены в интервале до 850м для дальнего пункта возбуждения. Для более глубоких горизонтов, из-за влияния геометрии скважины, получились аномальные отрицательные значения. В связи с ухудшением прослеживания падающей поперечной волны в верхней части разреза и невозможностью идентифицировать одну и ту же волну в интервале до 800 м получены некорректные значения параметра γ , которые не могут быть использованы для дальнейшей работы.

Одним из преимуществ данных ВСП является возможность идентификации кратнообразующих границ и распространения кратных волн. В результате обработки данных ВСП кратные волны достаточно эффективно давятся процедурой



▲ Рис. 9. Композитный сейсмический профиль.

деконволюции и при совместном анализе с МОГТ позволяют их идентифицировать. Сравнение трассы коридорного суммирования ВСП и результатов обработки МОГТ показали визуальную сходимость волновых полей. Идентичные отражения отличаются, в основном, интенсивностью, что может говорить об эффективном подавлении кратных волн по результатам обработки данных МОГТ.

Для оценки характеристик разреза ниже забоя скважины и прогноза АВПД была выполнена акустическая инверсия трассы однократных отражений ВСП. В результате полученных расчетов удалось получить необходимую информацию и характеристиках нижезалегающих пород.

Наиболее важной задачей ВСП было получение сейсмического изображения между морским и сухопутными съемками МОГТ, для получения единой геологической модели исследуемого района. Для данных целей были отработаны выносные пункты возбуждения по азимуту проекции ствола скважины (удаление 270м и 781м). В результате обработ-

ки данных ВСП получен единый разрез (рис. 9), который позволил значительно закрыть зону отсутствия сейсмических данных.

На протяжении всего проекта особое внимание уделялось вопросам соблюдения требований промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды. Работы выполнялись в соответствии с Планом ПБОТОС, применялась система карт-наблюдений (фиксация и контроль устранения нарушений), на каждом этапе работ осуществлялась оценка рисков проекта. На подготовительном этапе и процессе полевых работ проводились регулярные аудиты задействованного оборудования и техники. Благодаря реализованным мероприятиям удалось выполнить весь объем работ без происшествий.

На рисунке 10 показана концептуальная схема выполнения проектов ВСП, которая была реализована на текущем проекте и позволила получить качественные данные ВСП, а также решить ключе-



▲ Рис. 10. Концептуальная схема реализации проектов по ВСП.

вые геологические задачи с учетом всех сложностей и ограничений.

Выводы

Выполненный проект можно считать эффективным, так как по результатам работ удалось решить ключевые геолого-геофизические задачи с учетом оптимальной методики и объемов работ в текущих условиях.

ВСП может быть эффективным инструментом для решения различных геолого-геофизических задач, на разных этапах геологоразведочных работ и разработки месторождений нефти и газа, при выполнении следующих условий:

- четкая постановка геолого-геофизических задач;
- выполнение сейсмогеологического моделирования для выбора и обоснования методики и технологии работ с учетом особенностей скважины, региона и оборудования;
- квалифицированный контроль полевых работ;
- детальный контроль обработки и интерпретационное сопровождение;

- анализ результатов работ с объективными выводами о качестве данных, решениях геолого-геофизических задач.

Благодаря комплексному подходу к реализации работ на данном проекте удалось успешно запланировать и выполнить работы ВСП с получением качественных данных, что позволило решить поставленные геолого-геофизические задачи и доказать эффективность работ ВСП.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность всем участникам, задействованным в процессе реализации проекта, особенно сотрудникам компаний АО «Башнефтегеофизика»/ООО «НПЦ Геостра».

Литература

1. Андреев А.Ю., Керусов И.Н., Бляс Э. А., Митин А.В., Черкашнев С.А., Моделирование и дизайн полевых работ ВСП МОГ для оценки VTI/TTI анизотропии, EAGE-2019, г. Тюмень, Россия.

2. Горбачев С.В., Титов А.Б., Обметко В.В., Рейдик Ю.В. Особенности планирования и выполнения 3D сейсморазведочного проекта в условиях предельного мелководья шельфа Печорского моря // Нефтяное хозяйство, №06, 2021.

3. Горбачев С.В., Яковлев А.П. Моделирование сейсмостъемок - инструмент повышения эффективности сейсморазведки // Seismic modelling – a tool to enhance seismic surveying // Oil & Gas Journal Russia. №10 (54), октябрь 2011.

4. Жужель А.С., Ленский В.А., Иркабаев Д.Р., Шарова Т.Н. Выбор модификации скважинной сейсморазведки при изучении околоскважинного пространства // Бурение и нефть, 2018. №9. С. 56-61.

5. Ленский В.А., Р.Я. Адиев, А.Я. Адиев «Скважинная сейсморазведка». – Уфа, 2012г-348с.

6. Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Горбачев С.В., Жуков А.П. Решение методических и геологических задач методом ВСП в условиях вечной мерзлоты // Геофизика, 6, 2019.

7. Шехтман Г.А. «Вертикальное сейсмическое профилирование» -М: ООО «ЕАГЭ Геомодель», 2017г-286с.

8. Шевченко А.А. «Скважинная сейсморазведка». – М: РГУ нефти и газа, 2002г- 129с.

9. Черкашнев С.А. Обучающий курс по ВСП «Основы и теория метода ВСП. Методики и технологии полевых работ, обработка и интерпретация данных ВСП».



Горбачев
Сергей Викторович

к.т.н., начальник
управления реализации
ГРП ООО «РН-Шельф-
-Арктика»



Титов
Антон Борисович

главный специалист
управления реализации
ГРП ООО «РН-Шельф-
-Арктика»



Черкашнев
Сергей Алексеевич

к.т.н.,
эксперт-консультант
по ВСП
ИП Черкашнев С.А.,



ГЕОФОНЫ БЕЗ КОРПУСА

- Вертикальные;
- Горизонтальные;
- Всенаправленные;
- Скважинные.

ГРУППЫ ГЕОФОНОВ

- Полевые;
- Трёхкомпонентные;
- Болотные.



РАЗЪЕМЫ

- Для групп геофонов;
- Для подключения к станции;
- Герметичные;
- Комплектующие к разъемам.

КАБЕЛЬНАЯ ПРОДУКЦИЯ

- Телеметрические кабели;
- Линейные сейсмические кабели до 100 жил;
- Сейсмокосы всех типов;
- Кабель сейсмический;
- Кабель электроразведочный.



Как можно работать еще быстрее. О некоторых особенностях интеллектуальной системы SmartSolo

■ Шарафутдинов В. О., SmartSolo Inc.



▲ Рис.1. Сейсмический датчик SmartSolo IGU-16.

Оборудование Smart Solo относится к семейству нодальных телеметрических систем. Оно компактно, оно надежно и очень простое в эксплуатации. Действительно, расстановка нодов типа IGU-16 на профиле требует гораздо меньше ресурсов сейсмоотряда и времени, чем расстановка любой кабельной системы, и научиться этому можно очень быстро. Вес одного блока составляет 1,1 кг, автономное питание поддерживает работоспособность прибора не менее трех недель, корпус прочный и герметичный.

Так на одном проекте в Тимано-Печерской провинции в текущем сезоне одновременно использовалось кабельное и бескабельное оборудование. Работы проводились в режиме 2D. Пункты приема располагались через 5 метров и преимущества легких нодов проявились очень ярко. Их было легко транспортировать. В один танк входило в 3-4 раза больше оборудования, чем кабельного. Одна сейсморигада расставляла за смену до 1000 шт. приборов, для чего требовался всего один МТЛБ (Рис.2.) И размотка происходила очень и очень быстро. А учитывая то, что при работе со SmartSolo вообще не требуется наладка, а извлечь прибор при смотке из-под глубокого снега также не требуется много

времени, преимущества системы перед кабельным оборудованием проявились очень ярко.

Данная система называется «интеллектуальной» по многим причинам

Длина записи сейсмограммы может быть любая. Так как идет постоянная запись, сейсмограммы могут быть «нарезаны» и сформированы любой длины. Время скачивания при обслуживании блоков при этом не увеличивается. Фактически, идет постоянная запись пассивной составляющей волнового поля. Такие задачи пока редко ставятся перед сейсморазведчиками – комбинация активной и пассивной сейсморазведки в одной съемке. Но учитывая то, что

▼ Рис. 2. Загрузка приборов SmartSolo в отсек смотки (до 1000 блоков).



пассивная составляющая волнового поля (при этом, стоит отметить, что запись начинается с 5Гц) может нести свою геологическую составляющую, постановка таких задач с использованием системы SmartSolo найдет своих заказчиков. И заказчик может получить такую информацию практически бесплатно, между делом. Да и длина годографа ограничена только физическим размером расстановки.

В процессе работы было выявлено еще одно замечательное преимущество интеллектуальной системы SmartSolo.

Как известно система работает без сейсмостанции. Фактически каждый датчик является полностью автономным сейсмическим каналом. Приборы записывают по заданному времени все данные на свой носитель памяти который находится внутри каждого датчика. Местоположение датчика фиксируется по встроенным приборам позиционирования. После завершения регистрации оборудование следует собрать с линий регистрации и отвезти на базу сеймопартии для скачивания материала, последующей его «нарезки» на сервере системы для анализа и обработки. Необходимо провести контроль качества, проверить работоспособность оборудования. Однако, порой, эта задача приводит к существенным потерям времени, когда база находится далеко, а оборудования недостаточно для организации быстрой конвейерной работы. Освобожденные отстрелом каналы вывозятся на базу, обслуживаются, одновременно заряжаясь, возвращаются в работу. Фактически останавливается работа на профиле на полдня.

Однако, в системе есть функция, когда прибор может регистрировать материал на одной координате, а после - на другой без обязательного скачивания материала.

Программными средствами сейсмические данные «расставляются» на свои места в массиве данных при последующем обслуживании на базе партии. Практически, после отработки участка профиля пунктами возбуждения и освобождении части расстановки, приборы загружались в смотку и везлись вперед для новой размотки на этом же профиле и обеспечения следующего отстрела. И этот конвейер происходил без остановки регистрации. Причем это происходило даже без выключения и перезагрузки блока. Достаточно просто визуального контроля включения датчика - зеленый включенный световой сигнал дает нам знать, что нод работает исправно.

Таким способом, например на 2D проектах, возможно отработать целиком несколько линий с перекидкой оборудования, и только после этого везти оборудование на базу для скачивания материала. На 3D площади с помощью такой функции возможно отработать целиком «блок» из большого количества физических наблюдений при которых возможно сделать много «перекидок» оборудования на новые координаты (линии и пикеты) без скачивания данных.

Как это работает

Ноды SmartSolo при расставлении на линиях регистрации не видят фактически номер линии и номер пикета куда устанавливается рабочим персоналом прибор. Датчик регистрирует фактические координаты, а именно долготу, широту и высоту над уровнем моря, где велась регистрация. Каждые 8 минут прибор обновляет свои данные местоположения. Таким образом если перенести прибор на другую линию регистрации новые данные местоположения сохранятся в памяти интеллектуального датчика.

ID	IGLU_Serial#	IGLU_Index	Begin_Time(UTC)	End_Time(UTC)	Total_Hours	GOS_Latitude	GOS_Longitude	GOS_Data_Status	Fit_Line	Fit_Point	Fit_Distance (M)	Fit_Radius (m)
doc_	350084692	1	2021-09-09 09:02:05	2021-09-10 23:44:17	38.70	61 24 55.331 N	114 49 17.427 E	Retrieved	2001.00	5026.00	0.25	5.00
doc_	350084692	1	2021-09-11 07:14:06	2021-09-11 23:14:09	16.00	61 24 53.643 N	114 48 47.435 E	Retrieved	2001.00	5076.00	0.72	5.00
doc_	350085647	1	2021-09-09 09:14:19	2021-09-11 00:33:23	39.15	61 25 01.823 N	114 50 55.586 E	Retrieved	2001.00	5073.00	0.82	5.00
doc_	350085687	1	2021-09-09 09:14:31	2021-09-11 00:27:55	39.25	61 25 03.248 N	114 51 03.545 E	Retrieved	2001.00	5080.00	0.65	5.00
			08:55	2021-09-11 00:41:09	9.54	61 25 00.302 N	114 49 21.294 E	Retrieved	2001.00	5065.00	0.18	5.00
			14:10	2021-09-11 00:30:06	39.25	61 25 02.729 N	114 50 53.106 E	Retrieved	2001.00	5084.00	0.05	5.00
			11:07	2021-09-11 00:33:19	9.37	61 25 01.835 N	114 50 42.233 E	Retrieved	2001.00	5077.00	0.93	5.00
doc_	350086942	1	2021-09-		9.79	61 24 59.029 N	114 50 02.037 E	Retrieved	2001.00	5003.00	0.14	5.00
doc_	350086943	1	2021-09-		8.94	61 24 53.900 N	114 48 59.114 E	Retrieved	2001.00	5015.00	0.60	5.00
doc_	350087199	1	2021-09-		9.26	61 24 53.278 N	114 48 50.773 E	Retrieved	2001.00	5010.00	0.01	5.00
doc_	350087387	1	2021-09-09 08:47:55	2021-09-10		34 N	114 48 53.413 E	Retrieved	2001.00	5011.00	0.29	5.00
doc_	350087985	1	2021-09-09 06:53:13	2021-09-10		79 N	114 49 03.428 E	Retrieved	2001.00	5017.00	0.95	5.00
doc_	350088556	1	2021-09-09 08:03:53	2021-09-11				Retrieved	2001.00	5051.00	0.01	5.00
doc_	350089377	1	2021-09-09 06:44:43	2021-09-10 23:52:17	38.13			Retrieved	2001.00	5007.00	0.32	5.00
doc_	350089460	1	2021-09-09 09:02:43	2021-09-11 00:30:33	38.75			Retrieved	2001.00	5057.00	0.73	5.00
doc_	350089531	1	2021-09-09 09:06:31	2021-09-11 00:41:48	39.55	61 25 00.178 N	114 50 20.637 E	Retrieved				
doc_	350089538	1	2021-09-09 09:12:55	2021-09-11 00:31:23	39.31	61 25 02.346 N	114 50 48.918 E	Retrieved				
doc_	350089888	1	2021-09-09 08:43:13	2021-09-10 23:58:20	39.25	61 24 52.638 N	114 48 42.464 E	Retrieved	2001.00	5005.00	1.14	5.00
doc_	350090770	1	2021-09-09 09:20:31	2021-09-11 00:21:47	39.02	61 25 04.375 N	114 51 15.555 E	Retrieved	2001.00	5097.00	1.35	5.00
doc_	350091137	1	2021-09-09 08:46:23	2021-09-10 23:51:53	39.09	61 24 53.143 N	114 48 49.154 E	Retrieved	2001.00	5088.00	1.70	5.00

▲ Рис. 3. Технология отождествления полезной информации из разных точек профиля из одного нода SmartSolo.

После того, когда информация с записью материала будет скачена и загружена в сервер с программным обеспечением SmartSolo. Сервер сопоставляет данные, а именно: сервер сравнивает координаты интеллектуального датчика с координатами линий и пикетов. При этом, сервер отображает все данные о регистрации каждого прибора: сколько времени велась запись материала на разных точках координат регистрации. После сравнения координат пикетов и линий, программное обеспечение самостоятельно «присваивает» ближайший нод к своей линии и номеру пикета по «SPS» файлам, которые передали топографический отряд.

На рис. 3 представлено, как это осуществлено на практике. Один и тот же нод, серийный номер 350084692, регистрировал данные на разных участках профиля. Показано точное время и сколько непосредственно велась регистрация в каждой точке. Учитывая высокую надежность оборудования SmartSolo, практически

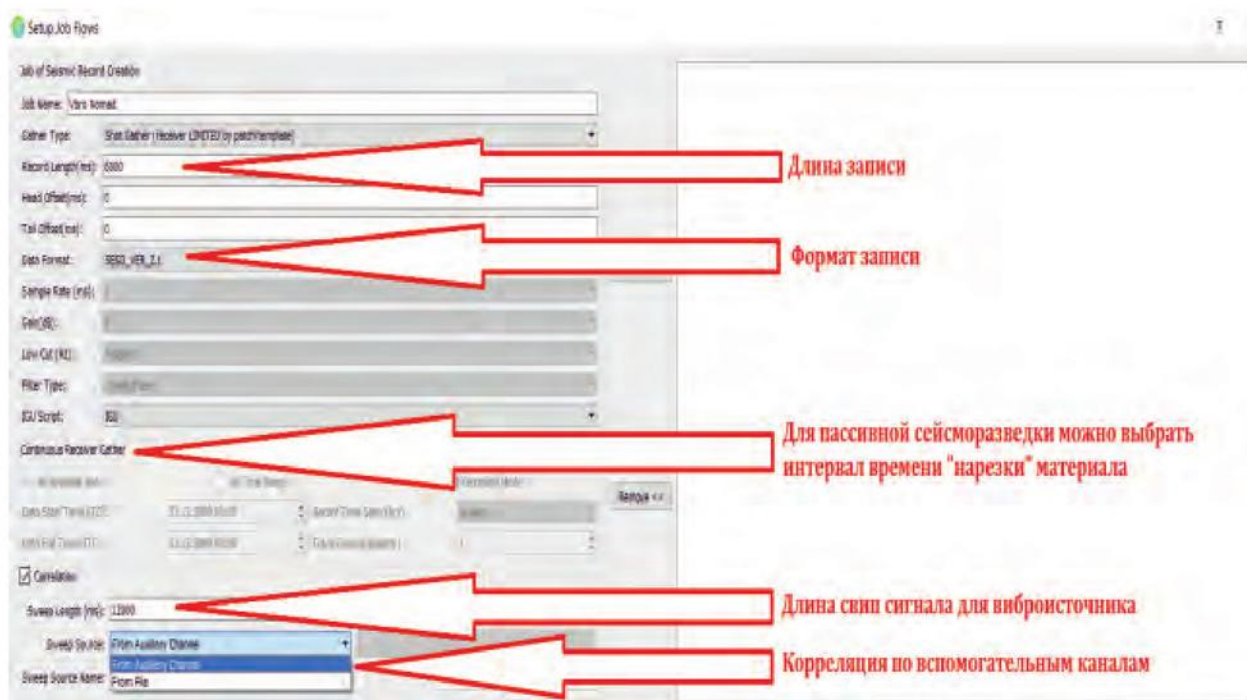
нулевое количество отказов блоков, вероятность полного извлечения полезной информации из блока, независимо от того, где велась регистрация, составляет 100%.

Интеллектуальные возможности SmartSolo позволяют многое

Одновременное использование нескольких типов источников с различными системами синхронизации

Сегодня на проектах часто требуется использовать несколько типов источника возбуждения, каждый из которых работает со своей системой синхронизации. На рис. 4. показано, как задаются параметры серверу, для правильной «нарезки» материала с разными источниками сейсмозаписей.

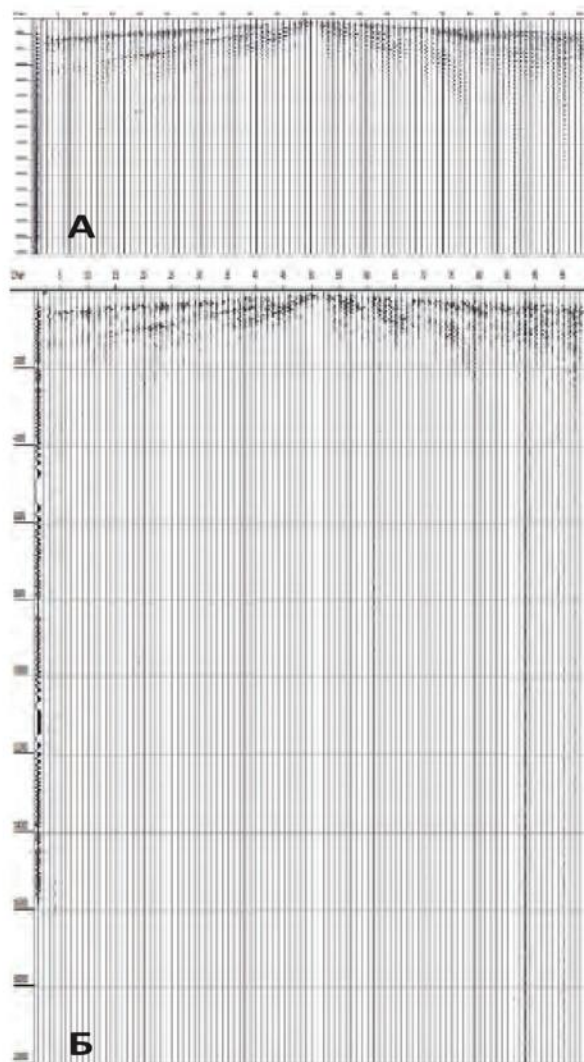
В программном обеспечении можно выбирать самые разные параметры нарезки материала. При взрывных источниках «корреляция» материала не нужна, поэтому можно убрать галочку напротив этого параметра и материал



▲ Рис. 4. Возможности программы SmartSolo по работе с различными типами источника.

при выходе будет неизменным так называемая «RAW» запись», так же корреляция не нужна при выводе виброграмм. Так же можно увеличить время записи выводимых данных, например поставить не 6000мс как показано на рисунке 5, а 20000мс, таким образом итоговая сейсмограмма станет длиной 20 секунд.

Нарезка материала осуществляется с момента GPS времени начала сейсмозвуждения. Программными средствами возможна редакция GPS времени прибора по времени системы синхронизации источника. Аналогично происходит работа со множеством накоплений виброисточника или импульсного источника возбуждения. Корреляция свип сигнала производится по данным со вспомогательных каналов. При этом,



► Рис. 5. Сейсмограммы с одного ПВ с различной длиной формирования:
А – 6 сек,
Б – 20 сек.

если свип сигнал единственный и его параметры не меняются на всем проекте, то можно перед началом работ записать единственный эталонный сигнал напрямую с виброустановки, после чего этот сигнал добавлять ко всем сейсмограммам для корреляции. В таком случае в дальнейшем вспомогательные каналы не нужны. Программное обеспечение суммирует накопления на каждом пикете на автоматическом уровне.

Заключение

Таким образом, нодальная система SmartSolo дает широкие возможности для проектирования полевых систем наблюдения любой сложности. Данное оборудование позволяет как реализовывать все сегодняшние задачи сейсморазведчиков, так и предоставляет уникальные возможности по расширению круга решаемых задач. Например, комбинирования активных и пассивных систем наблюдения любой сложности. До появления SmartSolo такие задачи перед сейсморазведчиками просто не ставились. Но есть уверенность, что знакомство заказчиков с широкими возможностями современной интеллектуальной системы, обязательно вдохновит их на эти и другие задачи.

Подробнее об авторах



Шарафутдинов
Владислав Олегович

инженер технической
поддержки
SMARTSOLO INC



СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
SKBSP.RU

РОССИЙСКОЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ

SCOUT-NT

*кабельно-бескабельный
сейсморазведочный комплекс*

Комплекс разработан для выполнения следующих проектов:



3D проекты любой сложности



4D проекты. Микросейсмический мониторинг месторождений и скважин с использованием геофонов, гидрофонов и сейсмографов.



Любые 2D проекты в любых условиях.



Проекты по изучению ВЧР.



Инженерные изыскания с минимальным интервалом квантования 0.25 ms.



Оборудование INOVA для сейсморазведки в сложных условиях – возможности и перспективы

■ Крисс Джейсон, INOVA

Вступление

Сегодняшние актуальные задачи поиска новых объектов заставляют сейсморазведчиков забираться все дальше и дальше в неизученные или малоизученные места. Однако это не обязательно географически удаленный регион. Это не только горы и далекие джунгли, куда не ступала нога исследователя, но высокоурбанизированные регионы, где технологически еще вчера было просто невозможно работать. Причем, задача поиска новых объектов на урбанизированных территориях в непосредственной близости к потребителям энергии, пожалуй, даже более важна, чем работа в непроходимых джунглях на краю света.

Развитие технологий сейсморазведки направлено именно на возможность работы на труднодоступных территориях. Успешное развитие сейсмического приборостроения делают проекты в чувствительных или сложных для эксплуатации зонах реальными. Современное сейсмическое оборудование отличается легким весом и низким уровнем воздействия на среду. Сегодня бескабельные системы могут быть развернуты в любой месте и почти незаметны для местного населения или животных. Компактные виброисточники вырабатывают большую мощность, и при этом могут работать на сложном рельефе с малым уровнем воздействия на среду, что даёт идеальное сочетание для малоизученных сейсморазведкой районов.

Бескабельное сейсмическое оборудование

С начала 2000-х годов количество проектов, выполненных с использованием бескабельного оборудования для сбора сейсмических данных постоянно увеличивается. В Северной Америке бескабельное оборудование практически полностью заменило кабельную телеметрию. И все больше фактов говорит о том, что эта тенденция реализуется и в общемировом масштабе. Эта революция в технологии была связана с двумя факторами. Первое - разработка и доступность экономичного, компактного надежного оборудования, позволяющего снизить себестоимость сейсмических проектов. Вторая причина заключается в полной автономности современных нодальных систем, что позволяет создавать гибкие системы наблюдения с учетом поверхностных условий и геологических задач. Благодаря этой возможности, полевые системы наблюдения могут быть развернуты с любым расстоянием между пикетами, практически в любых условиях, где возможна установка прибора. Именно широкие возможности при проектировании с применением бескабельных систем делает такую технологию сейсморазведки весьма популярной как среди подрядчиков, так и среди геологоразведчиков.

Многие перспективные площади не были до сих пор исследованы сейсморазведкой из-за затрудненного доступа по причине запрета землевладельцев на



▲ Рис. 1. Схема расстановки приемников на месторождении Марцеллус (США).
*Розовый цвет – невозможные для размещения оборудования участки.



▲ Рис. 2. Поверхностные условия на месторождении Марцеллус (США).

работы или труднопроходимого рельефа местности. Примером таких объектов является месторождение сланцев Марцеллус на северо-востоке США (рис. 1,2). Район гористый, местами покрыт густым лесом. Любой свободный от леса или гор участок используется в сельском хозяйстве. Причем, собственников земли очень много, их участки очень небольшие, что делает задачу получения разрешений на работы очень трудной. Владельцы участков, как правило, негативно относятся к геологоразведочным работам на принадлежащих им территориях. Тем не менее, бескабельная система

нашла применение на этом проекте, сейсмоки смогли работать практически без использования тяжелой техники с легкими транспортными средствами. После разворачивания оборудования и его закапывания в грунт, оно было мало-заметно для местного населения, не мешало движению животных.

Сейсморазведка может быть выполнена очень быстро и практически, без ущерба для окружающей среды и населения. Бескабельное оборудование Quantum зарекомендовало себя как очень надежное и удобное в работе (Рис.3.). Потери сейсмической информа-



◀ Рис. 3. Ключевые характеристики нодальной системы Quantum.

ции на выполненных проектах не превышали 1 %. Проблемы, связанные со временем автономной работы батарей, повреждением или кражей оборудования, теперь тоже становятся незначительными.

Бескабельное оборудование обеспечивает полную свободу действий при планировании съемок. Геофизики больше не ограничены интервалами конфигурации, определяемыми длиной кабеля между блоками в регистрирующей системе. Уплотнение или наоборот разрежение приемных пикетов в зависимости от геологических задач и поверхностных условий съемки сегодня стали еще одним инструментом, повышающим эффективность и качество сейсмических исследований.

Легкие виброисточники

Вопреки тенденциям последних десятилетий, когда виброисточники становились все более тяжелыми, легкие виброисточники внесли серьезный

вклад в расширение возможностей сейсморазведки во многих регионах. Их предпочитают из-за их небольшого размера, малого радиуса поворота и низкого воздействия на окружающую среду. Уже есть положительный опыт использования такого типа источника сейсмических колебаний, практически, на всех континентах земного шара.

Виброисточники малого размера легче транспортировать, легче использовать в городской среде или зонах, где существуют опасения относительно шума/помех или движения грунта. Как и крупные виброисточники, малогабаритные виброисточники также могут работать в режимах специальных свип-сигналов и методик высокопроизводительных работ.

На рис. 4 показан виброисточник INOVA UniVib2, успешно задействованный при выполнении проекта в Сицилии. Этот вибросейсмический источник весом 15 тонн может точно воспроизводить свип-сигналы в диапазоне 1,5–300 Гц.

▼ Рис. 4. Виброисточник INOVA UniVib2 или UV2 на проекте в Сицилии.



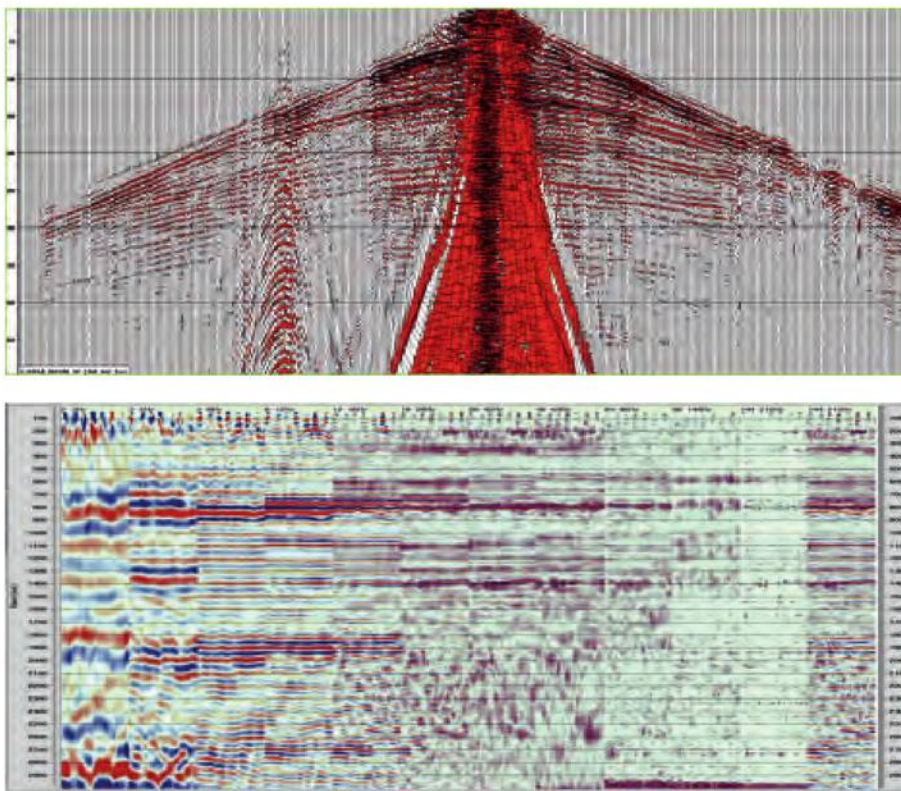


Рис. 5.
Сейсмограмма
и полосовая
фильтрация
с проекта
в Альберте,
2015 г.
Источник
возбуждения -
легкие
виброисточниками,
СВИП 5-250 Гц.

Небольшие габариты и относительно узкая колесная база позволяют ему иметь доступ к зонам, которые недоступны для больших виброисточников.

Большим достоинством компактного источника являются его геофизические характеристики. В производственном режиме виброисточники генерируют сигнал от 1,5 Гц до 250 Гц. (Рис.5.)

Тесты показали, что частоты до 280 Гц можно наблюдать на глубине 2,5 км при проведении ВСП.

В пустынях Ближнего Востока UniVib весом 12 тонн работали на одних проектах, с виброисточниками весом 36 тонн, отрабатывая участки, куда тяжелый виброисточник не мог пройти. После обработки данные, полученные с участков, отрабатанных компактными виброисточниками, имели такое же качество, как и данные с участков, отрабатанных тяжелыми виброисточниками.

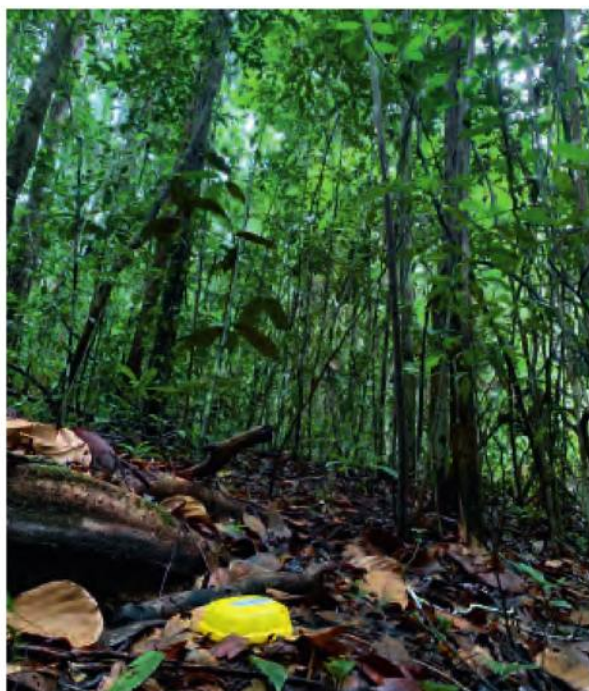
Сейсморазведка с минимальным воздействием на среду и без потери качества геофизических данных

Сочетание бескабельного оборудования и компактных виброисточников обеспечивает очень низкий уровень воздействий на среду практически без потери качества геофизического материала. Это сочетание оборудования и точного оперативного управления успешно используется в национальных парках и крупных городах, а также в других районах с ограниченным доступом. Поскольку бескабельные системы легко масштабируются, можно использовать конфигурации с высокой плотностью расстановки. Расстановки с высокой плотностью приемников обладают лучшим качеством данных по сравнению с более разреженными конфигурациями, относительно показателей ослабления шума и явных преимуществ в обработке.

Легкий виброисточник небольшого размера обеспечивает получение хороших отражений от объектов на глубине до 3 км на таких площадях, как рифтовый бассейн Джорджии и Оман. Малый размер и небольшая площадь опоры виброисточника уменьшают повреждение ландшафта в тех местах, где требуется рубка профилей. Объемы рубки профилей уменьшаются, поскольку виброисточник может маневрировать на профиле шириной до 4 метров. В городских условиях бескабельное оборудование может быть спрятано или закопано во время его расстановки, делая его малозаметным для местного населения, что уменьшает количество краж и порчи.

Сочетание этих двух технологий идеально, при проведении сейсморазведки с низким воздействием на среду в недостаточно изученных урбанизированных регионах и иных сложных сейсмогеологических условиях.

▼ *Рис. 6. Для работы с нодальной системой Quantum не нужно рубить лес.*



Подробнее об авторе



Крисс Джейсон

Главный геофизик
компании
INOVA



Геомодель 2022

24-я конференция по вопросам геологоразведки
и разработки месторождений нефти и газа



Важные даты

**Окончание
регистрации по
льготному тарифу**
1 июля 2022 г.

**Окончание приема заявок
на коммерческие презентации
и выездной практический курс**
1 августа 2022 г.

Направления тем научных сессий

Общая геология и региональные сессии
Геофизические исследования
Обработка и интерпретация геолого-геофизических данных
Методы промысловой геофизики и петрофизики
Количественный анализ геолого-геофизической информации
Разведка и разработка месторождений
Геомеханика
ТРИЗ
Машинное обучение и искусственный интеллект
Цифровизация процессов обработки данных
Экономическая эффективность ГРП

**ОКОНЧАНИЕ ЛЬГОТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ -
1 июля 2022 г.**

5-8 сентября 2022 г. | Геленджик, Россия

www.geomodel.ru



Уважаемые Коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в 7-й международной научно-практической конференции ГЕОФЕСТ-2022 на тему «Тенденции современной сейсморазведки».

Основными вопросами обсуждения на данной конференции станут тенденции развития сейсморазведки на современном этапе, связанные с проведением полевых работ, обработкой, интерпретацией сейсморазведочных данных, использования сейсмических инновационных технологий в решении различных геологических задач, комплексирование геофизических методов.

Организаторы собирают заинтересованных специалистов из России, Беларуси, Казахстана и других стран. Конференция имеет конкретную научно-практическую направленность и предоставит основу для создания контактов и консолидации специалистов по геологии и геофизике – представителей производства и науки.

В рамках мероприятия планируется:

- презентации и демонстрации новейших разработок;
- презентации результатов выполнения реальных проектов сейсмических исследований с применением передовых технологий полевых наблюдений и программных продуктов обработки и интерпретации данных;
- представление современных сейсморазведочных методик и методических приемов;
- обмен опытом проведения работ на площадях с различными сейсмогеологическими условиями;
- рассмотрение способов и результатов комплексирования сейсморазведки с другими геофизическими методами.

Конференция состоится с 12 по 15 июля 2022 года в подмосковном комплексе «Свежий ветер» (Курово, Московская область, Дмитровское направление)

Регистрация доступна по ссылке geofest.timepad.ru/event/2030938/

С уважением
Председатель орг. комитета

Сергей Гурьев



Your Gateway to Business in Eurasia

Стратегический и управленческий консалтинг на нефтесервисном рынке Ближнего Востока

Анализ состояния рынка и перспективных направлений в регионе под интересы клиентов;

Разработка стратегии входа на рынок;

Поиск и подбор решений по расширению и оптимизации бизнеса в странах Ближнего Востока;

Развитие Вашего бизнеса «под ключ».

Партнерство

Представление интересов клиента в странах региона;

Поиск местных партнёров и заказчиков, организация переговоров;

Привлечение инвестиций под перспективные проекты.

Поставки оборудования и разработка технологических решений

Аренда и продажа нового и бывшего в употреблении оборудования и комплектующих для геологоразведки на море и на суше;

Подготовка проектных решений под запрос.

Россия, г. Москва:
+7 (985) 222 48 44

Россия, г. Уфа:
+7 (347) 246 90 74

ОАЭ, г. Дубай,
+971(56) 170 2553

info@eurasia-oil-services.com



www.eurasia-oil-services.com

Сейсморазведка своих не сдает.

Разве что в аренду.



Аренда сейсморазведочного оборудования

SERCEL 428/508 – регистрирующая система для работ на суше и в транзитных зонах

Aram Aries II – телеметрический комплекс

RT 2 System – гибридная система регистрации с беспроводной передачей данных в режиме реального времени

ГЕОТОН – семейство невзрывных импульсных сейсмоисточников

SLIM WAVE – внутрискважинная телеметрия в реальном времени, для ВСП, межскважинных и микро-сейсмических работ.

G-SOURCE / BOLT – пневматический сейсмоисточник

Судно шутер «Скат»
для сейсморазведки в транзитных зонах

Катамараны проекта «Гео»
для проведения геофизических и инженерно- геологических работ

Тел/факс: +7 (495) 694-1940 – круглосуточно
E/mail: info@geoton.ru www.geoseisholding.ru



ХОЛДИНГ ГЕОСЕЙС