

ISSN 2074-8906

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

ЯНВАРЬ-МАРТ

1/2021

Издается с 2002 г.

ТЕМА НОМЕРА:

НЕВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ



ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

Адаптивные технологии вибросейс

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

СОВЕРШАЕТ ПЕРЕВОРОТ В СТОИМОСТИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

работы ведутся
вдвое быстрее

на 50% уменьшается
количество рабочих бригад
и техники на проекте

на 50% снижена
операционная
стоимость проекта

IGU-16 / IGU-16HR



IGU-16HR 3C



IGU-BD3C-5



IAU-19



ВЫСОКОПЛОТНУЮ СЕЙСМОРАЗВЕДКУ ТЕПЕРЬ МОЖНО ДЕЛАТЬ ДЕШЕВО!

«ВКонтакте»



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

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

Общие глобальные поставки

300,000
каналов

ТЕМА НОМЕРА:**Невзрывные технологии в сейсморазведке****СОДЕРЖАНИЕ:****Наши партнеры 4****КОЛОНКА РЕДАКТОРА****Главный редактор журнала Слонов Д.Н. 5****ТЕМА НОМЕРА****Titan – инновации в конструкции виброисточников 6****Результаты анализа полевых данных OMP МОГТ-3D, полученных по технологии возбуждения сигнала в движении GLIDE****Кузнецов Е.С., Баландин П.В., Дробинский А.А., Череповский А.В 12****Применение кусочно-линейных разверток с целью уменьшения опасности разрушения зданий и сооружений при проведении вибросейсмических работ****Кострыгин Ю.П. 20****Аппаратно-программный комплекс VIBROPS для малоглубинных исследований на основе электромеханического вибрационного источника****Серебряков В.С., Жуков А.П., Соловьев А.О. 27****Точность вибрационного излучения. Новые возможности контроля****Циммерман В.В., Закариев Ю.Ш., Зозуля А.П. 36****Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть I****Жуков А.П., Коротков И.П., Тищенко А.И. 44****ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ****Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на динамические и кинематические свойства отраженных волн****Романов В.В. 58****Перспективы технологии беспроводной регистрации сейсмических данных в режиме реального времени****Скотт Уильямс 64****Изучение активных разломов в городских условиях Пекина с помощью пассивной сейсморазведки, выполненной приборами SmartSolo****Лю Ланьбо 69**

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Современные технологии выполнения сейсморазведочных работ с использованием БТСС семейства SCOUT

Тарасов Н.В., Гнатюк А.И. 78

SmartLF как инструмент для мощного и стабильного уменьшения искажений низкочастотного сигнала

Жиль Оливрэн, Николя Тэлье 87

НАШИ ПАРТНЕРЫ



Сиб Геофиз Прибор

Приборы и системы разведочной геофизики.

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

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.
д.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.
д.т.н. Шнейерсон М.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:
01.03.2021

Дата выпуска:
15.03.2021

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

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: psrgео.ru

Дорогие коллеги!

Решение уменьшить на целый месяц сроки подготовки очередного номера мы принимали с известной долей тревоги. А вдруг, наши авторы не соберутся после новогодних праздников в разгар зимнего полевого сезона и не успеют подготовить интересные публикации. А выход номера очень хотелось приурочить к ежегодной конференции «ГеоЕвразия-2021» - знаковому событию для всей отрасли. Наш журнал выступает информационным партнером конференции, которая впервые пройдет онлайн 2-5 марта 2021 года. Электронную версию журнала получают все участники события.

Но наши опасения были абсолютны напрасны. Статей много, они очень интересны. Более того, в этом номере на «вечную тему» невзрывных технологий оказались представлены практически все основные производители геофизического оборудования. В качестве анонса перечислю участников первого номера журнала: Sercel, SmartSolo, Wireless, INOVA, СКБ СП, Геофизические системы данных, Геоспейс, Сибгеофизприбор, Геосейс. Специалистам-геофизикам хорошо знакомы эти компании и их продукция, но представленные в журнале публикации наверняка дадут новую информацию.

Хочу выделить две публикации компании «Геотек Сейсморазведка». Радует, что несмотря на очень непростое время, геофизики продолжают заниматься наукой и развитием технологий. Несомненно, руководство холдинга понимает, что такие вложения сторицей окупятся, давая дополнительные преимущества на конкурентном рынке геофизических услуг.

Весьма радует активизация компании INOVA в части продвижения своих новинок. Очень приятно, что именно наш журнал первым расскажет в России о новом виброисточнике АНВ-V. Да и вообще достойная конкуренция производителей геофизического оборудования пойдет на благо всей геофизической отрасли.

Следующий номер будет посвящен бескабельным технологиям в сейсморазведке. Сегодня на рынке представлены десятки модификаций такого оборудования, мы постараемся рассказать о них очень подробно. Многие производители уже заявили во второй номер.

Но бескабельные технологии – это не просто модули и блоки, позволяющие обойтись без кабелей - это иная идеология сейсморазведки. Мы открываем дискуссию о всех аспектах сейсморазведки «нового поколения», как ее называют сами производители таких систем. Мы ждем рассказ об успешных проектах и новых направлениях геофизических услуг, которые можно реализовывать подобным оборудованием.

Интересного вам прочтения журнала «Приборы и Системы разведочной геофизики».

С уважением,

Главный редактор журнала

«Приборы и Системы разведочной геофизики»



Слонов
Дмитрий
Николаевич

Titan - инновации в конструкции виброисточников

В последние 10 лет сейсморазведка все больше интересуется низкочастотными характеристиками гидравлического вибросейсмического источника. Инновации в области вибросейсмике значительно улучшили характеристики вибросейсмического источника и точность генерируемого сигнала по сравнению с технологиями, которые были доступны в начале 2000-х и 1990-х годах. Titan AHV-V 480 от INOVA является кульминацией исследований и инженерных инноваций, которые привели к созданию нового поколения высокоточных вибросейсмических источников. Многие технические инновации Titan основаны на многолетнем опыте разработки и производства лучших в мире вибросейсмических источников. В этой статье будут обсуждаться инновации, которые делают Titan самым современным в мире крупным вибросейсмическим источником, и представлены некоторые усовершенствования, которые рассматриваются на будущее.

Гидравлический вибросейсмический источник - история инноваций

AHV означает «шарнирно-сочлененное гидростатическое транспортное средство». Это технология, первоначально разработанная компанией Conoco, а затем запущенная в производство компанией Western Geophysical и другими. Развитие линейки вибросейсмических источников AHV значительно ускорилось, когда в 1990-х годах она была приобретена компанией Input/Output. В то время как фундаментальный багги конструкции AHV практически не изменился, основной компонент вибросейсмической системы продолжил совершенствоваться благодаря улучшенным инженерным методам, которые позволили произвести виброисточники AHV-IV PLS-380 и PLS-364 в 2006 и 2009 годах, соответственно. В 2010 году вибросейсмическая технология стала частью семейства продукции INOVA®, и с тех пор INOVA поставила на рынок сотни вибросейсмических источников AHV-IV, которые используются до сих пор.

INOVA представила новую вибросейсмическую технологию с очень популярным источником UniVib, предшественником UniVib2, вибросейсмическими

источниками меньшего размера с максимальным весом 26 000 фунтов (около 11 800 кг) и 34 000 фунтов (около 15 400 кг); и новейший большой вибросейсмический источник, AHV-V Titan, гигант весом 80 000 фунтов (около 36 300 кг) - (рис. 1). И UniVib2, и Titan представляют собой совокупность технологий и опыта, накопленных за 50-60 лет разработки вибросейсмических систем, которые были сконструированы и использовались почти во всех регионах и природных условиях мира.

Повышение точности воспроизведения

Основной компонент вибросейсмической системы называется возбудителем вибрации. Эта система состоит из гидравлической части, серии клапанов и тяжелой массы, соединенной с опорной плитой, контактирующей с землей. Эта система управляется электроникой, приводящей в действие систему клапанов, чтобы воспроизводить свип-сигнал в пространственно-временной области с высокой точностью. Взаимодействие всех этих критических элементов возбудителя может повлиять на точность характеристики силы, излучаемой в землю.



▲ Рис. 1. Новый вибросейсмический источник Titan, работающий во время полевых испытаний в пустыне.

Первые попытки моделирования продемонстрировали, что опорная плита является критически важным элементом для правильной передачи силы. Было показано, что при проведении свип-сигнала в полевых условиях опорная плита вибросейсмического источника будет изгибаться. Этот изгиб базовой плиты приводит в результате к потере излучаемой энергии и искажению сигнала. В соответствии с этим пониманием опорная плита ANV-IV 364 была разработана примерно в 2,5 раза жестче, чем предыдущие опорные плиты на более старых моделях виброисточников. Одно только это улучшение в значительной степени улучшило точность вибросейсмического сигнала. В то же время были выявлены другие проблемы, связанные со стабильностью гидравлической системы. Вибросейсмические источники более старого типа показали, что гидравлическое давление будет быстро колебаться при свипировании. Эта проблема также была исправлена в версии устройств ANV-IV, что привело к значительному улучшению выходной мощности на высоких частотах. Стабилизация гидравлического давления уменьшила

искажение вибросейсмического сигнала на более высоких частотах.

Улучшения на низких частотах

Когда проект Titan был впервые задуман, он в первую очередь ориентировался на две основные цели.

Первая цель заключалась в улучшении низкочастотных характеристик силы вибросейсмического источника, а вторая - в поддержании и улучшении любых предыдущих фундаментальных улучшений, уже достигнутых ранее.

Улучшение характеристик низких частот может быть достигнуто только путем изучения основ физики. Второй закон Ньютона показывает нам, что сила зависит от массы и ускорения. Существенное увеличение массы было бы затруднительным для мобильного транспортного средства, которое и так очень тяжелое, но ускорение можно увеличить с помощью более длинного хода поршня.

Ход поршня Titan составляет 17,78 см, что почти в два раза больше, чем у вибросейсмических установок более старого поколения. Увеличенный ход поршня Titan приводит к значительному увеличе-



▲ Рис. 2. Теоретический график зависимости усилия от частоты вибросейсмического источника Titan и AHV-IV 380 Renegade. Увеличенный ход поршня Titan приводит к существенному увеличению усилия на низкой частоте.

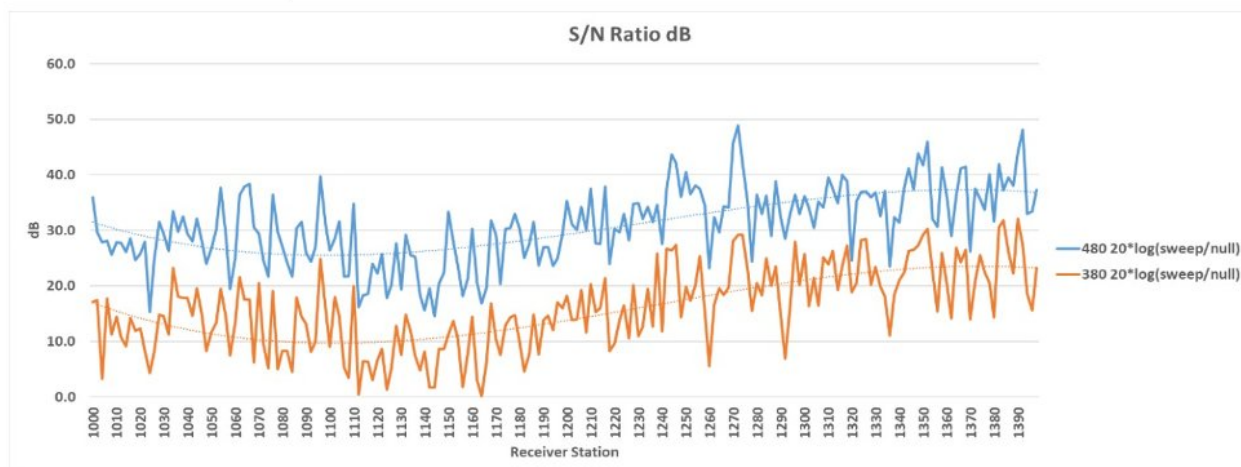
нию излучаемой силы в диапазоне 1-7 Гц. (Рис. 2)

Вторая цель состояла в том, чтобы продолжать повышать жесткость опорной плиты. Это достигается за счет дальнейшего укрепления структуры опорной плиты и путем добавления дополнительных изолирующих пневмоопор к прижимной конструкции.

Вибросейсмический источник Titan имеет 12 пневмоопор, которые равномерно распределяют прижимной вес по всей поверхности опорной плиты, приво-

дя к повышенной устойчивости к изгибанию. Для поддержки механических изменений были внесены усовершенствования в гидравлическую систему, которые увеличили объем гидравлического потока и заставили гидравлическую систему реагировать быстрее. Результатом стал новый вибросейсмический источник с существенно улучшенной выходной силой на низких частотах, в котором используются преимущества длительного опыта технических инноваций и улучшений.

▼ Рис. 3. Разница в излучаемых шумах между Titan и вибросейсмическим источником AHV-IV 380 Renegade более старого поколения, записанных на профиле 2D во время полевых испытаний. График показывает среднеквадратичный шум, зарегистрированный геофонами, расположенными на глубине 10 см. Во время этого теста вибросейсмический источник не свипировал.



Излучаемый шум

Когда вибросейсмический источник работает, он излучает шум нагрузки. Вибросейсмические источники более старого поколения могут излучать более 100 дБ слышимого шума. Этот шум вызывает колебания грунта, которые регистрируются расставленными датчиками, даже в том случае, если датчики находятся под землей. Основным источником слышимого шума на вибросейсмическом источнике являются охлаждающие вентиляторы, регулирующие температуру гидравлической жидкости. Вентиляторы охлаждения на Titan были разработаны для уменьшения излучаемого звукового шума. Полевые испытания (рис. 3) продемонстрировали, что Titan на 17 дБ тише, чем вибросейсмические источники старого поколения. Эти результаты существенно снизят уровень шума, регистрируемого датчиками, и еще больше улучшат регистрируемые данные, когда сейсмические партии работают с Titan.

Дизайн свип-сигнала

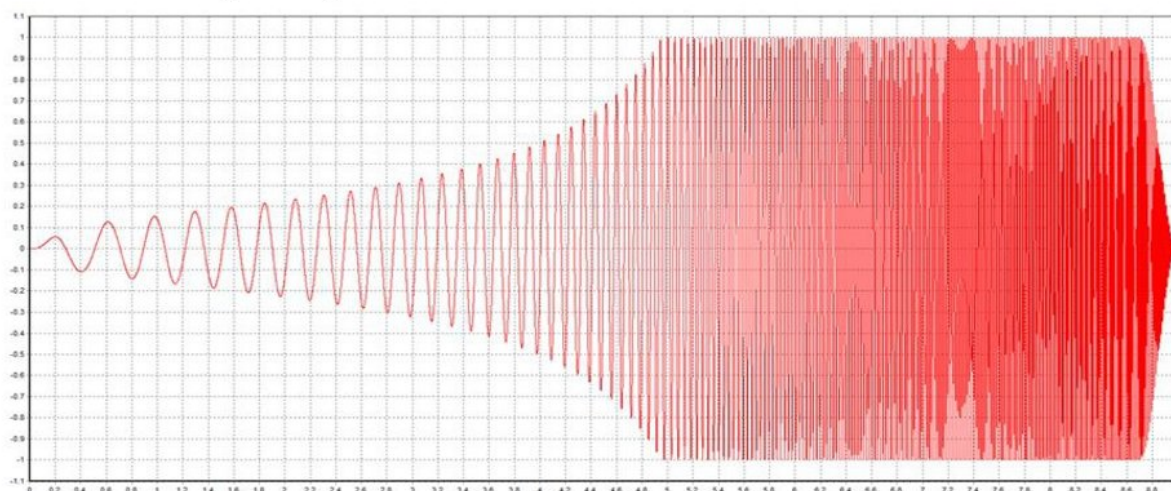
В тот же период, когда разрабатывался Titan, INOVA начала разрабатывать специальные свип-сигналы с намерени-

ем улучшить выходную мощность вибросейсмического источника на низких частотах. Иногда это называется свип-сигналом с медленной разверткой, он разработан, чтобы соответствовать низкочастотной характеристике силы отдельного вибросейсмического источника и включает в себя увеличение продолжительности периода развертки этого свип-сигнала (рис. 4). Результатом являются сложные свип-сигналы, которые имеют нелинейную и линейную часть со временем перехода. Специальные свип-сигналы с медленной разверткой, улучшающие низкочастотный выходной сигнал, теперь распространены во многих регионах мира, поскольку было показано, что они увеличивают низкочастотную составляющую записанных данных.

Будущие инновации

Вибросейсмическая технология продолжает развиваться. Многие будущие инновации будут обусловлены требованиями к высокопроизводительной съемке. На сегодняшний день в регионах мира с открытой местностью достигнуты показатели съемки, превышающие 50 000 точек возбуждения в день. Развитие

▼ Рис. 4. Свип-сигнал с медленной разверткой, в которой 5 секунд сосредоточены на силе низкой частоты, а 5 секунд - на линейной части свип-сигнала.



технологий, которые упростят процесс съемки, откроет возможности для дальнейшего повышения производительности.

Большое внимание уделяется не только производительности, но и соответствию новым нормам, касающимся выбросов и шума. Усовершенствования технологии двигателя и конкретных компонентов будут направлены на выполнение некоторых из этих потребностей.

В более умных виброрейсмических установках используются технологии грузовой автомобильной промышленности, которые позволяют в реальном времени контролировать критические функции, повышают безопасность и улучшают техническое обслуживание; эти особенности повысят ценность технологии. Автоматизация, такая, как система помощи водителю, поможет увеличить скорость частоты накоплений и перемещения между ПВ и поможет устранить часть курса обучения для новых водителей.

Резюме

Новый ANV-V Titan - это последнее поколение больших виброрейсмических источников INOVA. Первое коммерческое использование Titan для производственной съемки произошло в январе 2021 года с большой партией установок, после нескольких лет разработок и испытаний. Titan использует преимущества десятилетий инженерного и производственного опыта и опирается на функции, которые сделали виброрейсмическую успешной, при одновременном улучшении функций, которые приведут к лучшим геофизическим характеристикам. Улучшенная передача на низких частотах, более точная передача сигнала и низкий уровень излучаемого шума в совокупно-

сти делают виброрейсмический Titan от INOVA наиболее технологически совершенным виброрейсмическим источником на рынке.

Литература

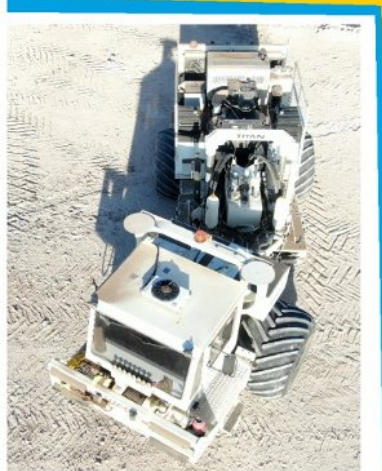
- Уменьшение гармонического искажения на Виброрейсмических – Более жесткая Опорная плита З. Вэй, ЕАГЭ Рим 2008
- Анализ поведения виброрейсмического и геофона на твердом и мягком грунте, З. Вэй, Leading Edge, февраль 2011 г.
- Расширяя диапазон частот виброрейсмического: Расширение низких и высоких частотных пределов, З. Вэй, First Break Volume 26, март 2008 г.
- Расширяя диапазон частот виброрейсмического - Как низко мы можем уйти? З. Вэй, Саллас, Тите, ЕАГЭ. Лондон 2007



Поднимая планку для широкополосной виброрейсмики

AVH-TITAN был разработан для увеличения выходного усилия на низких частотах и сохранения производительности при работе в широком диапазоне частот.

TITAN использует увеличенную длину хода поршня и модернизированную гидравлическую систему, чтобы обеспечить увеличенное почти в два раза усилие на низких частотах по сравнению с обычными виброрейсмическими источниками.



- Пиковое усилие до 80 000 фунтов
- Частотный диапазон 1–130 Гц
- Увеличенное в два раза усилие на низких частотах по сравнению с обычными виброрейсмическими источниками
- Выход на полную мощность - 4,2 Гц

AVH-V TITAN



Результаты анализа полевых данных OMP МОГТ-3D, полученных по технологии возбуждения сигнала в движении GLIDE

- Кузнецов Е.С., ООО «ГЕОТЕК-ВГК», ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Баландин П.В., ООО «Эвенкиягеофизика», ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Дробинский А.А., ООО «ГЕОТЕК-ВГК», ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»
- Череповский А.В., НТЦ, ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка»

Показаны перспективы и преимущества применения импульсного источника в движении с малым шагом возбуждения. Несмотря на высокий уровень регулярных и случайных помех на исходных записях, полученных по технологии GLIDE (без традиционного накапливания), гораздо более высокая плотность трасс позволяет получить более достоверные и детальные изображения геологической среды. Выполненные OMP и последующий анализ полученных данных подтвердили высокий методический и экономический потенциал технологии GLIDE, а также практическую готовность ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» к применению новой высокопроизводительной технологии в производственных условиях на проектах в Западной и Восточной Сибири.

Актуальность применения технологии GLIDE в современных условиях

Сезон полевых сейсморазведочных исследований на территории Восточной Сибири ограничен 4-5 зимними месяцами. В условиях сокращения полевого сезона, вызванного климатическими изменениями [1], выполнение масштабных сейсморазведочных проектов 3D иногда растягивается на 4-5 лет. Методики высокопроизводительной сейсмики позволяют существенно ускорить выполнение таких работ. В полевом сезоне 2019-2020 гг. компанией «ГЕОТЕК Сейсморазведка» были выполнены опытно-методические работы (OMP) на территории Мирнинского участка недр (Республика Саха, Якутия) по технологии возбуждения сигнала импульсным источником в движении GLIDE [3, 4] в контуре производственных работ по стандартной методике. В данной работе выполнено сопоставление методик полевых работ, полученных данных и результатов их предварительной обработки.

OMP были проведены с целью оценки возможности получения кондиционных результатов по технологии возбуждения сейсмических сигналов в движении. Объем работ составил 22,77 км². По стандартной методике было зарегистрировано 1608 ф.н. за 10 дней, в то время как по технологии GLIDE было отработано

но 16833 точек возбуждения за 2,5 дня.

Опытный участок (рис.1) расположен в условиях пологоволнистой равнины с уплощенными водоразделами и относительно неглубоко врезанными долинами рек. Абсолютные высотные отметки в интервале от 305 до 375 м. Залесённость достигает 50%. Высота деревьев от 18 до 25 м.

Возбуждение сигнала осуществлялось спаркой двух импульсных источников СЭМ-100, буксируемых трактором (рис.2). По линиям возбуждения трактор двигался со скоростью 2,5 км/ч, что позволяло поддерживать временной

▼ Рис. 1. Участок OMP на космоснимке.



интервал между воздействиями 7,5 с при шаге ПВ около 5 м. Регистрация велась на все линии приёма, размотанные на участке ОМР. Работы не останавливались при превышении уровня шума 10 мкВ в пределах приемной расстановки, принятого как стандартное пороговое значение при производстве сейсморазведочных работ в данном районе исследования.

Сопоставление методик полевых работ

Характеристики систем наблюдения приведены в Табл. 1. Трассы вне стандартной расстановки были исключены из расчетов. Как мы видим, кратность наблюдений в бине 25 x 25 м отличается в 10 раз. Количество трасс, зарегистрированных по технологии GLIDE, было бы сопоставимо с работами по стандартной методике в том случае, если бы при стандартных работах велась запись каждого отдельного накопления (без

▼ Табл. 1.

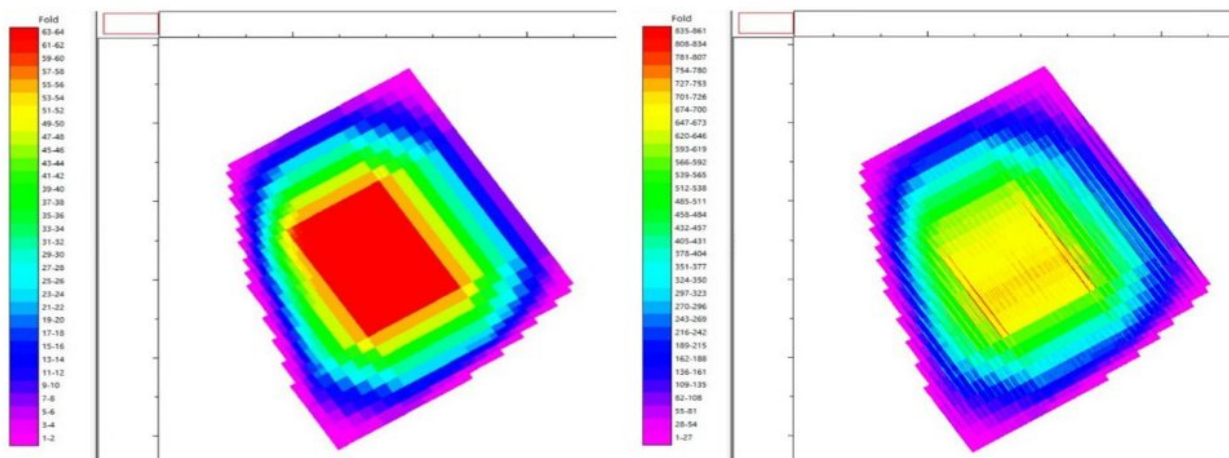
1	Методика работ	Стандартная	GLIDE
	Система наблюдения	центральная, симметричная, типа «крест»	центральная, симметричная, типа «крест»
	Кратность наблюдений номинальная	64	~640
	Расстояние между линиями приема, м	300	300
	Расстояние между линиями возбуждения, м	300	300
	Расстояние между ПП, м	50	50
	Расстояние между ПВ на линии возбуждения, м	50	~5
	Количество регистрируемых активных каналов	1536 (16 x 96)	1536 (16 x 96)
	Минимальное удаление ПВ-ПП, м	34	19
	Максимальное удаление ПВ-ПП, м	3360	3344
	Плотность ПВ на 1 кв. км	70.8	742.2
	Плотность трасс на 1 кв. км	102 400	1 024 000
	Бин, м	25 x 25	25 x 25
2	Параметры регистрации		
	Шаг квантования, мс	2	2
	Длина записи, с	4	4
3	Источники сейсмических колебаний	Енисей СЭМ-100	Енисей СЭМ-100
	Количество источников в группе	4	2
	Количество накоплений	8	1
4	Приёмники сейсмических колебаний	GS-20DX	GS-20DX
	Количество сейсмоприемников в группе	6	6
	База группирования	точечная	точечная



▲ Рис. 2. Спарка источников СЭМ-100 при динамическом возбуждении.

суммирования). Достигнутая плотность трасс на 1 кв. км, как и размер бина, не позволяют отнести данные к высокоплотным в общепринятом смысле [2].

Кратность ОГТ (рис.3) в зоне полной кратности съёмки по технологии GLIDE неравномерна: местами выше номинальной и изменяется в пределах 15%, что связано с некоторой нерегулярностью в размещении ПВ, обусловленной возбуждением импульсного источника в непрерывном движении.



▲ Рис. 3. Сопоставление схем распределения фактической кратности ОГТ (слева – стандартная методика, шкала до 64; справа – GLIDE, шкала до 860).

Анализ качества полевого материала

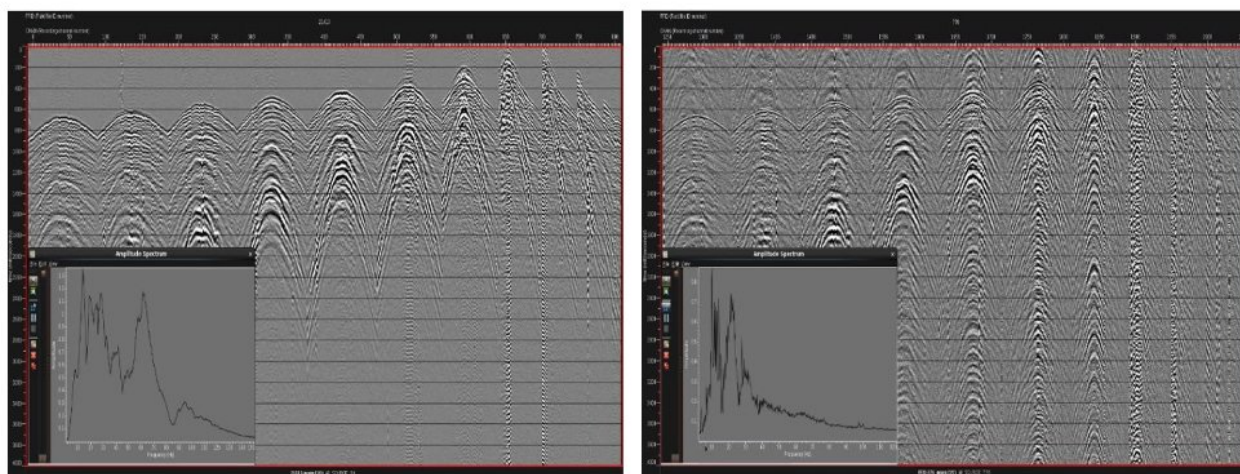
На рис. 4 представлены примеры полевых сейсмограмм. Основная энергия сейсмической записи сконцентрирована в диапазонах частот 10-80 Гц (стандартная методика) и 10-40 Гц (GLIDE). Исходные данные по технологии GLIDE закономерно отличаются высоким уровнем микросейсм, и волновая картина осложнена интенсивными поверхностными низко- и среднескоростными волнами-помехами. Отраженные волны, как и преломленные, прослеживаются увереннее на стандартных данных.

Медианные оценки атрибутов приведены нами в Табл. 2. Для корректного сопоставления качества исходных данных, сейсмограммы GLIDE были дополнительно просуммированы на базе 50 м (10 сейсмограмм). Отметим, что даже

суммированные данные GLIDE имеют уровень сигнала в 3 раза ниже, чем стандартные данные. Кроме того, суммированные данные GLIDE характеризуются более высоким уровнем шума (частоты в окне сигнала выше). Снижение уровня амплитуд на сейсмограммах GLIDE связано с уменьшением числа источников в группе от 4 до 2 при выполнении описываемых OMP.

Предварительная (полевая) обработка материалов

Граф эспресс-обработки был ориентирован на сохранение истинного соотношения амплитуд и улучшение прослеживаемости отраженных волн. Параметры процедур были взяты идентичными для обеих методик полевых работ.



▲ Рис. 4. Пример полевых сейсмограмм (слева – стандартная методика; справа – GLIDE).

▼ Табл. 2.

Атрибут	Стандарт	GLIDE	GLIDE ($\Sigma 10$)
Соотношение сигнал-микросейсмы	18	1.9	4
Амплитуда в окне сигнала	67	32	21
Амплитуда в окне микросейсм	3	15	5.5
Доминантная частота в окне сигнала	30	53	40

Загрузка данных и присвоение геометрии

Поскольку по технологии GLIDE сейсмостанция вела запись в непрерывном режиме «microseismic», данные были записаны со смещением нуля, что обусловлено технической реализацией такого режима в регистрирующих системах Sercel 428XL. Коррекция осуществлялась применением процедуры, приводящей средней уровень амплитуд трассы к нулю. При загрузке данных GLIDE выполнялась выборка пределов активной расстановки, соответствующих отрабатываемому ПВ, то есть исключались избыточные каналы, записанные в связи с регистрацией на все доступные на участке ОМР линии приёма. В остальном ввод данных по двум методикам был одинаков.

Учет влияния верхней части разреза

Сопоставление карт статических поправок по первым вступлениям преломленных волн приведено на рис.5. Пикирование отбивок осуществлялось в автоматическом режиме. Карта, построенная по данным GLIDE, отличается гораздо большей детальностью.

Сигнальная обработка

Компенсация амплитуд за геометрическое расхождение волнового фронта выполнялась с применением усредненного скоростного закона. Широкополосная полосовая фильтрация выполнялась в диапазоне 5-10-100-120 Гц, затем проводилась редакция амплитудных выбросов (отскоков). Линейные низко- и среднескоростные волны-помехи подавлялись с помощью FK-фильтрации в диапазоне скоростей 500-3500 м/с.

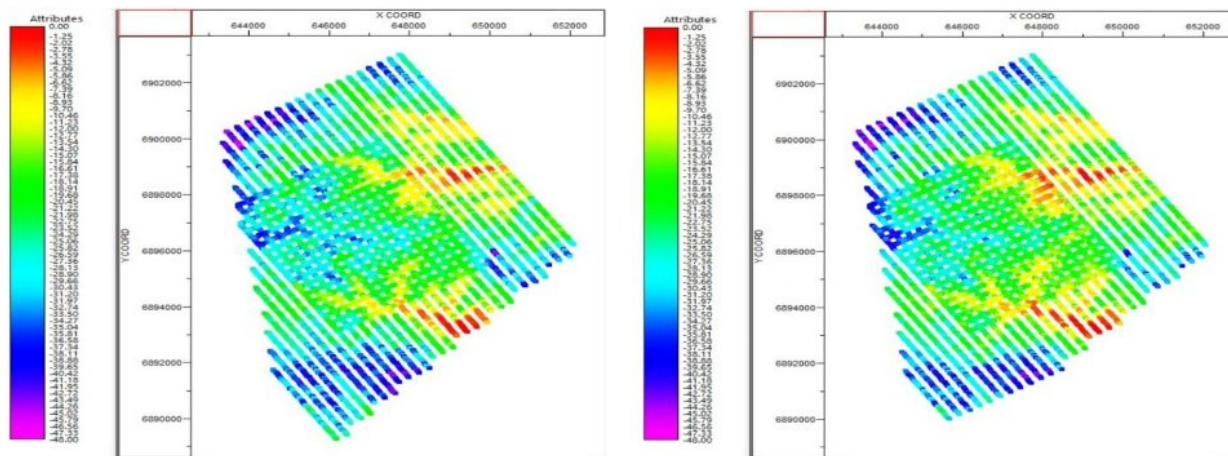
Коррекция амплитуд за неидентичность условий возбуждения и приёма производилась по поверхностно-

согласованной методике. Расчёт коэффициентов при этом выполнялся для 2-х факторной модели: ПВ, ПП. Задача повышения временной разрешенности волновой картины решалась с применением поверхностно-согласованной предсказывающей деконволюции. Длина оператора была выбрана равной 120 мс, шаг предсказания 2 мс, уровень белого шума 0,1 %. В разложении использовались все компоненты (ПВ, ПП, ОУ, ОГТ), но применялись только компоненты источника и приемника.

Кинематическая обработка

Были произведены две итерации скоростного анализа: первая с параметрами сетки 1,2 км x 1,2 км; вторая – 0,6 км x 0,6 км. Затем выполнялись коррекции статических поправок с максимальной величиной поправки 25 мс (1-я итерация) и 15 мс (2-я итерация). Для подавления кратных волн-помех и ослабления случайного шума выполнялась FK-фильтрация по сейсмограммам с введенной кинематикой. На заключительной стадии предварительной обработки до суммирования была выполнена коррекция остаточных фазовых сдвигов с максимальной величиной поправки 4 мс.

Сопоставление результатов предварительной обработки представлено на рис. 6 и рис. 7. Прослеживаемость горизонтов во всём временном интервале лучше по данным GLIDE. Разрез по стандартным данным характеризуется более высоким уровнем шума, особенно заметна разница на временах регистрации 100-500 мс. Видимые частоты во временном интервале 300-420 мс на 10-15 Гц выше в случае стандартной методики, ниже 420 мс различий в частотах практически нет. Потеря высоких частот в случае технологии GLIDE, вероятно,



▲ Рис. 5. Сопоставление карт статических поправок, полученных в ходе предварительной (полевой) обработки (слева – стандартная методика, справа – GLIDE).

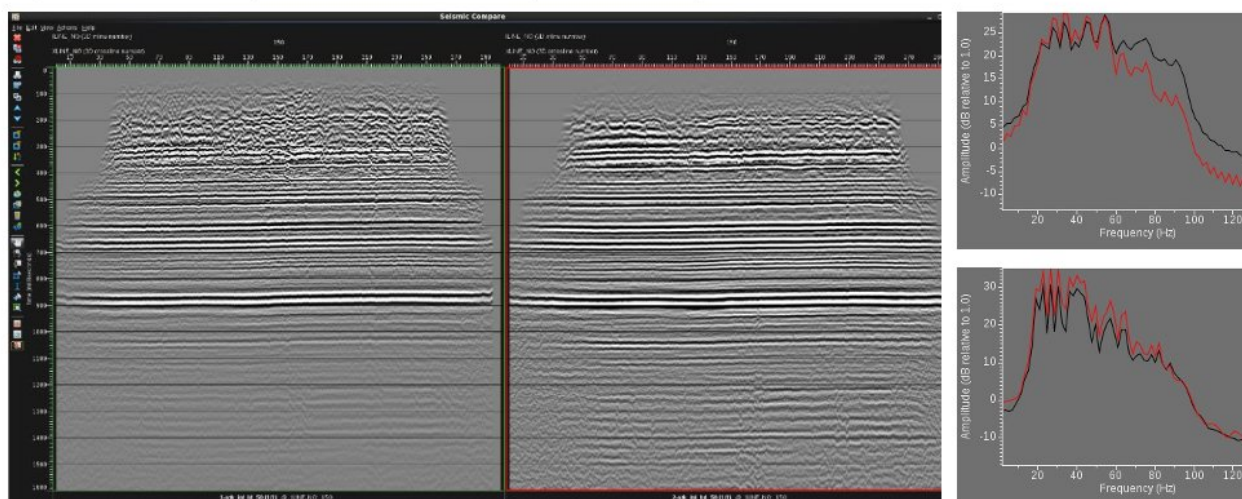
связана с недостаточной точностью определения координат ПВ: ошибка определения координат при стандартной методике <2 м, ошибка определения координат по методике GLIDE <1 м. Для общей оценки погрешности позиционирования источника можно рассчитать суммарную (накопленную) возможную ошибку для всех трасс полнократной выборки ОСТ. С учётом номинальной кратности 64 (стандартная методика) и 640 (GLIDE) суммарная возможная ошибка координат для полнократного бина составит: 128 м и 640 м соответственно.

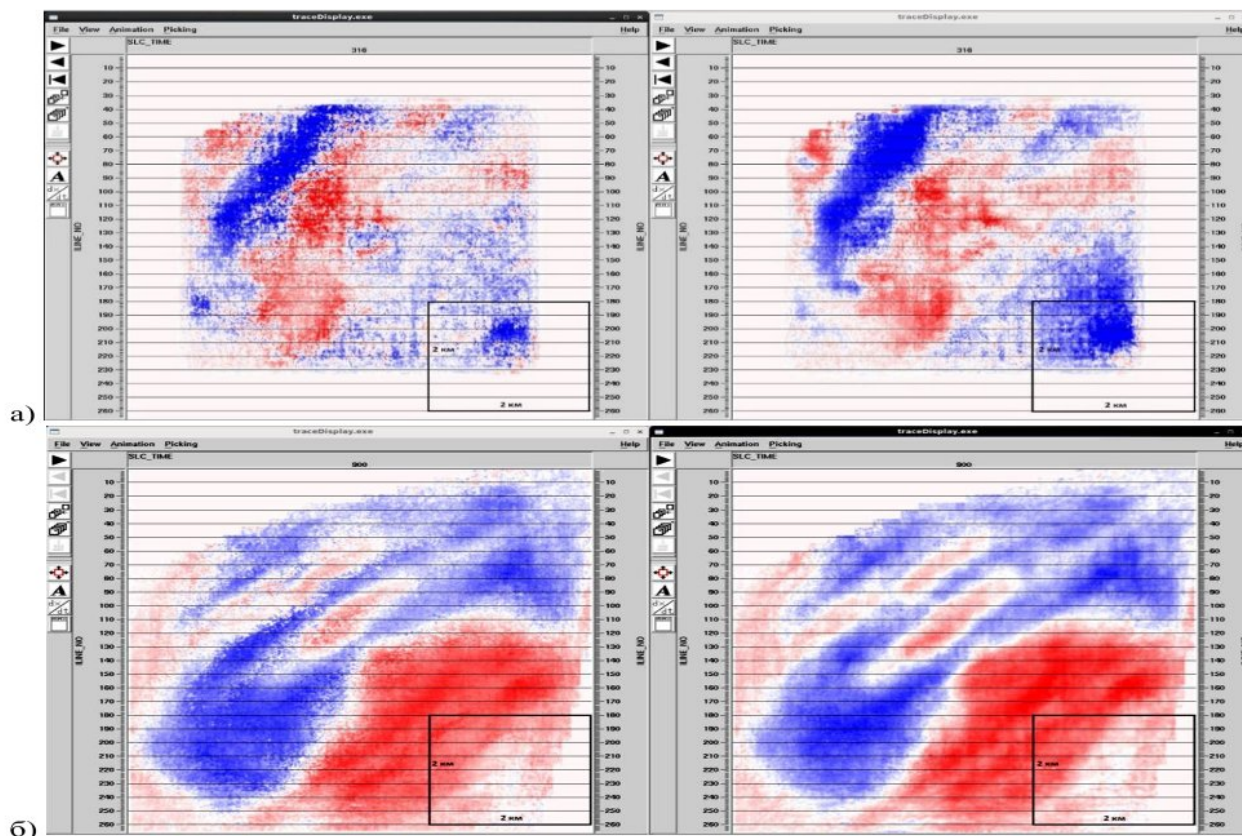
Сопоставление временных срезов показывает: по данным GLIDE картина отчетливее, разрешённое, уровень шума ниже (рис. 7).

Анализ статистических атрибутов, произведенный по исходным полевым данным, предвещал лучшее соотношение сигнал/шум на конечной сумме, полученной по стандартным данным. Медианное значение амплитуды в окне оценки сигнал/шум по площади: 67/3 (стандартная методика), 32/15 (GLIDE), 21/5.5 (GLIDE, сейсмограммы просуммированы на базе 50 м). В результате суммирования по ОГТ случайный шум снизится обратно пропорционально значению кратности ОСТ в степени 1/2, соответственно, соотношение сигнал/шум на конечном разрезе, полученном в ходе экспресс-обработки, составит 178 для стандартной методики и 53 для GLIDE.

Очевидно, что стандартный подход к

▼ Рис. 6. Сопоставление априорных временных разрезов, inline 150 (слева – стандартная методика, справа – GLIDE).





▲ Рис. 7. Сопоставление временных срезов результирующего куба, полученного по завершению предварительной (полевой) обработки: а) на ~300 мс; б) на ~900 мс (слева – стандартная методика, справа – GLIDE).

оценке качества несовершенен: амплитуда в окне сигнала не всегда связана с отражениями, амплитуда в окне сигнала не может быть меньше амплитуды в окне шума, в результате обработки уровень случайного шума снижается. Данный подход к оценке качества малоприменим в случае высокопроизводительных методик ввиду того, что они характеризуются высоким уровнем микросейсм. Цифровое группирование ПВ (суммирование) в поле, без применения корректирующих поправок, также малоэффективно для решения этой задачи. В таких случаях первостепенное внимание должно уделяться контролю основных технических параметров возбуждения и регистрации, таких как: позиционирование источника, надлежащее его функционирование, соответствие расстановки порогам тестовых характеристик.

Возможным путём для объективного количественного контроля качества данных GLIDE с использованием тради-

ционного подхода может послужить техника скользящего цифрового накопления первичных сейсмограмм с учётом сдвигов, рассчитанных по ФВК выбранной группы трасс [5]. В этом случае выборки общего пункта возбуждения суммируются на определённой подвижной (скользящей) базе, определяемой шагом пунктов приёма (чаще всего это 50 м), и проектными параметрами сетки бинирования. Атрибутный анализ (в первую очередь, по соотношению сигнал/шум) выполняется в таком случае по результату накопления и уже может рассматриваться как близкий по своей сути к стандартной оценке, общепринятой в российской наземной сейсморазведке. В комплекс процедур количественной оценки качества получаемых данных также желательно включить предварительную обработку с последующим анализом значений ключевых атрибутов (сигнал/помеха, видимая и пиковая частоты, ширина спектра и др.),

получаемых по целевым интервалам предварительных суммарных разрезов.

Скользящее цифровое накапливание по предложенной схеме [5] также может быть полезным для целей прослеживания первых вступлений в случае низкого качества исходных сейсмограмм ОПВ. В этом случае накапливание позволит улучшить прослеживание годографа преломлённой (головной) волны, его аномалий и сделает определение отбивок первых вступлений более достоверным, в том числе в автоматическом режиме, что положительно скажется на точности расчёта статических поправок [6].

Дополнительным преимуществом данных GLIDE является возможность применения методик оптимизации суммирования по ОСТ на конечных стадиях обработки (в т. ч., после применения престаек-миграции). Эффективность соответствующих процедур может существенно возрасти в условиях высокой кратности ОСТ (от 600 и выше). Наличие положительного опыта применения подобных алгоритмов, основанных на определении весов суммируемых отсчётов путём взаимной корреляции трасс с предварительно получаемым набором эталонов, на стандартных данных МОГТ [7] позволяет рассчитывать на по крайней мере не худший результат для данных GLIDE. Описанные в [7] эксперименты показали способность оптимизированного суммирования выявлять новые, подавленные на стандартной сумме, отражения. В случае данных GLIDE применение схожих методик может обеспечить получение результирующей волновой картины, качественно превосходящей стандартную методику в части прослеживания отражающих горизонтов или их фрагментов, становящихся практически неразличимыми при традиционном суммировании из-за влияния сложных сейсмогеологических условий.

Выводы и рекомендации

Повышение производительности полевых работ по новой технологии, позволившее сократить продолжительность ОМР более чем в 3 раза, подтвердило на практике перспективность технологии GLIDE в части повышения рентабельности и снижения рисков невыполнения проектов в сложных поверхностных условиях.

Несмотря на зашумленность исходных данных, связанную с отсутствием накапливания, применяемого при стандартных методиках полевых работ с невзрывными источниками, данные GLIDE демонстрируют лучшую прослеживаемость сейсмических горизонтов практически во всём интервале записи. Некоторое снижение частот на временах до 500 мс в случае данных GLIDE, скорее всего, связано с ограниченной точностью позиционирования источника (1 м), которую рекомендуется повысить не менее, чем в 5 раз по сравнению со стандартной точностью (2 м).

Обработка данных GLIDE определённо потребует больших вычислительных мощностей из-за существенно большего объёма первичных данных. Работа с данными новой технологии должна включать новые методические решения, в качестве которых можно рекомендовать скользящее цифровое накапливание ПВ с учётом сдвигов, рассчитанных по ФВК, а также применение алгоритмов оптимизации суммирования ОСТ.

Оценка качества данных GLIDE путём стандартного анализа атрибутов сейсмической записи представляется нецелесообразной. Рекомендуется сосредоточить основное внимание на контроле ключевых технических параметров возбуждения и регистрации, а оценку полученного материала проводить по суммарным данным или же (в качестве компромисса на время адаптации к новому подходу) путём расчёта атрибутов по сейсмограммам, полученным по методике скользящего цифрового накапливания ПВ.

Проведение ОМР и последующий анализ полученных данных подтвердили высокий методический и экономический потенциал технологии GLIDE, а также практическую готовность ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» к её применению в реальных производственных условиях на объектах предстоящих сезонов.

Благодарности

Коллектив авторов благодарит компанию ООО «ИНК» за разрешение на публикацию результатов анализа данных ОМР по технологии GLIDE, полученных ООО «ГЕОТЕК-ВГК» на Мирнинском УН в сезоне 2019-2020 гг.

Литература:

1. Толкачев В.М., Климатическое оружие природы: Приборы и системы разведочной геофизики, 2(63)/2020, С.6-10.
2. Череповский А.В., Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Издание второе, дополненное. – Москва, ЕАГЕ Геомодель, 2017, 252 с.
3. Бердюгин И.Н., Баландин П.В., Детков В.А., Копылов М.А., Технология невзрывной динамической импульсной сейсморазведки высокого пространственного разрешения. – Материалы III-й Международной геолого-геофизической конференции и выставка «ГеоЕвразия-2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии», Москва, 3-7 февраля 2020 г.
4. Детков В.А., Баландин П.В., Копылов М.А., Технология возбуждения упругих колебаний в движении GLIDE. – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №2(63)/2020, С.32-40.
5. Фёдоров А.Б., Череповский А.В., Скользящее цифровое накопление при импульсном возбуждении упругих волн в движении по технологии GLIDE. – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №4(67)/2020, С.11-18.
6. Козырев В. С. Учёт неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии / В. С. Козырев, А. П. Жуков, И. П. Коротков, А. А. Жуков, М. Б. Шнеерсон. – Москва, ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003, 227 с.

7. Sanchis C., Hanssen A. Enhanced local correlation stacking method. – Geophysics, Volume 76, No. 3, Issue 1, 2011, P. V33-V45.

Подробнее об авторах



**Кузнецов
Егор Сергеевич**

Окончил Казанский федеральный университет (КФУ). Ведущий специалист ООО «ГЕОТЕК-ВГК».



**Баландин
Павел Владимирович**

Главный геофизик ООО «Эвенкиягеофизика». Автор и соавтор 5 научных публикаций.



**Дробинский
Александр Алексеевич**

Главный геофизик ООО «ГЕОТЕК-ВГК». Автор и соавтор 4 научных публикаций. Аспирант кафедры «Геология нефти и газа» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».



**Череповский
Анатолий Викторович**
Главный специалист НТЦ компании «ГЕОТЕК Сейсморазведка», к. т. н. Автор и соавтор 36 научных публикаций и докладов, двух монографий по наземной сейсморазведке и англо-русского/русско-английского словаря по прикладной геофизике. Лектор Европейской ассоциации геоученых и инженеров (EAGE).

Применение кусочно-линейных развёрток с целью уменьшения опасности разрушения зданий и сооружений при проведении вибросейсмических работ

■ Кострыгин Ю.П., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск

В настоящее время многочисленные территории, на которых располагаются посёлки, города, промышленные и другие аналогичные объекты, остаются не исследованными сейсморазведкой поскольку существуют вполне обоснованные опасения разрушения зданий и сооружений при проведении вибросейсмических наблюдений.

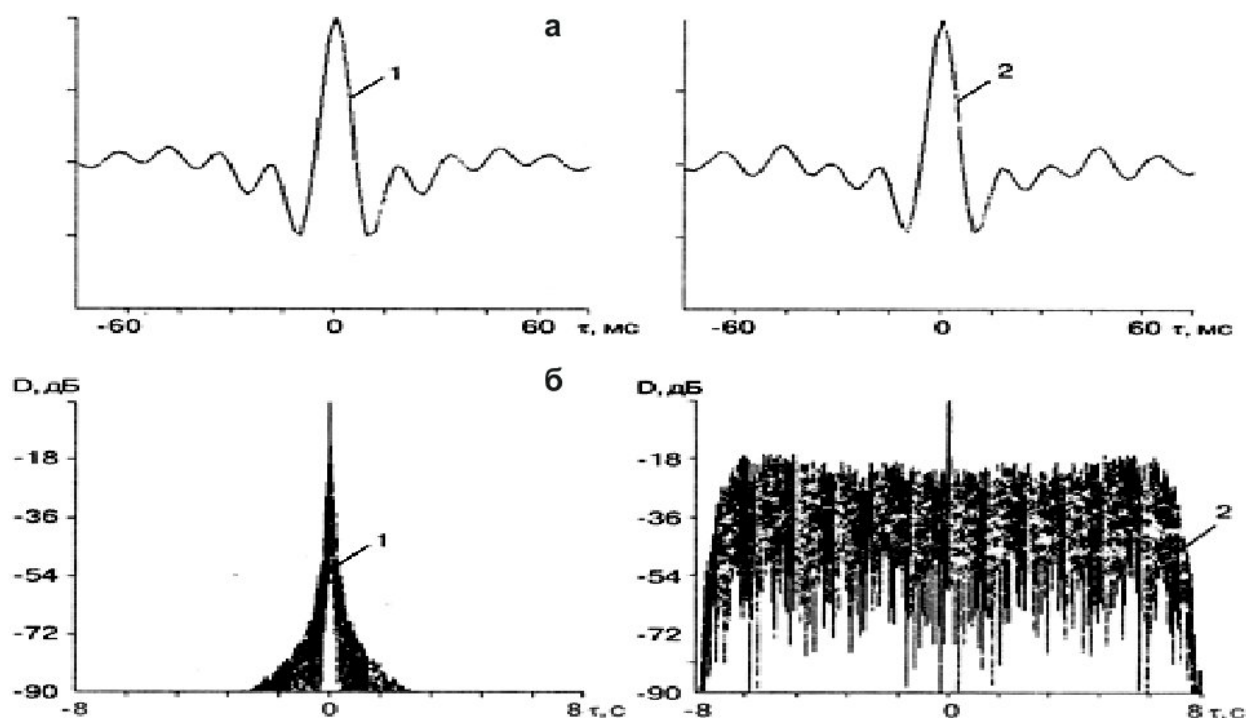
Весьма незначительное применение с целью снижения опасности разрушения зданий и сооружений получил способ, предполагающий возбуждение и регистрацию псевдослучайных сигналов типа RANDOM, у которых мгновенная частота развёртки меняется случайным образом в заданной полосе частот. Такие сигналы, отличаются повышенной скоростью изменения частоты в развёртке, и поэтому элементы конструкций зданий и сооружений не успевают войти в резонанс, что позволяет существенно снизить опасность их разрушения. К очевидным недостаткам указанного способа относится чрезвычайно высокий уровень корреляционного фона.

Так на рис. 1 приведены импульсы ФАК (а), а также графики динамического диапазона корреляционного преобразования (б), рассчитанные для ЛЧМ-сигнала с частотным диапазоном $\Delta F = 10-70$ Гц (1) и псевдослучайного сигнала типа RANDOM (2). Предварительно перед вычислением представленных статистических характеристик псевдослучайный сигнал был отфильтрован полосовым фильтром с полосой пропускания 10-70 Гц. Из рис. 1, а можно видеть, что главные максимумы ФАК сопоставляемых сигналов практически не отличаются друг от друга, что собственно и определяет

принципиальную возможность использования псевдослучайных сигналов для вибросейсмической разведки. Однако псевдослучайные сигналы характеризуются, как это видно из рисунка 1, б, чрезвычайно малым динамическим диапазоном корреляционного преобразования, не превышающим 18-24 дБ. Указанное обстоятельство фактически исключает возможность применения таких управляющих сигналов для решения задач нефтегазовой сейсморазведки.

Как уже отмечалось, физические причины уменьшения опасности разрушения зданий и сооружений при возбуждении псевдослучайных сигналов связаны с высокой скоростью изменения частоты возбуждаемых колебаний, т.е. с быстрым прохождением резонансных частот, соответствующих различным конструктивным элементам зданий и сооружений. Близкий эффект может быть достигнут и при использовании ЛЧМ-сигналов, отличающихся повышенными значениями скорости изменения частоты в развёртках, определяемой соотношением $\Delta F/T$, где ΔF и T - соответственно ширина частотного диапазона и длительность развёртки. Т.е. многократно увеличить скорость изменения частоты для ЛЧМ-развёрток представляется возможным исключительно за счёт сокращения длительности сигнала T , например, до 1-3 с. Вместе с тем, применение укороченных сигналов приводит к необходимости существенного увеличения кратности накопления и делает вибросейсмические наблюдения не технологичными.

Технологичное использование сигналов, характеризующихся повышенными значениями скорости изменения частоты



▲ Рис. 1. Результаты анализа ФАК ЛЧМ-сигнала (1) и псевдослучайного сигнала RANDOM (2) ($\Delta F=10\text{--}70$ Гц, $T=8$ с), а – главные максимумы ФАК; б – графики динамического диапазона корреляционного преобразования

ты, представляется возможным путём формирования непрерывной последовательности укороченных развёрток. Однако таким последовательностям соответствуют периодические корреляционные функции с периодом повторения, равным T , где T – длительность укороченных ЛЧМ-сигналов, формирующих данные последовательности. При этом в связи с необходимостью применения чрезвычайно малых в данном случае значений периода повторения T , указанная технология не может быть использована для большинства задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой.

Для использования же в практической работе непрерывных последовательностей укороченных ЛЧМ-развёрток достаточно исключить на коррелограмме первый период повторения. В этом случае, например, при значениях T , равных 2 с или 3 с, коррелограмма в интервале соответственно 4 с или 6 с от первых вступлений будет свободна от

интенсивного корреляционного фона, связанного с периодичностью исходного сигнала.

Исключить первый период повторения на коррелограмме можно путём применения разнополярных непрерывных последовательностей укороченных ЛЧМ-сигналов [1]. При этом первый боковой дискрет ФАК функции кода таких последовательностей, определяющей закон изменения полярности, должен равняться нулю. Такое требование выполняется, например, для разнополярной последовательности, состоящей из 7 ЛЧМ-сигналов, функция кода которой, соответствует последовательности (1).

$$1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ (1)$$

Первый боковой дискрет ФАК функции кода (1) равен нулю, поэтому выбор такого закона изменения полярности ЛЧМ-развёрток, формирующих последовательность, приведёт к обнулению

первого периода повторения коррелограммы.

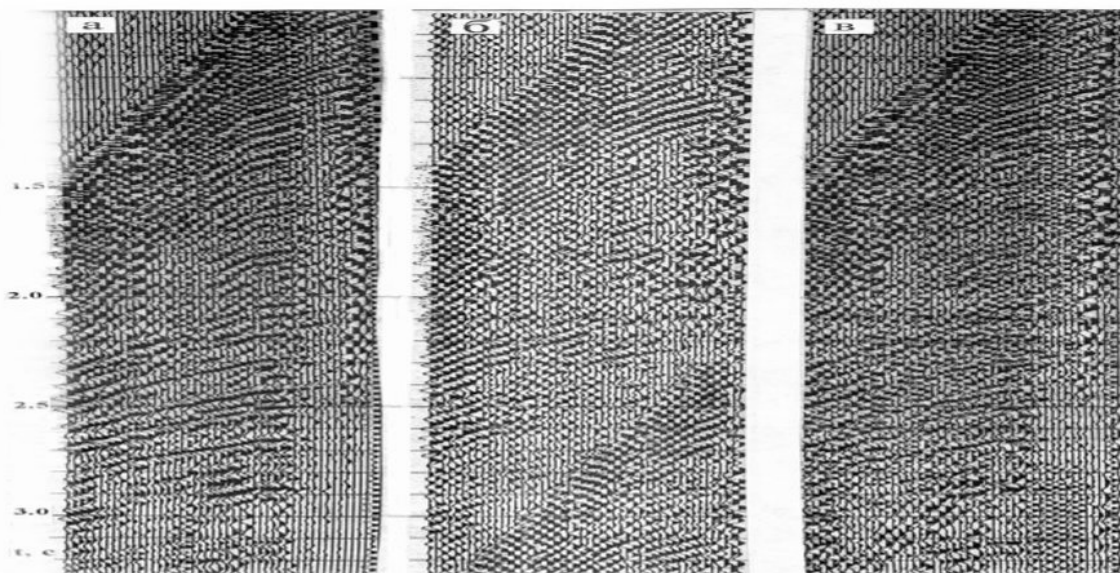
Профильные наблюдения с применением рассматриваемого способа были весьма успешно проведены ОАО «Краснодарнефтегеофизика» на территории ряда станций Краснодарского края и в частности в пределах станции Тбилисская. Ранее в связи с опасениями разрушить здания и сооружения вибросейсмические работы в станции Тбилисской не проводились. Геологическая задача в пределах исследуемой площади заключалась в поиске структурных ловушек в нижнемеловых и юрских отложениях. Отражённые от целевых границ волны регистрировались в интервале 2.6 - 3.2 с.

На ограниченном участке станции Тбилисская, расположенном на удалении от жилых домов, наблюдения проводились дважды: с использованием непрерывной разнополярной последовательности двух - секундных ЛЧМ-сигналов и обычных ЛЧМ-сигналов протяжённостью 10 с. Частотный диапазон развёрток соответствовал диапазону 10-48 Гц. Закон изменения полярности при использовании непрерывной последовательности ЛЧМ-сигналов соответствовал кодовой функции (1). Как уже отмечалось, при такой функции кода исключается первый побочный период корреляционной функции последовательности.

На рис. 2 сопоставлены коррелограммы, полученные в станции Тбилисской, с использованием обычных ЛЧМ-сигналов (рис. 2, а) и непрерывных разнополярных последовательностей 2-х секундных ЛЧМ-сигналов (рис. 2, б, в). Из рис. 2, а можно сделать вывод о том, что при вибросейсмических наблюдениях с применением стандартных ЛЧМ-сигналов на исходных коррелограммах достаточно качественно прослеживаются

целевые отражения, регистрируемые во временном интервале 2.6 - 3.2 с. При использовании же 2-х полярной последовательности, принципы построения которой несколько не соответствуют кодовой функции (1), целевые отражения были завуалированы интенсивным корреляционным фоном, формируемым первым периодом повторения коррелограммы (см. рис 2, б). В результате же применения разнополярной последовательности, составленной в соответствие с кодовой функции (1), в целевом интервале удалось практически полностью подавить компоненты корреляционного фона, связанные с периодичностью вибросейсмического сигнала (см. рис. 2, в). Следует при этом отметить, что работы выполнялись с использованием достаточно старой модели вибратора СВ-10/100, не обеспечивающей качественную фазовую коррекцию сигнала, поэтому полного подавления корреляционного фона, связанного с периодичностью сигнала не произошло. Тем не менее, даже такой уровень ослабления корреляционного фона позволил получить достаточно качественные временные разрезы.

Так, на рис. 3 приведены временные разрезы, полученные с использованием ЛЧМ-сигнала, а также с использованием разнополярной последовательности укороченных развёрток. На основании визуального сравнительного анализа разрезов можно сделать вывод о том, что суммарные записи, полученные с применением обычного ЛЧМ-сигнала и разнополярной непрерывной последовательности 2-х секундных ЛЧМ-сигналов, характеризуются практически равноценным качеством. Вместе с тем, выполненный спектральный анализ записей свидетельствует о том, что при использовании укороченных ЛЧМ-сигналов удаётся расширить эффективную ширину



▲ Рис. 2. Коррелограммы, полученные в станции Тбилисской: а – ЛЧМ-сигнал; б – непрерывная последовательность 2-секундных ЛЧМ-сигналов, функция кода 1 1 1 -1 1 1 -1 1; в – непрерывная последовательность 2-секундных ЛЧМ-сигналов, функция кода 1 1 1 -1 1 1 -1.

спектра в область высоких частот. Указанное обстоятельство является чрезвычайно принципиальным и физически связано с многократным увеличением скорости изменения частоты при использовании укороченных развёрток и в этой связи значительно более быстрым прохождением низкочастотного резонанса колебательной системы “вибратор-грунт”.

Для подтверждения указанных выше физических причин расширения высокочастотной части спектра при работе с последовательностью коротких развёрток были проведены специальные эксперименты. Так, на рис. 4 приведены амплитудные спектры корреляционных импульсов, полученных с использованием вибраторов СВ-5-150М при различной величине параметра ($\Delta F/T$). Колебания регистрировались акселерометром, установленным в грунте под плитой вибратора на глубине 20 см. Частотный диапазон ЛЧМ-развёрток оставался в процессе проведения эксперимента неизменным и равным 20–80 Гц.

Из рис. 4 следует, что по мере возрастания скорости изменения частоты ($\Delta F/T$) от 15 до 60 Гц/с, т.е. при уменьшении длительности развёртки T от 4 до 1 с, наблюдается тенденция расширения высокочастотной части спектра. Т.е. если при стандартных технологиях вибросейсмических наблюдений с использованием ЛЧМ-сигналов динамика возбуждаемых колебаний практически не зависит от длительности развёртки, то при длительностях 1-3 с и соответственно повышенных значениях отношения ($\Delta F/T$) вибратор не успевает войти в рабочий режим и это приводит к некоторому смещению спектра возбуждаемых колебаний в высокочастотную область.

Приведённые на рисунках 2 и 3 сейсмические записи получены с использованием непрерывных последовательностей, состоящих из 7 ЛЧМ-развёрток длительностью 2 с. Т.е. общая длительность сложного сигнала составляла 14 с. В настоящее время при работе на нефть и газ, как правило, применяются более протяжённые развёртки, длительность которых составляет 20–30 с. Поэтому для

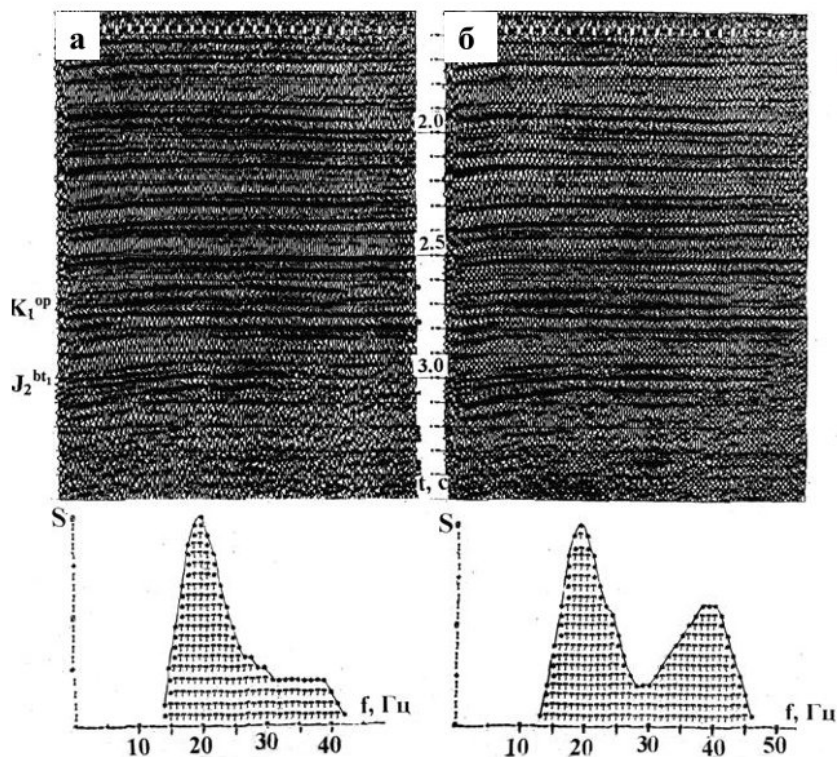


Рис. 3. Временные разрезы ОГТ, полученные в пределах станции Тбилисской:

а – ЛЧМ-сигнал;
б – непрерывная последовательность 2-секундных ЛЧМ-сигналов, функция кода 1 1 1 -1 1 1 -1; интервал спектрального анализа 2,6 – 3,2 с.

практической реализации рассмотренной технологии необходимо предусмотреть возможность возбуждения последовательностей, включающих большее число ЛЧМ-сигналов. Для этого сформируем алгоритм задания кодовых функций последовательностей, включающих произвольное число ЛЧМ-сигналов.

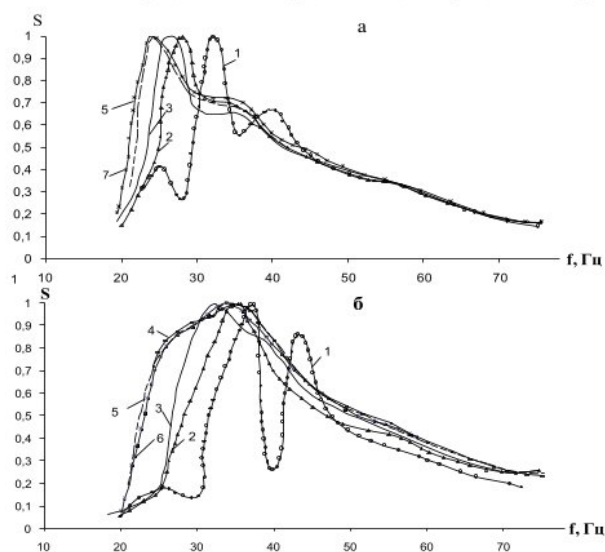
Функцию кода, у которой первый от главного максимума дискрет ФАК равен нулю, можно определить следующим образом [1]:

- количество единиц N в функции кода должно быть нечётным;
- отрицательные единицы функции кода последовательности, соответствующие обратной полярности, разделяются произвольным количеством единиц с положительным знаком; причём при условии, если $(N - 1) / 4 = p$, где p - натуральное число, общее количество отрицательных единиц в функции кода принимается равным p , а первый и последний дискреты функции кода задаются положительными единицами;
- при условии же если $(N - 1) / 4 = p +$

$1/2$, количество отрицательных единиц в функции кода принимается равным $(p + 1)$, а первая и последняя единицы имеют различную полярность.

Таким образом, существенно снизить вероятность разрушения зданий и сооружений при проведении вибросейсмичес-

Рис. 4. Влияние скорости изменения частоты в развёртке на амплитудные спектры возбуждаемых колебаний: а – глина; б – плотная гравийная дорога; 1 - $\Delta F/T = 60$ Гц/с; 2 - 30 Гц/с; 3 - 20 Гц/с; 4 - 15 Гц/с; 5 - 10 Гц/с; 6 - 7,5 Гц/с; 7 - 6 Гц/с.



ких наблюдений можно путём применения непрерывных разнополярных последовательностей укороченных до 2-3 с ЛЧМ-сигналов, характеризующихся повышенной скоростью изменения частоты колебаний. В связи с повышенным градиентом изменения частоты при работе с такими сигналами конструкции зданий и сооружений не успевают войти в резонанс, что многократно снижает вероятность их разрушения. Вместе с тем таким последовательностям соответствующие периодические корреляционные функции с периодом повторения, равным T , где T – длительность укороченных ЛЧМ-сигналов, формирующих данные последовательности. Поэтому практическое использование таких последовательностей представляется возможным при условии, если закон чередования полярности обеспечивает обнуление первого периода повторения корреляционной функции. Для этого первый боковой дискрет ФАК функции кода последовательностей, определяющей закон изменения полярности, должен равняться нулю.

Литература

1. Кострыгин Ю.П., Сидоренко Д.В., 1998, Способ вибросейсмической разведки: Россия, патент № 2102776.
2. Кострыгин Ю.П., Хасан Р.Е., 2018, Исследование возможности и целесообразности применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накоплении колебаний для решения задач нефтегазовой сейсморазведки. – Журнал «Геофизические технологии», №1, с. 39 – 50.

Подробнее об авторах



Кострыгин
Юрий Петрович

доктор технических наук,
профессор Кубанского
государственного
университета, директор
ООО «Новоросморгео»

Система синхронизации SGD-S версия V 10.x

для взрывных источников возбуждения сейсмических колебаний

Совместная работа версий V7.x и V10.x.

Временная погрешность синхронизации по радиоканалу ± 25 мкс.

Временная погрешность синхронизации с использованием системы GPS&GLONASS ± 3 мкс.

Определение координат в навигационных системах GPS&GLONASS с точностью до $\pm 2,5$ м.

Работа контроллера в режимах «ведущий» или «ведомый» для группирования сейсмостанций.

Индивидуальный запуск «ведущим» контроллером до шестнадцати синхронизаторов.

Работа синхронизатора в режиме ретранслятора и в автономном режиме.

Работа контроллера и синхронизатора с цифровыми радиостанциями.

Формирование «UH time» по срабатыванию детонатора - разрыву «взрывной сети».

Перезапись данных из контроллера и синхронизатора на модуль памяти USB Flash Drive.

Обновление встроенного ПО с помощью модуля памяти USB Flash Drive.



Система синхронизации и управления SGD-SP версия V 4.x для электромагнитных импульсных источников возбуждения сейсмических колебаний

Универсальный контролер для работы со взрывными и электромагнитными импульсными источниками

Временная погрешность синхронизации по радиоканалу ± 25 мкс.

Временная погрешность синхронизации с использованием системы GPS&GLONASS ± 3 мкс.

Определение координат в навигационных системах GPS&GLONASS с точностью до $\pm 2,5$ м.

Работа контроллера в режимах «ведущий» и «ведомый» для группирования сейсмостанций.

Одновременное управление двадцатью четырьмя электромагнитными импульсными источниками «ГЕОТОН», десятью «Енисей СЭМ-100» или пятью «Енисей КЭМ-4».

Установка индивидуальной задержки момента запуска для каждого источника.

Псевдослучайное изменение задержки моментов запуска источников в режиме накопления.

Работа источников в режиме движения по часам точного времени или заданным координатам.

Работа источников в автономном режиме по часам точного времени или заданным координатам.

Проверка синхронности работы группы источников с помощью сейсмостанции.

Контрольная запись в память УСУ SGD-SP параметров работы источников.

Перезапись данных из контроллера и УСУ SGD-SP на модуль памяти USB Flash Drive.

Обновление встроенного ПО с помощью модуля памяти USB Flash Drive.

Научно-производственная компания Сиб Геофиз Прибор

630058, г. Новосибирск, ул. Сиреневая, 29/1,

тел.: +7 (383) 306 30 70,

sgd@sibgeodevice.ru, www.sibgeodevice.ru

Сиб Геофиз Прибор

Аппаратно-программный комплекс VIBROPS для малоглубинных исследований на основе электромеханического вибрационного источника

■ Серебряков В.С., Жуков А.П., Соловьев А. О., ИИИТ РУДН

Введение

Технология вибрационной сейсморазведки в настоящее время широко применяется при поисках и разведке нефтегазовых месторождений. Работы, проводимые с вибрационным источником в нефтяной сейсморазведке, очень распространены и выполняются с середины прошлого века [10]. В отрасли используется широкий спектр различной аппаратуры от множества производителей. Сконструированы и разработаны разные типы вибрационных источников. Хорошо проработана теория вибрационной сейсморазведки [2]. Разработаны методы возбуждения вибрационных сигналов, расширенных как в область низких, так и высоких частот. Внедряются технологии возбуждения и обработки широкополосного сигнала, что в значительной степени повышает качество и информативность данных, и позволяет вибрационной сейсморазведке не только выйти на уровень взрывной, но и превзойти его по детальности и глубинности [5].

Но помимо задач поиска нефти и газа сейсморазведка применяется при малоглубинных исследованиях (при инженерно-геологических исследованиях, при поиске и разведки полезных ископаемых на небольших глубинах и при других задачах, требующих изучения верхней части разреза - ВЧР). В качестве основного источника при данных исследованиях до настоящего времени применяется кувалда (падающий груз).

Однако после появления электромеханических вибрационных источников на базе линейного электродвигателя появи-

лась возможность создать технологию изучения ВЧР, позволяющую проводить более детальное и более глубинное исследование. В статье [6] хорошо описан прототип подобного вибрационного источника. Он показал хорошие результаты. Благодаря линейному электродвигателю вибрационный источник стал проще в обслуживании и в применении. На основе данного прототипа голландская компания «Seismic mechatronics» организовала серийное производство вибрационных источников с приводом от линейного электродвигателя. Были разработаны вибрационные источники с различной массой, что дало возможность применения таких вибрационных источников также и в большой сейсморазведке.

В данной статье описывается аппаратно-программный комплекс VIBROPS, созданный на базе вышеупомянутого источника, регистрирующей системы, трёхкомпонентных геофонов и мобильной платформы, а также даны некоторые результаты его применения.

Вибрационный источник с приводом от линейного электродвигателя

В сейсморазведке, нацеленной на поиск месторождений нефти и газа, как правило используются виброисточники на основе электрогидравлического привода, имеющие определённые ограничения при возбуждении высокочастотных сигналов. Внутренняя нелинейность гидравлической системы является одной из причин дополнительных гармоник, обычно наблюдаемых с вибраторами [3,7,8].

Другая возможность управлять вибратором, которая не имеет внутренних ограничений гидравлической системы, заключается в использовании линейного синхронного электродвигателя. Эти электродвигатели способны создавать линейные силы и могут быть применены во многих приложениях. Они, например, используются на заводах для быстрого и точного перемещения объектов, а также в качестве привода поездов на магнитной подушке. Использовать линейный синхронный электродвигатель в конструкции сейсмического вибратора было предложено в работах [4,8].

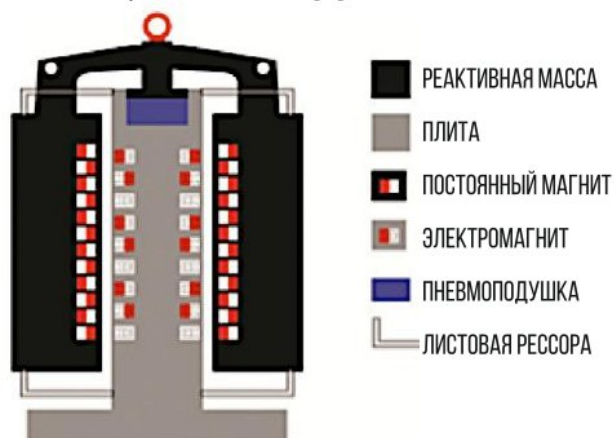
Преимущество такого вибратора перед гидравлическим вибратором заключается в снятии ограничений, накладываемых гидравлической системой, что дает возможность возбуждать свип-сигналы различной формы и широко частотного диапазона [3,5,11]

В работе [6] хорошо описано строение прототипа вибрационного источника, построенного на базе линейного синхронного электродвигателя (Рис. 1).

Реактивная масса удерживается с помощью пневматической подушки и листовых рессор.

Пневматическая подушка поддерживает реактивную массу, тем самым

▼ Рис. 1. Схема строения вибрационного источника с приводом от линейного электродвигателя [6].



значительно уменьшая требуемую общую управляемую силу. Листовые пружины направляют реактивную массу в вертикальном направлении, ограничивая отклонение ее от вертикали до 10. Листовая пружина обеспечивает экономичный способ управления массой без добавления трения.

Имеющийся в нашем распоряжении вибрационный источник «Lighting» производства компании «Seismic Mechatronics» также создан на основе линейного электродвигателя и предназначен для проведения малоглубинных сейсмических работ для исследования ВЧР и инженерных изысканий. Данный виброисточник может устанавливаться на различные мобильные шасси (Рис. 2).

▼ Рис. 2. Вибрационный источник смонтированный на грузовой фургон «Ford Transit» (вверху) и на снегоболотоход «Лесник Профи» (внизу).



▼ Табл. 1. Основные технические характеристики вибрационного источника «Lighting».

Вес виброисточника	90 кг
Реактивная масса	50 кг
Максимальная сила воздействия	
В режиме возбуждения продольных волн Р	1200Н (270lbs)
В режиме возбуждения поперечных волн S	1700Н (400lbs)
Диапазон частот	1 – 1000 Гц
Диапазон частот работы источника с максимальной силой	8 – 400 Гц
Источник питания	Аккумулятор 48В

Технические характеристики вибрационного источника «Lighting» представлены в таблице 1.

При установке на снегоболотоход «Лесник Профи» производства ООО «Лесник» (г. Вологда) или подобные ему внедорожные транспортные средства имеется возможность проводить полевые работы на бездорожье и в сложных природно-климатических условиях.

Возбуждение сигнала возможно, как для продольных волн, так и для поперечных волн. Для поперечных волн источник

располагается горизонтально, а для продольных волн вертикально (Рис. 3).

Управление источником осуществляется с помощью программы установленной на компьютере. Задаются следующие параметры для свип-сигнала: тип сигнала (линейный или различные виды нелинейного), длительность сигнала, сила воздействия, начальные и конечные частоты, параметры начального и конечного конусования, параметры отработки мультисви́па (для накоплений) и альтерацию фазы (инверсный свип). Также

▼ Рис. 3. Слева - положение вибрационного узла для возбуждения поперечных волн, справа - для возбуждения продольных волн.



можно загрузить свой пользовательский свип-сигнал.

Сигналы, получаемые с плиты, с реактивной массы и пилот-сигнал, записываются на компьютере, а также их можно получить, подключив записывающую аппаратуру к управляющему блоку.

Регистрирующая аппаратура

При формировании аппаратно-программного комплекса был сделан выбор в пользу нодальных (бескабельных) систем регистрации, позволяющих записывать длительный сигнал до 40 секунд и более с малым шагом дискретизации. Одной из таких отечественных разработок является телеметрическая



▲ Рис. 4. Трехканальный беспроводной автономный регистратор "SCOUT".

система SCOUT, разработанная специальным конструкторским бюро сейсмического приборостроения «СКБ СП» г. Саратов [12]. Характеристики системы приведены в Таблице 2.

▼ Табл. 2. Технические данные трехканального беспроводного автономного регистратора.

Число каналов	3
Максимальный входной сигнал, В	± 2.5
Коэффициент нелинейных искажений, %	0,00035
Уровень собственных шумов в полосе частот от 10 до 125 Гц, мкВ эфф., не более	0,12
Напряжение смещения нуля при максимальном усилении, мкВ, не более	± 1
Цена младшего разряда выходного кода при минимальном коэффициенте усиления, нВ	305.56 ± 0.9
Коэффициент подавления синфазного сигнала, дБ, не менее	100
Коэффициент взаимных влияний между каналами, дБ, не более	минус 120
Фиксированный коэффициент усиления	1, 4, 16, 64
Входное сопротивление канала, кОм	19.95 ± 0.20
Входная емкость канала, нФ	52 ± 2.6
Усиление на канал, дБ	0..36
Шаг дискретизации, мс	8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25
Синхронизация по времени с базовой станцией	GPS
Максимальная длительность регистрации в автономном режиме, обеспечиваемая внутренней памятью 8Гб при периоде дискретизации 2 мс, час, не менее	500
Максимальная длительность регистрации в автономном режиме, обеспечиваемая внутренней батареей напряжением 7.4В, емкостью 10А/ч, час, не менее	240
Диапазон рабочих температур, °С	минус 40 ... 70
Диапазон температур блока при заряде, °С	0 ... 45
Габаритные размеры, мм	158 Ч 157 Ч 119

▼ Табл. 3. Основные технические характеристики геофона GS-20DX. (Параметры замерены при температуре 25°C и углах наклона от 0° до 20°).

Собственная частота (Fn)	10 Гц ± 5 %
Верхний предел частоты пропускания	>250 Гц
Сопротивление катушки (Rc)	395 Ом ± 5%
Гармоническое искажение на частоте 12 Гц	
Чувствительность (G)	27,5 В/м/с
Чувствительность при 70% затухании	19,7 В/м/с ± 10%
Степень затухания	
(в открытой цепи)	0,3
(с шунтом 1,47 кОм)	0,6 ± 10 %
(с шунтом 1 кОм)	0,7 ± 10 %
Постоянная затухания (Rt*Bc*Fn)	550
Масса подвижной части	11,0 г ± 10 %
Рабочий диапазон температур	-34...+71°C
Габаритные размеры:	
диаметр	25,4 мм
высота	33 мм
масса	86 г

Так как аппаратура является бескабельной, то имеется возможность проводить исследования с различными системами наблюдений. Удобно с телеметрической системой проводить площадные работы как по регулярной так и по нерегулярной системе наблюдения. Нерегулярная система наблюдения удобна в городских пространствах и на сильно пересеченной местности. Отсутствие косы, соединяющий приемники, дает возможность сделать шаг между пунктами приема неравномерным.

Имеющаяся модель блоков является трехканальной, что позволяет использовать их при многоволновых исследованиях. К блокам при работах подключались трехкомпонентные (X, Y, Z) сейсмоприем-

ники в пластмассовом корпусе GS-3C с геофонами GS-20DX, GS-20DX-2B.

Характеристики геофонов представлены в Таблице 3 и Таблице 4.

В процессе создания комплекса была решена проблема синхронизации виброисточника и базовой станции регистрирующей системы. Сигналы с вибрационного источника (управляющий сигнал, сигнал с плиты и сигнал с реактивной массы) записывались на один из телеметрических модулей и на компьютер, управляющий вибрационным источником. Записанный файл на компьютере помимо сигналов имел ещё и другую информацию такую, как силу воздействия, длительность конусования и др.

▼ Табл. 4. Основные технические характеристики геофона GS-20DX-2B. (Параметры замерены при температуре 25°C и углах наклона от до $\pm 5^\circ$).

Собственная частота (Fn) (при наклоне 0°)	8 Гц $\pm$ 0.5 Гц
Собственная частота (Fn) (при наклоне $\pm 5^\circ$)	8 Гц $\pm$ 0.8 Гц
Верхний предел частоты пропускания	>200 Гц
Сопротивление катушки (Rc)	395 Ом $\pm$ 5%
Гармоническое искажение	
на частоте 12 Гц (при наклоне 0°)	< 0,2 %
на частоте 12 Гц (при наклоне $\pm 5^\circ$)	< 0,3 %
Чувствительность (G)	27,6 В/м/с $\pm$ 10%
Степень затухания	
(в открытой цепи)	0,38 $\pm$ 10%
Постоянная затухания (Rt*Bc*Fn)	687
Масса подвижной части	11,0 г $\pm$ 5 %
Рабочий диапазон температур	-34...+71°C
Габаритные размеры:	
диаметр	25,4 мм
высота	33 мм
масса	87 г
длина гермовывода	4,06 мм

Опробование комплекса

После всей сборки и настройки аппаратуры и техники нами был проведен опытно-методические работы на территории РУДН. Они были выполнены на дорожке, соединяющей улицу Миклухо-Маклая и медицинский центр (Рис. 5).

Пункты приема (ПП) располагались рядом с дорожкой. Пункты возбуждения

▼ Рис. 5. Район проведения работ.



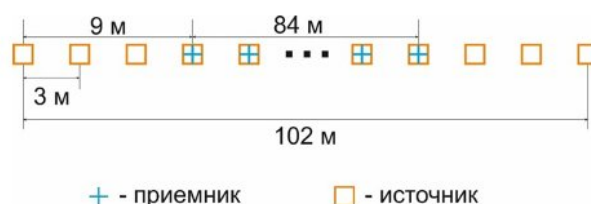
(ПВ) были расположены рядом с линией приема. ПП и ПВ располагались через 3 метра. Длина линии ПВ составила 102 м. Всего ПВ 35, а ПП - 29. Ориентация профиля с юго-запада на северо-восток (Рис. 6).

На каждом ПВ проводилось возбуждение как продольных, так и поперечных волн.

Параметры возбуждения сигнала:

- Тип свип-сигнала – линейный
- Полоса частот от 3 Гц до 200 Гц
- Длина свип-сигнала – 12 с

▼ Рис. 6. Схема проведения.



- Форма конуса – косинусоидальный
- Длина конуса – 0.1 с для поперечных волн и 0.1 с для продольных волн.

Сила воздействия при возбуждении поперечных волн составила 700 Н, а при возбуждении продольных волн составила 400 Н. Число накоплений на пункте возбуждения 4 в каждую сторону.

Параметры регистрации:

- Шаг дискретизации 0.25 мс
- Длина записи 14 с

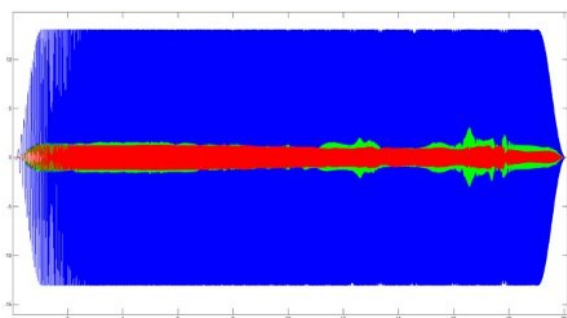
Также на той же расстановке были проведены работы с источником типа падающий груз (кувалда 5 кг). Возбуждение продольных волн осуществилось с помощью удара кувалды по плашке, а поперечных волн ударом по двутавру. Число накоплений 10 при ударах в одну сторону.

Обработка данных

После проведения полевых работ данные с блоков «SCOUT» собираются на компьютере, и далее формируются виброграммы. В файле, сохраненном управляющей программой, содержится информация о генерируемом сигнале, а также сигналы, содержащие ускорение смещения реакционной массы и плиты (Рис. 7).

Обработка производилась по стандартному графу в обрабатывающей системе SeisSpace:

- ▼ Рис. 7. Графики сигналов: управляющий сигнал (синий), ускорение смещения плиты (зеленый), ускорение смещения положения реактивной массы (красный).



1. Присвоение геометрии.
2. Корреляционная обработка по сигналу (только для вибрационного источника).
3. Шумоподавление по сейсмограммам.
4. Деконволюция.
5. Определение скоростного закона.
6. Ввод кинематических поправок.
7. Суммирование.
8. Постстек обработка.
9. Миграция.

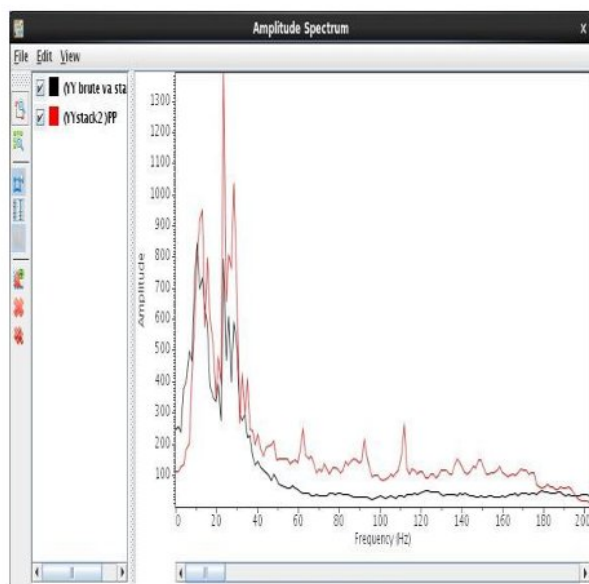
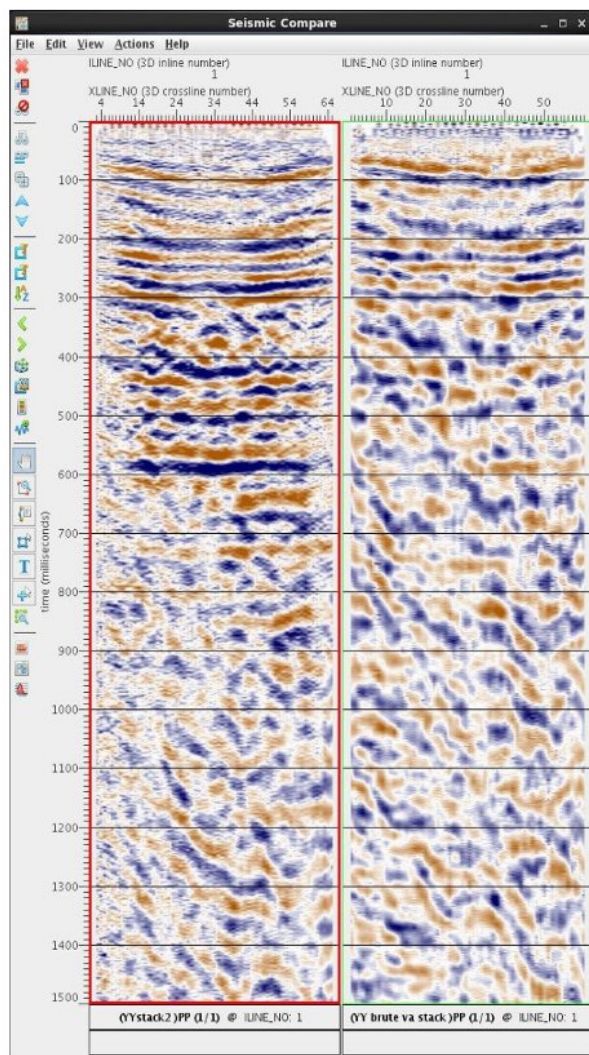
Результаты по продольным волнам получились менее информативными, чем результаты по поперечным волнам, как с вибрационным источником, так и с кувалдой. Связано это с большими значениями скоростей слоев верхней части, что не дает возможности их разделения.

После применения всех процедур, были получены результаты для поперечных волн как для вибрационного источника, так и для кувалды (Рис. 8).

Сравнение двух разрезов демонстрирует большую энергетическую насыщенность сигнала, полученную с вибрационного источника и более уверенное прослеживание горизонтов. Горизонт на времени 550 мс соответствует кровле известняков на глубине порядка 130 метров.

Заключение

В результате опробования аппаратно-программного комплекса VIBROPS продемонстрирована возможность его использования для изучения ВЧР с большей глубиной, чем с традиционным источником типа «падающий груз» (кувалда). Решены технические вопросы синхронизации источника с бескабельной регистрирующей системой SCOUT. Разработана конструкция для крепления вибратора на мобильную платформу с



▲ Рис. 8. Временные разрезы (YY - компонента). Вверху временные разрезы полученные с помощью вибрационного источника.

возможностью оперативного перевода комплекса из транспортного в рабочее положение и наоборот.

Литература:

1. Апродов В.А, Апродова А.А. Движения земной коры и геологическое прошлое Подмосквья-М., Наука, 1963.
2. А.П. Жуков, С.В. Колесов, Г.А. Шехтман, М.Б. Шнеерсон [2011]. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Издательство ГЕРС.
3. Dean, T. [2014]. The use pseudorandom sweeps for vibroseis surveys. Geophysical Prospecting, 62, 50-74.
4. Drijkoningen, G., A. Veltman, W. Hendrix, K. Faber, J. Brouwer, and G. Hemstede, 2006, A linear motor as seismic horizontal vibrator: 68th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, P072.
5. Galikeev, T., Zhukov, A. and Korotkov, I. [2019]. High-resolution land seismic acquisition with Broadsweep. First Break, 37, 61-66.
6. Noorlandt, D., Drijkoningen, G., Dams, J. and Jenneskens, R. [2015]. A seismic vertical vibrator driven by linear synchronous motor. Geophysics, 80, EN57-EN67.
7. Sallas, J., 2010, How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box: Geophysical Prospecting, 58, 3-18,
8. Unger, R., 2002, A seismic transmission system for continuous monitoring of the lithosphere: A proposition: Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
9. Wei Z. and Phillips T. [2010]. Harmonic distortion reduction on seismic vibrators. The Leading Edge, 29, 256-261
10. Wei Z., Phillips T. and Hall M. [2010]. Fundamental discussions on seismic vibra-

tors. Geophysics, vol. 75, no. 6, pp. W13–W25

11. Zhukov, A., Korotkov, I., Sidenko, E., Nekrasov, I., Gridin, P. and Galikeev, T. [2017]. Simultaneous pseudo-random shuffle-sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. SEG Technical Program, Expanded Abstracts, 151-155.

<http://skbsp.ru/index.php/ru/sejsmosistema/beskabelnaya-sejsmosistema-scout>

Подробнее об авторах



Жуков
Александр Петрович

Заведующий лабораторией
вибрационной и
многоволновой
сейсморазведки
ИИИТ РУДН,
доктор технических
наук



Серебряков
Владислав Сергеевич

Научный сотрудник
ИИИТ РУДН



Соловьев
Андрей Олегович

Научный сотрудник
ИИИТ РУДН

Точность вибрационного излучения.

Новые возможности контроля

- Циммерман В.В., НТЦ, ПАО "ГЕОТЕК Сейсморазведка", г. Тюмень
- Закариев Ю.Ш., ЗАО НПЦ "ГеоСейсКонтроль", г. Москва
- Зозуля А.П., НТЦ, ПАО "ГЕОТЕК Сейсморазведка", г. Тюмень

Учет нагрузочных характеристик грунта при контроле качества работы вибрационных источников позволяет выявлять дополнительные факторы, влияющие на точность излучения. Приводится обоснование, разработанный инструмент, опыт его использования и полученные результаты. Акцентируется внимание на одном из них, выявившем принципиальный недостаток конструкции современных вибраторов.

Введение

Корреляционный метод вибрационной сейсморазведки требует строгого соответствия излучаемой сейсмической волны исходному (опорному) свип-сигналу. Отклонения и посторонние составляющие в ней ухудшают как разрешающую способность, так и глубинность исследования. Задача реализации точного излучения оказалась непростой и сохраняет свою актуальность по сей день.

Точность излучения в историческом аспекте

Вибрационный метод сейсморазведки ("Вибросейс") был задуман как гибкий, управляемый инструмент и его разработчики изначально имели чёткие представления о том, какими параметрами излучаемой волны следует управлять, для чего это делать и как. В классическом понимании процесс управления состоит в определении текущего значения управляемой характеристики, определении величины отклонения её от заданного значения и внесение необходимой корректирующей поправки в управляющий сигнал. Техническая реализация не вызвала принципиальных проблем. Кроме одной: не ясно было, как получить текущие значения и откуда их взять, если процесс волнообразования пространственно протяжённый и происходит

глубоко под землёй? Не бурить же каждый раз глубокую измерительную скважину на очередной точке излучения?

Эта принципиально неразрешимая задача заставила несколько поступиться исходным принципом, и вместо недоступной излучаемой волны вынужденно ограничиться управлением вполне доступного и послушного излучающего механизма.

По ходу пришлось решить ещё одну принципиальную задачу – определиться с тем, каким образом контролировать излучающий механизм, а именно, какой из его выходных сигналов считать наиболее соответствующим излучаемой сейсмической волне. Выбирать предстояло из двух вариантов: очевидно напрашивающейся виброскорости излучающей плиты (считай – движения поверхности сейсмической среды в точке излучения) или же теоретически обоснованное вибрационное усилие, воздействующее на её поверхность. Ко всеобщему удовлетворению победил научный подход и было рекомендовано контролировать вибрационное усилие, сигнал более удобный для измерения и обработки.

Выработанный в то время набор параметров контроля работы вибратора (усилие, фаза, искажения) и их критерии, сохранились до настоящего времени практически в неизменном виде. С тем лишь отличием, что точность их обеспе-

чения достигла заоблачных высот благодаря успехам электроники.

Важно отметить, что уже на этом начальном этапе представилась возможность оценить последствия замены прямого измерения характеристик излучаемой волны косвенной оценкой их через работу вибратора. Проведённые прямые эксперименты показали, что ни один из сигналов вибратора: ни виброскорость, ни вибрационное усилие - не имели точного совпадения с излучаемой волной. Различия были существенны и не предсказуемы. В частности, фазовые смещения могли плавать в пределах до ± 90 градусов. Этому обстоятельству первоначально не придали особого значения (ведь иного варианта всё равно нет), а впоследствии и не вспоминали о нём вовсе (работает – ну и хорошо). Мы же сделаем акцент на этом обстоятельстве, поскольку для нас оно является ключевым:

В процессе вибрационного излучения мы контролируем не саму излучаемую волну, а лишь работу излучающего механизма. Формирование сейсмической волны происходит где-то дальше и этот процесс нам не понятен и неподконтролен.

Но почему же "процесс не понятен", если к тому времени уже существовала довольно развитая теория излучения с поверхности упругого полупространства, которая могла учитывать даже слоистость её структуры? К сожалению, эта теория оказалась слишком далёкой от действительности и не прошла проверку практикой. В этом пришлось убедиться при попытке адаптировать к ней динамику электрогидравлического вибратора в рамках задачи поиска оптимальной его конструкции для сейсмического применения.

Теоретические выводы упорно не подтверждались практикой. Работы не дали положительных результатов, но дополнили представление о вибрационном излучении новым пониманием. Оказалось, что вибратор ощущает под собой не сейсмическую среду со всеми её отражающими горизонтами, а нечто другое, некую переходную зону, которая вместе с вибратором участвует в образовании сейсмической волны [2]. Иными словами, попытка точного описания процесса вибрационного излучения не удалась, а задача предстала в ещё более сложном виде.

А дальше – больше. Выяснилось, что и переходная зона не является главным фигурантом в этом процессе, поскольку было замечено, что ощущаемая вибратором нагрузка радикальным образом изменяется даже при перемещении его на незначительные расстояния, сопоставимые с размером излучающей плиты. То есть вибратор взаимодействует вовсе не с переходной зоной, размеры которой исчисляются длинами волн, а с грунтом, находящимся непосредственно под ним. И ощущает он нагрузку, не имеющую к сейсмике вовсе никакого отношения. Кроме того, выяснилось, что и конструкция излучающей плиты тоже вносит свой вклад в величину ощущаемой вибратором нагрузки в тех случаях, когда ей приходится взаимодействовать с неровной поверхностью [4]. То есть в рассмотрение потребовалось включить ещё и фактор рельефа поверхности. Но и это ещё не всё...

В общем оказалось, что на процесс вибрационного излучения влияет гораздо больше факторов, чем изначально предполагалось. А взаимосвязь между излучателем и создаваемой им сейсмической волной стала ещё неопределённой и недоступной.

Гипотеза

Представим зону формирования сейсмической волны, точнее всё то, что расположено от излучающей плиты вибратора до полного формирования сейсмической волны, со всеми многочисленными её факторам, как некий "чёрный ящик" с комплексной передаточной функцией $W(p)$. К входу его приложено вибрационное усилие от вибратора $GF(p)$, а на выходе – сформировавшаяся сейсмическая волна $V(p)$:

$$V(p) = GF(p) * W(p)$$

Вход этого "чёрного ящика" будет характеризоваться неким входным импедансом $Z(p)$, описывающим величину нагрузки, которую будет создавать этот "чёрный ящик" для вибратора. Вибратор, кстати, в состоянии собственными средствами измерять величину этой нагрузки. Очевидно, что и передаточная функция $W(p)$, и импеданс $Z(p)$ как-то связаны между собой через общие параметры "чёрного ящика". Мы не знаем, как точно. И мы не будем ставить перед собой задачу выяснить эту взаимосвязь. Ограничимся лишь понимаем того, что они взаимосвязаны. Это даёт нам основание полагать, что изменение входного импеданса $Z(p)$ является признаком каких-то изменений, происходящих в "чёрном ящике", что неизбежно должно отразиться и на его передаточной функции $W(p)$ и, соответственно, на изменении характеристик излучаемой волны $V(p)$.

Ранее, оценивая качество излучения только по характеристикам создаваемого вибрационного усилия, игнорируя при этом величину нагрузки, которую ощущает под собой вибратор, мы упускали из виду многочисленные искажающие факторы. Контролируя поведение

нагрузки, мы можем выявлять их. На некоторые из них мы в состоянии повлиять, ради повышения точности излучения. Ну а с остальными, независимыми и неподвластными нам факторами, по-прежнему придётся мириться.

Новый инструмент

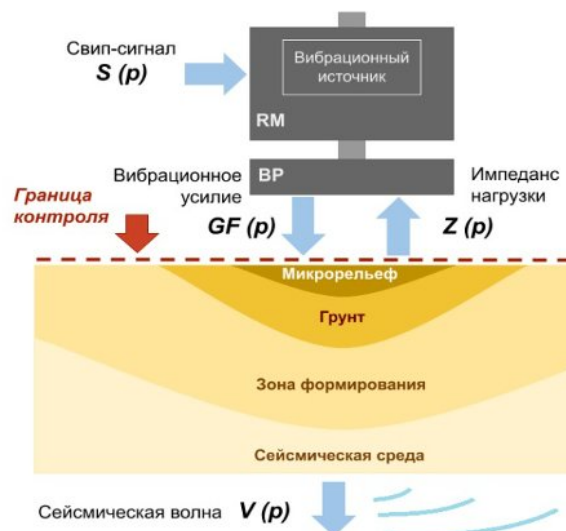
Так в чём же проблема? Характеристики ощущаемой вибратором нагрузки легко вычисляются его электроникой и давно уже входят в состав отчёта вибратора о произведённом излучении наряду с традиционными оценками. Но вот как их использовать – никто не поясняет. Да и много ли информации можно получить от пары цифр?

Поэтому был найден другой, более эффективный инструмент оценки нагрузки – графический. Простой, наглядный и очень информативный. Это график фазового сдвига между сигналами ускорений реактивной массы [RM] и излучающей плиты вибратора [BP].

Для всей полосы частот график умещается в диапазон от 0 до минус 180 градусов и показан на Рис. 1.

Разумеется, график даёт косвенную оценку, но она отлично справляется со

▼ Рис. 1. Вибрационное излучение.



своей задачей. Критерии интерпретации графика:

- *Большая величина фазы – слабая нагрузка, малая величина фазы – большая нагрузка.*

Действительно, предельное значение -180 градусов может быть достигнуто лишь в том случае, если вибратор вообще не взаимодействует с нагрузкой. Тогда реактивная масса и излучающая плита вибратора колеблются в противофазе друг с другом.

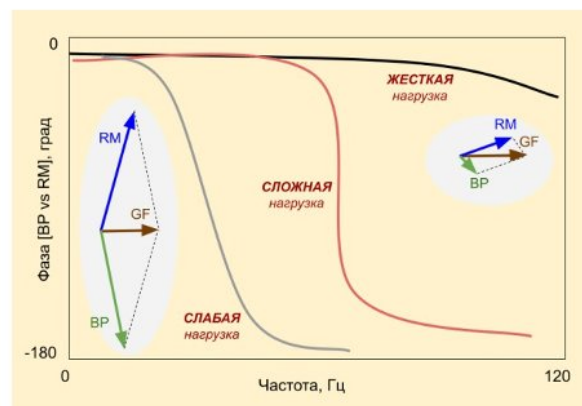
С другой стороны, при работе на плотном, жёстком основании фазовый сдвиг стремится к нулю. Как это не кажется странным, но это действительно так: при работе вибратора на плотном грунте реактивная масса и излучающая плита колеблются синфазно.

- *Отклонение графика от классической (теоретической) формы свидетельствует о сложной нагрузке с наличием дополнительных искажающих факторов.*

Таковыми искажающими факторами могут быть или неровность поверхности, или непрочный грунт, или посторонние предметы под плитой, или нестабильность контакта плиты с поверхностью грунта.

- *Чем больше фазовый сдвиг – тем тяжелее работать вибратору.*

Этот критерий становится понятным, если принять во внимание, что величина усилия воздействия на грунт [GF] определяется как векторная сумма усилий, приложенных реактивной массе [RM] и излучающей плите [BP], а величины усилий пропорциональны ускорениям этих элементов. При увеличении угла между слагаемыми векторами для сохранения той же величины суммы потребуется увеличивать их амплитуду. А одно из этих слагаемых - усилие [RM] – это ни что иное, как исходное усилие,



▲ Рис. 2. Косвенная характеристика нагрузочных свойств грунта: фазовый сдвиг между ускорениями RM и BP.

развиваемое вибрационным механизмом вибратора.

Практическое применение

Какие же новые возможности предоставляет нам этот инструмент в аспекте контроля точности излучения? Из опыта использования его при подготовке виброкомплексов к производственным работам, а также при супервайзерском их контроле (инструмент включён в программно-методический комплекс [6]), можно отметить следующее.

- *Оценка условий работы на точке излучения.*

Потребность в этом возникает, например, при диагностике причин плохого поведения вибратора. Ведь он может плохо работать как по причине своего технического состояния, так и по причине того, что, будучи вполне исправным, он просто попал в плохие условия работы. Одного взгляда на график достаточно, чтобы понять ситуацию.

- *Оценка условий работы на профиле.*

Собрав статистику по характеристикам нагрузки по всей площади можно дать оценку условиям работы на ней. В начале это может пригодиться при выборе параметров режима работы (например, величины мощности излучения, диапазона частот, количества накоплений), а

по окончании работ – для обоснования качества полученного материала. Вопросы возникают серьёзные, поэтому объективные оценки будут весьма полезны. Особенно для исполнителей работ.

- *Выбор контрольных точек для сверок.*

Текущий контроль за техническим состоянием вибраторов в ходе профильных работ осуществляется с помощью периодически проводимых проверок (сверок). Для большей достоверности их следует проводить на "хороших" точках, чтобы исключить ненужное в данном случае влияние неблагоприятных условий работы. График служит хорошим индикатором при поиске таких точек.

- *Оценка устойчивости грунта под действием вибрационной нагрузки.*

При работе на площадях со сложными поверхностными условиями, например, зимой или на сельхоз полях, практикуется проведение предварительного уплотнительного воздействия на каждой новой рабочей точке. Прямое наблюдение за поведением грунта под воздействием вибрации, позволит однозначно определить необходимость (или ненужность) предварительного уплотнения.

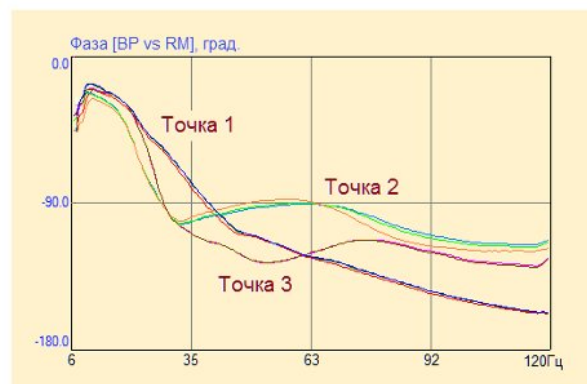
Аналогично и при выборе количества накоплений на одной рабочей точке. Характер поведения грунтов под действием вибрационной нагрузки и их вибрационная устойчивость могут быть различными. Тот же снег, например, при одних погодных условиях уплотняется, а при других, наоборот, рассыпается, вылетая из-под плиты, как песок. Наблюдение за поведением нагрузки покажет виброустойчивость грунта, поможет определиться с первоначальным режимом накопления, а также, в случае изменения ситуации, позволит своевременно скорректировать его.

Новые знания

Наблюдение за поведением нагрузочных свойств грунта расширило представление о процессе вибрационного излучения. Отметим здесь лишь два момента, наиболее интересных и имеющих практическое значение.

- *Величина и характер разброса нагрузочных свойств грунта по профилю.*

В основном, кроме особых ситуаций, изменение нагрузочных свойств связано с изменением условий контакта плиты с поверхностью грунта. Они могут изменяться радикальным образом даже при незначительном перемещении вибратора. Но, при работе на одной точке, они остаются стабильными, повторяя в деталях характерные особенности. Вот пример характеристик, полученных на трёх различных точках, с тремя излучениями на каждой точке:

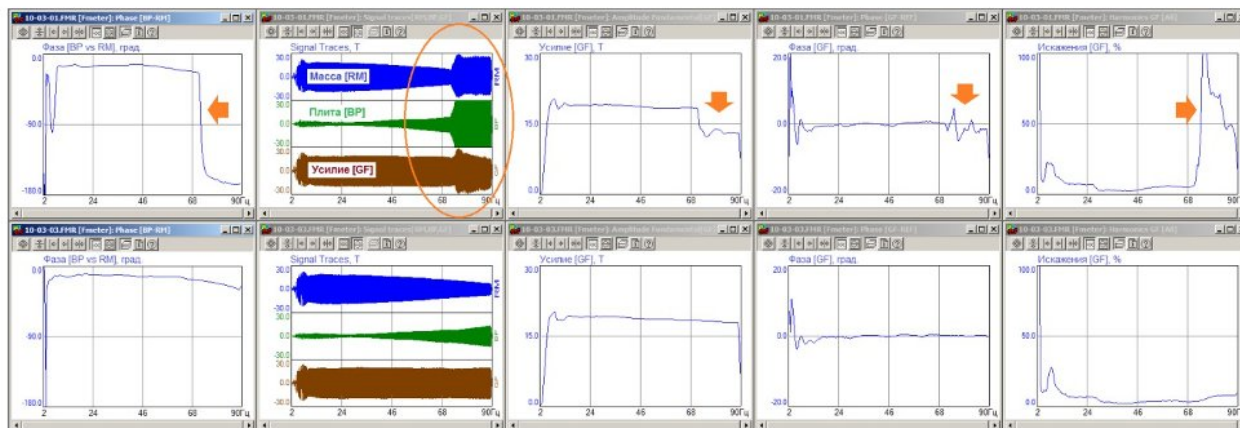


▲ Рис. 3. Характеристики нагрузки грунта на соседних точках.

Это обстоятельство следует учитывать при планировании различного рода сравнительных экспериментов. Переезд на новое место изменит условия работы, и сопоставление результатов станет некорректным.

- *Нестабильность контакта плиты с поверхностью грунта*

Это явление настолько же интересно, насколько и важно с практической точки зрения. Собственно, это наиболее яркий пример использования представляемого инструмента.



▲ Рис. 4. Проявление нарушения контакта плиты с поверхностью грунта. "Nomad 65 Neo" + "VE-464".

Заключается явление в том, что, начиная с 80 ± 20 Гц (в зависимости от условий работы), вибратор вдруг начинает "плохо" работать, иногда даже срываясь в неуправляемую вибрацию.

Как правило электронике удаётся удерживать ситуацию под контролем и единственными свидетелями происшествия остаются лишь повышенный уровень нелинейных искажений, слегка возросшая фазовая ошибка и, иногда, снижение усилия. Зачастую для штатной системы контроля качества излучения они остаются незамеченными.

Явление было замечено давно. Но оно не привлекало особого внимания и списывалось, как обычно, на сложные условия на профиле, на неисправности вибратора и даже на недостатки его конструкции. Всё это имело под собой некоторые основания, но это не объясня-

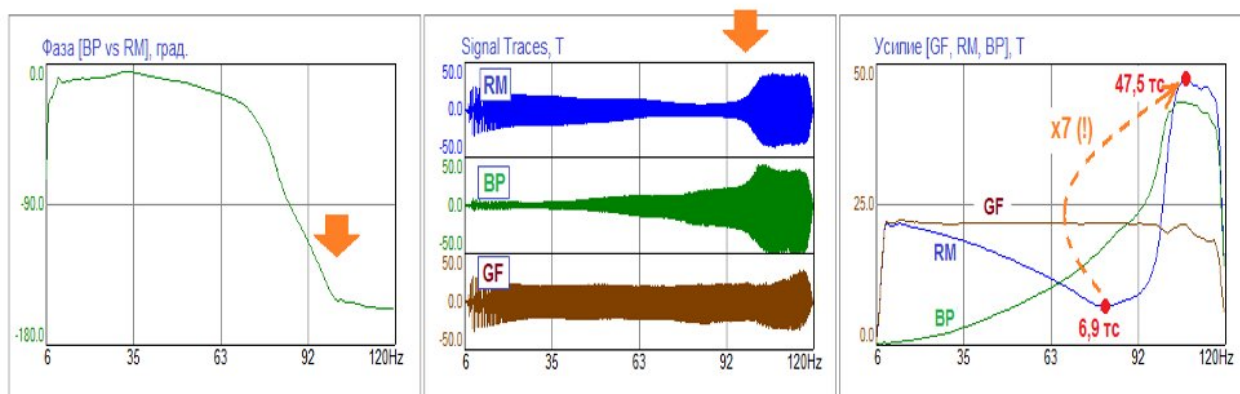
ло само явление. Со временем сбои стали замечать и у новых вибраторов, работающих, к тому же, в идеальных условиях.

Вот свежий и очень наглядный пример. Вибратор "Nomad 65 Neo" (выпуск – декабрь 2019), оснащенный электроникой VE-464 последней модификации. Работа на Севере. Условия работы идеальные – равнина, равномерно покрытая плотным снегом. На рис. 4 приведены характеристики излучения со сбоем и, для сравнения, нормального излучения.

Характеристика нагрузочных свойств грунта показывает, что в районе 70 Гц происходит лавинообразный процесс, приводящий к практически полному пропаданию нагрузки.

Трассы сигналов усилий показывают резкое увеличение мощности вибратора в момент срыва. При этом результирующее

▼ Рис. 5. Проявление нарушения контакта плиты с поверхностью грунта. "AHV-IV Commander PLS-364" + "GDS-II".



усилие воздействия на грунт принудительно снижается электроникой на 5-6 тонн из-за установленных в ней пороговых ограничений. Фазовая характеристика становится неравномерной, хотя и вписывается в традиционные допуски. А вот нелинейные искажения возрастают запредельно.

После нескольких воздействий на этой точке вибратор как ни в чём не бывало демонстрировал идеальную работу.

Другой пример. Вибратор "АНV-IV Commander PLS-364" (декабрь 2018), оснащенный электроникой "GDS-II". Работа на Севере в аналогичных условиях.

В отличие от предыдущего случая здесь были отключены ограничения в электронике. Поэтому вибратору, чтобы сохранить на выходе заданное ему усилие 22 тонны при резко упавшей нагрузке, позволено было работать на пределе своих возможностей, доведя при этом исходное усилие чуть ли не до 50 тонн.

Вызывает смущение то обстоятельство, что всё это происходит с новыми брендовыми вибраторами последних модификаций. И невольно возникает подозрение, что конструкторы не догадываются о происходящем, не замечают эту проблему. В то время, как ситуация только обостряется.

Для понимания механизма этого явления необходимо иметь в виду следующее:

- Чтобы излучающая плита не отрывалась от поверхности грунта в процессе излучения, она принудительно прижимается к нему статическим усилием, превышающим по величине амплитуду расчётного вибрационного усилия. Рельеф грунта и упругость конструкции плиты допускают частичную потерю контакта. Потеря контакта приводит к снижению величины нагрузки.

- В излучающей системе "вибратор – грунт" в районе 240Гц имеется высокочастотный резонанс, в образовании которого участвуют масса излучающей плиты и упругость грунта [3-5]. Этот резонанс

усиливает гармоники, частоты которых попадают на этот резонанс. При хорошо прижатой плите добротность резонанса низкая, при потере контакта – возрастает.

- Электроника вибратора имеет систему стабилизации выходного усилия (Force Control), которая заставляет вибратор работать мощнее, если по каким-то причинам вибрационное усилие начинает падать.

Последовательность развития событий после запуска вибратора такая:

1) Вибратор нормально запускается и работает. Частота свип-сигнала приближается к 80Гц, когда на высокочастотный резонанс попадает его третья гармоника. В силу нелинейной природы электрогидравлического вибратора она всегда присутствует в его выходном сигнале [3]. Если контакт с поверхностью плотный, то гармоника практически не усиливается и вибратор отрабатывает излучение без проблем. Если контакт неплотный, то гармоника возрастает, и форма сигнала искажается.

2) Искажение формы сигнала может отразиться на качестве контакта и спровоцировать частичную его потерю. Вибратор при этом почувствует снижение нагрузки и отреагирует на это увеличением мощности. Амплитуда колебаний возрастёт, что дополнительно ухудшит качество контакта и усугубит проблему.

3) Возникает лавинообразный процесс, в результате которого нагрузка вибратора снижается, а мощность вибратора возрастает. Возрастает до тех пор, пока не упрётся в ограничения.

4) Дальнейшее развитие ситуации будет зависеть от поведения грунта: излучение или вернётся в норму, или работа продолжится в условиях перегрузки, нестабильная, с высоким содержанием широкополосных шумов и искажений. Явный брак и помеха другим.

5) Ну и, если вернуться к началу статьи, с изменением нагрузки одновременно произойдут и изменения характеристик зоны формирования сейсмичес-

кой волны. То есть волна приобретёт дополнительные искажения даже в том случае, если электроника вибратора будет в состоянии удерживать в норме параметры вибрационного усилия и уложится во все допуски.

Есть предположение, что усугубление данной проблемы в зоне контакта связано с радикальным увеличением жёсткости плиты и использованием пластика для защиты её от налипания снега. Новые плиты, в отличие от старых, довольно слабых и покрытых толстой резиноканевой защитой, стали иметь более резкую границу контакта с поверхностью, без какого-либо промежуточного частичного отрыва. Поэтому срыв в неустойчивую работу стал резким, чётко выраженным. Однако всё это требует уточнения и экспериментальной проверки.

Выводы

1. Мониторинг ощущаемой вибратором нагрузки позволит выявлять дополнительные факторы, влияющие на точность излучения. Поэтому давайте контролировать нагрузку и каждый раз настораживаться, обнаружив странности в её поведении. Инструмент для этого и готов проверен.

2. Необходимо совершенствование конструкции вибраторов в направлении улучшения качества и надёжности контакта излучающей плиты с грунтом. Это особенно актуально для зимних работ.

Литература:

1. Циммерман В.В. Качество вибрационного излучения // Статья в журнале "Приборы и системы разведочной геофизики", 2004, №3, С. 19-21.

2. Юшин В.И. Мифы и парадоксы вибрационной сейсморазведки // Статья в журнале "Приборы и системы разведочной геофизики", 2007, №2, С. 5-8.

3. Циммерман В.В. Нелинейные свойства электрогидравлического вибрационного источника сейсмических сигналов // Статья в сборнике "Проблемы

нелинейной сейсмики" ИФЗ АН СССР – М.: Наука, 1987, С. 273-279.

4. Шагинян А.С., Циммерман В.В., Гинзбург В.С. Анализ динамики системы "Виброисточник – Среда" по уточнённой модели. Влияние упругости плиты // Статья в сборнике НПО "Сейсмотехника", 1983.

5. Шагинян А.С., Циммерман В.В., Гинзбург В.С. Нелинейные эффекты процесса возбуждения сейсмических волн электрогидравлическим вибратором // Нефтегазовая геология и геофизика, 1983, №12, С.14-16.

6. Закариев Ю.Ш., Казаков А.К., Циммерман В.В. Seismic Source Tester – инструмент супервайзера // Статья в журнале "Приборы и системы разведочной геофизики", 2007, №2, С. 46-48.

Подробнее об авторах



**Циммерман
Валерий Вильгельмович**
Главный специалист
НТЦ ПАО «ГЕОТЕК
Сейсморазведка», к. т. н.
Вибрационные источники
сейсмических сигналов.



**Закариев
Юсуп Шимагомедович**
Генеральный директор
ЗАО НПЦ
"ГеоСейсКонтроль"



**Зозуля
Андрей Петрович**
Главный специалист
НТЦ ПАО «ГЕОТЕК
Сейсморазведка».
Системы управления
невзрывными источниками
сейсмических сигналов.

Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть I

■ Жуков А.П., Коротков И.П., Тищенко А.И., ООО «Геофизические Системы Данных, г. Москва

За годы, прошедшие со дня первого практического применения технологии АВИСейс® [1], адаптивная сейсморазведка продолжала активно развиваться, что явилось причиной появления данной статьи. Надеемся, что данная публикация поможет геофизикам-практикам глубже понять основные принципы предлагаемых технологий, возможности их использования в тех или иных сейсмогеологических условиях и поставленных задачах.

На наш взгляд возможности улучшения технических характеристик электрогидравлических виброисточников в настоящее время почти исчерпаны и дальнейший прогресс вибрационной сейсморазведки перемещается в сторону использования широкополосных управляемых сигналов, реализуемых современными системами управления виброисточниками [3, 4].

В данной статье более подробно описана так называемая базовая технология адаптивной вибросейсморазведки (АВИСейс®), технология возбуждения низкочастотного свипа (НЧ-свип, в зарубежной литературе – Low-dwell sweep), технология возбуждения широкополосного вибросигнала (Broad sweep®).

1. Аппаратурно-программные средства реализации адаптивных технологий.

1.1. Система управления виброисточниками - GDS-II (Geophysical Digital System)

Предыдущие системы управления виброисточниками GDS-I, GDS-I+ были сняты с производства, поэтому ниже дается описание последней действующей модели – GDS-II.

Это - многофункциональная геофизическая цифровая система управления сейсмическими вибраторами, оснащенная радиосвязью и встроенными GPS/GLONASS приемниками, кроме обычных функций управления БУСВ (блока управления сейсмическим вибратором) в модернизированном варианте и на современной элементной базе, еще осуществляющая и работу по методикам адаптивной вибрационной сейсморазведки (рис. 1). Система управления состоит из универсальных устройств, каждое из которых способно работать в двух режимах: *Encoder*- связь между сейсмостанцией и вибраторами по радио; *Decoder*- управление вибраторами.



▲ Рис. 1. Блок управления сейсмическими вибраторами GDS-II, позволяющий проводить работы по методикам адаптивной вибрационной сейсморазведки.

В системе GDS-II реализованы все стандартные возможности работы с линейным (ЛЧМ) и нелинейными сигналами. Кроме этого реализовано:

- вычисление параметров адаптивных сигналов;
- вычисление параметров функционального нелинейного свип-сигнала по спектру адаптивного сигнала;
- вычисление и запись в память GF (T) – (GroundForce – «действующая сила») для использования при обработке виброграмм и районирования площади по условиям возбуждения;

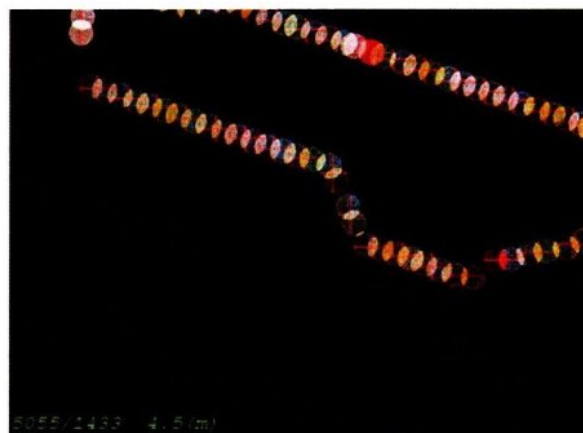
- режим минимизации уровня нелинейных искажений при возбуждении упругих колебаний на низких частотах;
- обеспечивается контроль качества в реальном времени (PSS, фаза, нелинейные искажения, величина усилия и т.д.);
- реализация произвольного свип-сигнала, задаваемого пользователем.

Блоки управления GDS-II, помимо связи с сейсмостанцией, оснащены системами спутниковой привязки и позволяют контролировать как реальное положение вибратора на местности в сравнении с плановым расположением ПВ, так и качество обработки ПВ по ряду параметров, с фиксацией данных контроля обработки ПВ на карте контроля. Ее пример показан на рис. 2.

Для каждого контролируемого параметра обработки площади задаются численные значения “пределов предупреждения” и “пределов ошибки”. Например, для фазовой ошибки обработки свипа задан предел предупреждения в 2° , а предел ошибки - в 3° . Группа вибраторов, где ошибки фазы при обработке данного ПВ менее 2° , будет отображена на карте кружком белого цвета, а группа, где хотя бы один вибратор обработал ПВ с отклонением 2° , но не больше 3° - желтым, а с отклонением 3° и более - красным.

Погрешность обработки может выражаться и в отклонении группы вибраторов от заданных координат на площади. Эта погрешность обозначается крестом белого, желтого или красного цвета в зависимости от того, как она соотносится с пределами предупреждения или ошибки, аналогично погрешностям обработки свипов на ПВ.

На рис. 2 флажками отмечены координаты ПВ, цифрами подписаны названия ПВ. Кружками отмечены координаты, на которых источники выполняли возбуж-



▲ Рис. 2. Фрагмент карты инструментального контроля обработки площади вибраторами с блоками управления GDS-II.

дение. В зависимости от качества обработки ПВ кружки имеют разные цвета:

белый - все параметры источника во время обработки ПВ не превышали уровень предупреждения;

желтый - хотя бы один из параметров источника превысил уровень предупреждения, но был ниже уровня ошибки;

красный - хотя бы один из параметров источника превысил уровень ошибки.

Крестами на карте отображены координаты центров групп вибраторов. Для этих координат задаются значения предупреждения и ошибки отклонения от ПВ. Цвет креста белый, если его отклонение от ближайшего пикета меньше значения предупреждения, если отклонение больше предупреждения, но меньше ошибки - желтый, если больше значения ошибки - красный.

1.2. Программное обеспечение Vibro Equalizer

Функциональное назначение и возможности программы. Основное назначение VibroEqualizer - обеспечение технической возможности выполнения сейсморазведочных работ по технологии Адаптивной Вибрационной Сейсморазведки (АВИСейс). Программа выполняет

расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) возбуждаемого вибрационного сейсмического сигнала на основе зарегистрированного отклика сейсмогеологической среды, а также обеспечивает передачу рассчитанной АЧХ в блок управления сейсмическим вибратором (БУСВ) GDS-II, для дальнейшего возбуждения сигнала [2].

Программа Vibro Equalizer включает в себя средства визуализации регистрируемых сейсмограмм и ряда важных характеристик, позволяя тем самым полностью контролировать происходящие процессы непосредственно во время выполнения работ по технологии АВИСейс®.

Разработанное программное обеспечение адаптировано для работы с различными аппаратными комплексами регистрации сейсмических данных. В частности, в рамках выполненных опытно-методических и производственных работ программа успешно функционировала в комплексе с сейсмостанциями Sercel 408/428/508 (Франция) и Прогресс-Т2/Т3 (ОАО «СКБ СП», Россия, г. Саратов).

Программа Vibro Equalizer обеспечивает:

- расчет амплитудно-частотной характеристики адаптивного сейсмического сигнала по данному алгоритму и его передачу в блок управления вибрационными сейсмическими источниками;
- визуализацию линейной и адаптивной сейсмограммы, а также их наглядное сопоставление;
- визуальное сопоставление АЧХ генерируемых свип-сигналов;
- сопоставление амплитудно-частотных характеристик зарегистрированных сейсмограмм.

Описание рабочего цикла программы.

Рабочий цикл Vibro Equalizer представляет собой выполнение следующих этапов регистрации и обработки данных.

- *Регистрация отклика сейсмогеологической среды:* программа выполняет чтение сейсмограммы, полученной при возбуждении ЛЧМ-сигнала. Данная сейсмограмма является настроенной. Подразумевается, что данная запись характеризует фильтрационные свойства сейсмогеологической среды и особенно верхней части разреза, на компенсацию влияния которых и ориентирована в первую очередь технология АВИСейс.

- *Расчет амплитудно-частотной характеристики среды:* на основе зарегистрированной сейсмограммы выполняется расчет амплитудного спектра записи в окне, выбранном специалистом-геофизиком. Рассчитанный амплитудный спектр можно считать частотной характеристикой геологической среды, на основе которой следует рассчитывать компенсирующий фильтр.

- *Расчет компенсирующего фильтра:* на основе рассчитанной характеристики сейсмогеологической среды Vibro Equalizer рассчитывает компенсирующую АЧХ по принципу обратного фильтра. Одной из задач технологии АВИСейс является обеспечение равномерного распределения энергии регистрируемого сигнала во всем диапазоне возбуждаемых частот, и решение данной задачи обеспечивается путем расчета необходимой амплитудно-частотной характеристики возбуждаемого сейсмического сигнала по заданному алгоритму.

- *Отправка рассчитанной характеристики сигнала в БУСВ GDS-II:* заключительный этап рабочего цикла программы – отправка рассчитанной АЧХ сигнала в блок GDS-II по локальной сети. В электронном блоке полученные спектральные коэффициенты преобразуются в свип-сигнал в виде амплитудно-временной развертки и отправляются далее в ведомые блоки для выполнения возбуждения сейсмического сигнала.

Интерфейс пользователя.

Интерфейс пользователя программы позволяет выполнить настройку всех необходимых для работы параметров, а также обеспечивает визуализацию регистрируемых и обрабатываемых данных.

Главное окно программы состоит из нескольких секций, каждая из которых отвечает за визуализацию данных определенного типа и другой информации (рис. 3).

Секции 1 и 2 главного окна программы обеспечивают визуализацию регистрируемых сейсмограмм (линейной и адаптивной) и их сопоставление. Сопоставление сейсмических записей позволяет визуально оценить изменение таких важных характеристик, как вертикальная разрешающая способность и динамическая выразительность отражений.

Секция 3 визуализирует амплитудно-частотные характеристики генерируемых свип-сигналов – линейного и адаптивного. Графическое сопоставление данных характеристик позволяет оценить степень изменения амплитудного

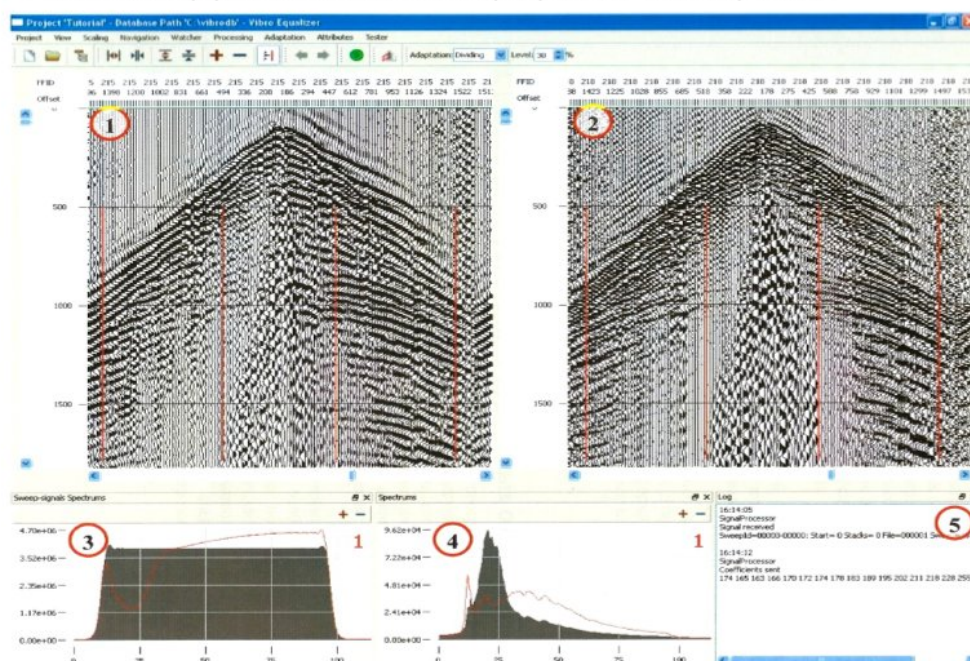
спектра адаптивного свип-сигнала и не допустить критического снижения энергии на каком-либо участке рабочего диапазона частот.

Секция 4 – сопоставление АЧХ зарегистрированных сейсмограмм до и после выполнения адаптации. Визуализация данных характеристик записей позволяет контролировать степень изменения амплитудного спектра сейсмограммы после применения адаптации, а именно – оценить равномерность распределения энергии регистрируемого сигнала в интервале возбуждаемых частот.

Секция 5 главного окна программы – так называемый журнал сообщений, отвечает за вывод важной служебной информации и позволяет пользователю контролировать процессы обмена данными между программой и БУСВ по локальной сети.

В целом, все перечисленные возможности интерфейса пользователя программы позволяют специалисту-геофизику оперативно принимать решения о выборе тех или иных параметров адаптации возбуждаемого сигнала, а также

▼ Рис. 3. Интерфейс пользователя программы Vibro Equalizer.



Секции главного окна программы:

1. Линейная сейсмограмма.
2. Адаптивная сейсмограмма.
3. АЧХ генерируемых свип-сигналов (линейного и адаптивного).
4. АЧХ зарегистрированных сейсмограмм (линейной и адаптивной).
5. Журнал сообщений программы.

выполнять предварительный анализ результатов адаптации непосредственно во время проведения опытно-методических и производственных работ.

Кроме того, программа содержит средства настройки стандартных параметров визуализации, таких как масштаб изображения, степень усиления амплитуды записи, опция обрезания амплитуд (Trimming) и т.п.

Исходные данные.

В качестве исходных данных Vibro Equalizer воспринимает сейсмические записи в формате SEG-D. Данный формат записи до сих пор является наиболее распространенным при выполнении регистрации полевых данных и поддерживается большинством распространенных моделей сейсмостанций.

Опциональное требование, предъявляемое программой к исходным данным – наличие геометрии в заголовках трасс записываемых сейсмограмм (координаты пунктов возбуждения и приема). Выполнение данного требования позволяет задавать и эффективно использовать пространственно-временные окна при выполнении адаптации сейсмического сигнала, существенно улучшая тем самым результативность работ по методике АВИСейс® в целом.

Некоторые современные модели сейсмостанций, в частности – Sercel 428, позволяют записывать проектную геометрию в сейсмические данные формата SEG-D непосредственно при выполнении регистрации. Традиционный стандарт SEG-D не предусматривает возможности хранения геометрии в заголовках трасс, и поэтому компания Sercel разработала собственную модификацию стандарта SEG-D, широко используемую в сейсмостанциях данного производителя. Данный факт также был учтен при разработке ПО

Vibro Equalizer, поэтому чтение формата SEG-D в спецификации Sercel полностью поддерживается программой, и проектная геометрия может быть использована при работе по технологии АВИСейс®.

Выбор пространственно-временных окон.

Пространственно-временные окна используются в программе для оптимальной настройки алгоритма адаптации на регистрируемый сейсмический сигнал в области целевых отражений и для исключения влияния интенсивных помех техногенного и иного характера. Кроме того, использование ограничивающих окон для расчета спектральной характеристики сигнала существенно сокращает время выполнения вычислений, что немаловажно для задачи сохранения производительности при проведении полевых работ.

На рис.3 представлен пример пространственно-временного окна, включающего набор целевых отражений. Окно выбрано таким образом, чтобы минимизировать влияние высокоамплитудной помехи от источника, что позволяет получить более достоверную частотную характеристику регистрируемого сейсмического сигнала.

Возможности Vibro Equalizer позволяют задать набор окон прямоугольной или криволинейной формы для расчета амплитудного спектра сигнала. Интерфейс пользователя программы обеспечивает простое редактирование границ окна путем их перетаскивания с помощью мыши.

Предварительная обработка данных.

Для получения наиболее достоверной характеристики настроенного сейсмического сигнала недостаточно одного

лишь использования пространственно-временных окон, необходимо выполнение предварительной обработки регистрируемых данных и программа обеспечивает возможность выполнения такой обработки.

Перечень одноканальных процедур обработки, включенных в состав Vibro Equalizer:

- 1) Прореживание трасс
- 2) Корреляция виброграмм
- 3) Полосовая частотная фильтрация
- 4) Регулировка амплитуд

Прореживание трасс: процедура может быть востребована, если существует необходимость исключить из анализа определенную совокупность трасс. Например, при работе с данными многокомпонентной сейсморазведки необходимо анализировать только вертикальную компоненту совокупной записи. И в этом случае удобно воспользоваться процедурой прореживания трасс, циклически исключаящей трассы из анализа по заданному признаку.

Корреляция виброграмм: программа позволяет выполнять корреляцию трасс виброграммы со свип-сигналом, записанным на техническом канале. Наличие данной процедуры позволяет выполнять регистрацию виброграмм без выполнения корреляции на сейсмостанции при проведении опытно-методических или производственных полевых работ. Регистрация виброграмм может быть необходима для выполнения последующей специфической обработки данных в рамках решения научно-исследовательских задач.

Полосовая частотная фильтрация: может быть необходимым при наличии в регистрируемых данных интенсивной помехи, характеризующейся узким частотным диапазоном. В этом случае

применение полосовой фильтрации повысит качество выделения полезной составляющей сигнала из общей сейсмической записи, что в свою очередь положительно скажется на эффективности выполнения адаптации возбуждаемого сейсмического сигнала.

Регулировка амплитуд: выполняет выравнивание абсолютных средних значений трасс путем применения нормирующего множителя, рассчитываемого для каждой трассы в отдельности. Данный тип регулировки амплитуд позволяет сбалансировать вклад ближних и дальних трасс в общую волновую картину, на основе которой формируется представление о настроенном полезном сейсмическом сигнале.

Адаптация возбуждаемого сигнала.

Одной из базовых идей технологии АВИСейс является принцип перераспределения энергии возбуждаемого сейсмического сигнала из области низких частот, где энергия регистрируемого сигнала избыточна, в область высоких частот для повышения соотношения сигнал/помеха в высокочастотной области спектра. Подразумевается, что настроенная сейсмограмма характеризует фильтрационные свойства участка сейсмогеологической среды и особенно – области ВЧР в точке возбуждения сейсмического сигнала. Таким образом, адаптированный возбуждаемый сигнал должен компенсировать недостающую энергию в спектральной области, и поэтому он, по сути, является обратным фильтром по отношению к исходному сигналу.

С технической точки зрения расчет адаптированного сейсмического сигнала сводится к инвертированию исходного сигнала путем его обратного деления в спектральной области. Схематически

постановка и решения задачи проиллюстрированы на рис. 4.

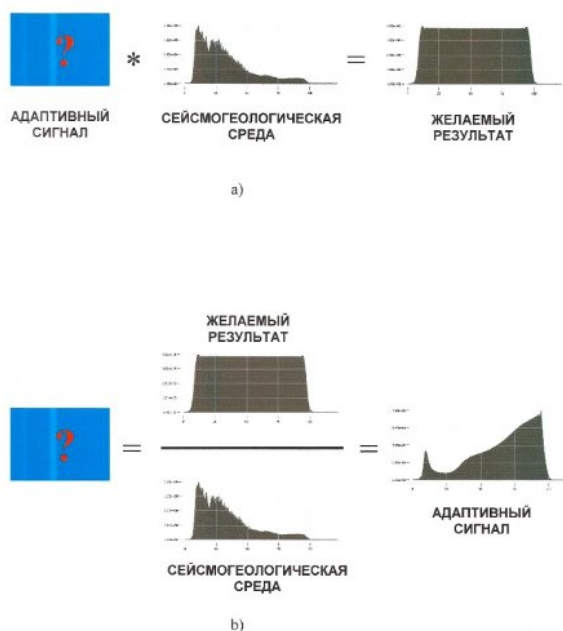
Рис. 4 (а) отражает сверточную модель неизвестного адаптивного сигнала и фильтра сейсмогеологической среды. В качестве желаемого результата рассматривается спектральная характеристика регистрируемого сейсмического сигнала с равномерным распределением энергии в рабочем диапазоне частот.

Рис. 4 (b) схематически изображает алгоритм расчета адаптивного свип-сигнала как результат инвертирования АЧХ сейсмогеологической среды в спектральной области.

Параметры адаптации свип-сигнала.

В качестве регуляризирующего параметра алгоритма введен так называемый «коэффициент адаптации», обеспечивающий исключение крайних вариантов решения. Коэффициент адаптации задается в процентах. С физической точки зрения данный параметр определяет уровень энергии сигнала по отношению к максимуму, ниже которого возбуждае-

▼ Рис. 4. Адаптация возбуждаемого сигнала: а) – схематическая постановка задачи; б) – принцип расчета адаптивного сигнала.

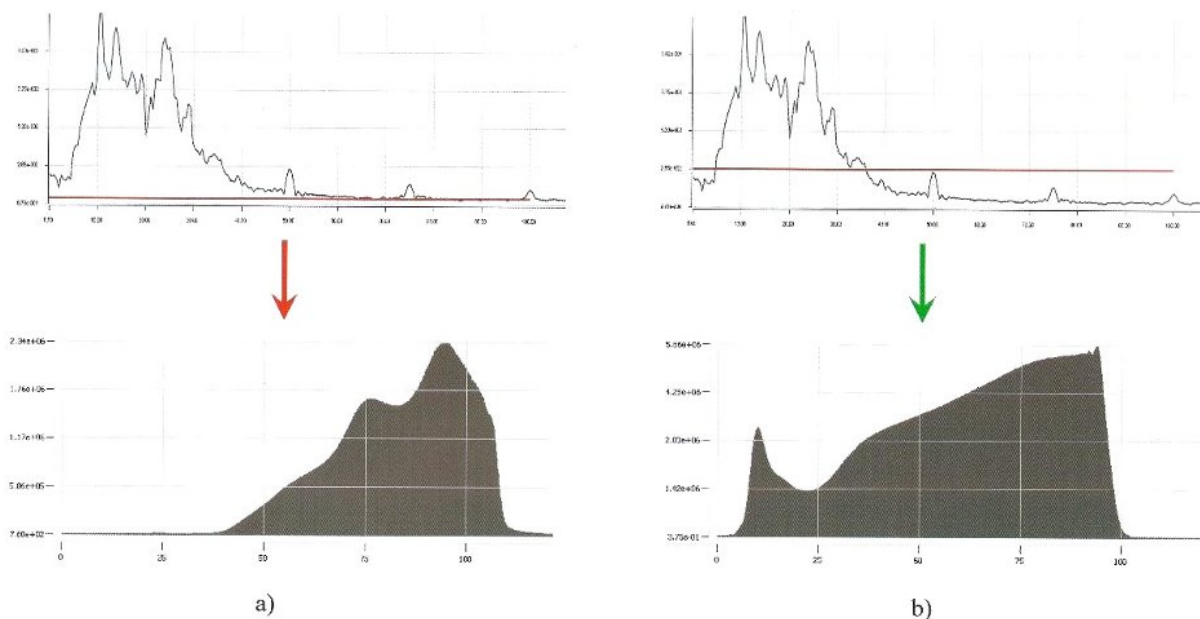


мый сейсмический сигнал не может опуститься на любом из участков рабочего диапазона частот. В выборе корректного значения данного параметра заключается одна из главных задач опытно-методических работ, выполняемых по технологии АВИСейс®.

На рис.5 (а) представлен тривиальный случай - пример расчета амплитудного спектра адаптивного свип-сигнала при нулевом значении коэффициента адаптации. В результате простой инверсии исходного спектра на полученной характеристике наблюдается почти полное отсутствие энергии возбуждаемого сигнала в самом эффективном сейсмическом диапазоне частот – от нуля до 40 Гц. Это означает, что в данном случае будет выполнено формальное перераспределение энергии из низких частот в высокочастотную область спектра, но желаемый результат не будет достигнут в связи с отсутствием энергии в основном диапазоне частот.

Рис. 5 (b) иллюстрирует другой случай – расчет адаптивного спектра при значении коэффициента адаптации 20%. Результат выполненного преобразования показывает, что выбранное значение коэффициента адаптации, с одной стороны, обеспечивает равномерное распределение энергии на минимально-необходимом уровне во всем интервале частот, и, в то же время, позволяет реализовать существенное и эффективное перераспределение избыточной энергии в область высоких частот.

Таким образом, выбор оптимального значения коэффициента адаптации позволяет добиться желаемых результатов и при этом избежать падения уровня возбуждаемой энергии на отдельных участках спектра до критически низкого уровня.



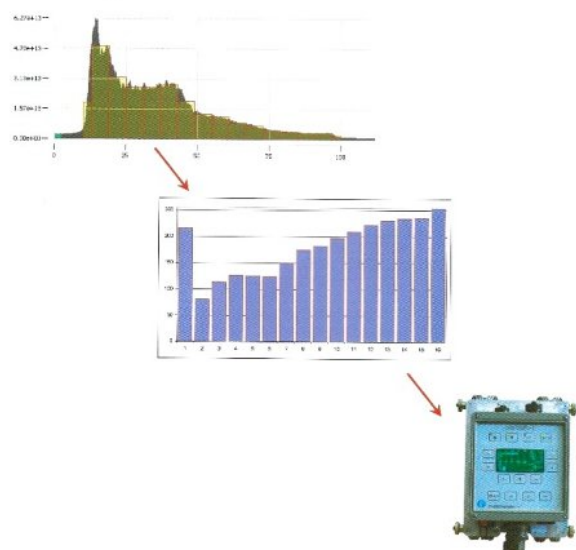
▲ Рис. 5. Варианты расчета адаптивного свип-сигнала при различных значениях параметра «коэффициент адаптации»: а) - коэффициент адаптации = 0%; б) - коэффициент адаптации = 20%.

Взаимодействие программы с БУСВ GDS-II.

Заключительным этапом работы Vibro Equalizer является передача рассчитанной амплитудно-частотной характеристики адаптивного сигнала в блок управления виброисточником GDS-II. С целью минимизации временных затрат на выполнение данного этапа, рассчитанный амплитудный спектр сигнала дис-

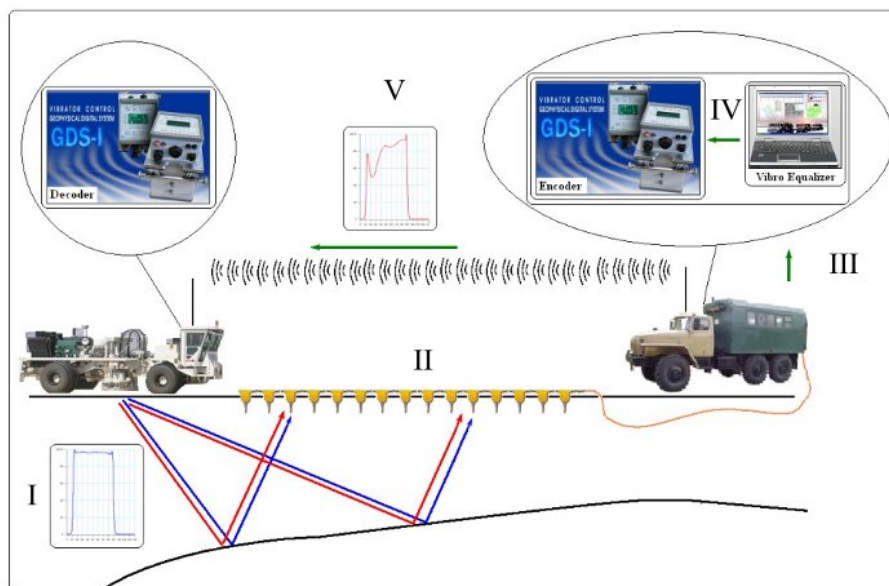
кретизируется 16-ю частотными интервалами и в виде набора амплитудных коэффициентов передается по локальной сети ВПО управления оборудованием (рис. 6). В дальнейшем переданные амплитудные коэффициенты преобразуются во временной ряд значений амплитуды, на основе которого и выполняется физическое возбуждение сейсмического сигнала.

▼ Рис. 6. Схема передачи амплитудного спектра в БУСВ GDS-II.



2. Технология адаптивной вибрационной сейсморазведки (АВИСейс®)

Основной причиной, побудившей исследователей разработать данную технологию являлось неудовлетворенность результирующими данными, получаемыми с применением стандартных ЛЧМ-сигналов. При этом за счет частотно-зависимого затухания, обусловленного сложно-построенной ВЧР, спектр колебаний сужается, приводя к значительной потере разрешенности данных, которую, зачастую не удастся повысить на этапе обработки. Сложилось стойкое мнение, что вибрационные



- I. Генерация линейного свип-сигнала на каждом ПВ при первом накоплении;
- II. Регистрация отклика от геологической среды;
- III. Передача виброграммы в программу «Vibro Equalizer» для анализа и расчёта корректирующих коэффициентов;
- IV. Передача рассчитанных коэффициентов в шифратор (Encoder) «GDS-I» станции для расчёта нового свип-сигнала (адаптированного нелинейного) на основании полученных коэффициентов;
- V. Передача данного адаптивного нелинейного свип-сигнала в дешифратор (Decoder) вибрационных источников по радиоканалу для генерации последующих накоплений на данном ПВ.

▲ Рис. 7. Обобщенная схема работы по технологии адаптивной вибрационной сейсморазведки (АВИСейс).

данные всегда уступают данным, полученным с применением взрывных технологий. Как будет показано далее, - это не так. Возможности управления посылаемых вибросигналов позволяют получать такие результаты, которые не будут уступать, а во многих случаях и превосходить взрывные данные.

Адаптивная технология вибросейсморазведки (АВИСейс) – это технология, в которой по тем или иным установленным критериям (в данном случае достижение наиболее широкополосного амплитудно-частотного спектра полезных отраженных волн в целевом интервале времени) на основе анализа отклика среды на предварительно посланный сигнал осуществляется выбор оптимальных рабочих нелинейных вибросигналов, оптимизирующие заданные параметры сейсмической записи, причем процесс выбора осуществляется в реальном времени и в автоматизированном режиме[4].

На рис. 7 изображена обобщенная схема работы по технологии АВИСейс.

- при первом накоплении на каждом ПВ генерируется ЛЧМ-сигнал;

- производится регистрация отклика среды на этот сигнал;

- виброграмма передается в программу VibroEqualizer для анализа и расчета коэффициентов адаптивного вибросигнала;

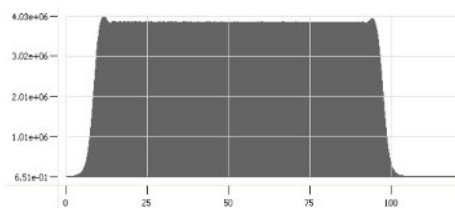
- передача рассчитанных коэффициентов в шифратор (Encoder) GDS-II станции для расчета нового свип-сигнала (адаптивного, нелинейного) на основании полученных коэффициентов;

- передача рассчитанного адаптивного нелинейного свип-сигнала в дешифратор (Decoder) вибрационных источников по радиоканалу для генерации последующих накоплений на данном ПВ.

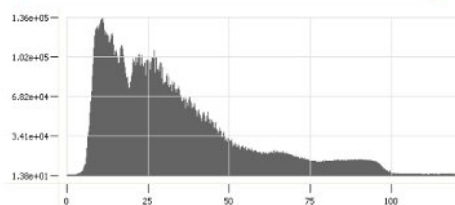
Еще раз подчеркнем, что весь вышеописанный процесс адаптации происходит в реальном времени и в автоматическом режиме.

На рис. 8 показана схема вычисления спектра оптимального адаптивного свип-сигнала на реальных данных. Обращаем внимание на α -коэффициент адаптации (параметр регуляризации, или фактор шума), который необходим для исключения неопределенности на участках спектра с небольшим уровнем сигнала.

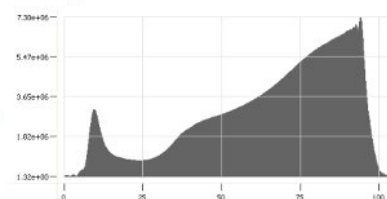
СПЕКТР желаемого
отклика среды на
адаптивный свип



СПЕКТР отклика на
лчм-свип - АЧХ
геологической среды



СПЕКТР
адаптивного сигнала



$$S(f)_{\text{avis}} = \frac{1}{S(f)_{\text{response}} + \alpha} \quad \alpha - \text{коэффициент адаптации}$$

▲ Рис. 8. Схема вычисления спектра оптимального адаптивного свип-сигнала.

При проведении опытно-методических работ этот параметр является единственным, который тестируется на конкретной площади исследований.

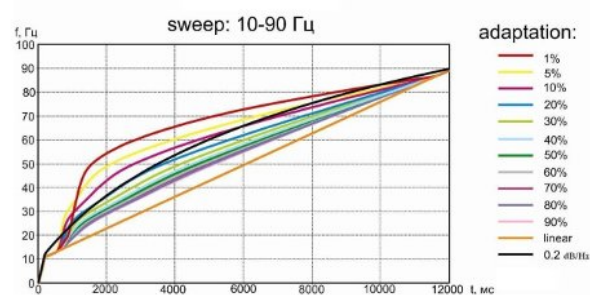
На рис. 9 изображено семейство графиков $f(t)$ для адаптивного свип-сигнала в зависимости от коэффициента адаптации. Коэффициент адаптации задается в процентах - от 1% - до 90%.

При $\alpha = 1\%$ - самый жесткий режим адаптации. При этом участок частотного диапазона свип-сигнала от 10 до 50 Гц реализуется меньше, чем за 2 сек (общая длина свип-сигнала 12 сек). Оставшаяся часть частотного диапазона (50 – 90 Гц) реализуется за оставшееся время. При $\alpha = 90\%$ свип-сигнал становится квазилинейным.

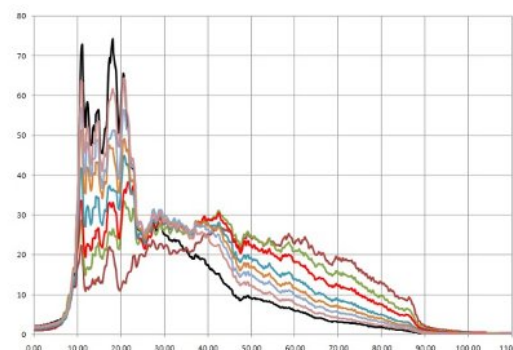
На рис. 10 показано семейство спектров откликов для семейства адаптивных свип-сигналов в зависимости от коэффициента адаптации по реальной сейсмограмме.

Хорошо видно, как при уменьшении коэффициента адаптации происходит перераспределение посылаемой энергии свип-сигнала из низкочастотной части (10 – 35 Гц) в средне-высокочастотную часть (35 – 90 Гц).

Совершенно закономерно, что при этом спектр становится в диапазоне $\alpha=15\text{-}25\%$ близким к прямоугольному хотя общий уровень энергии несколько

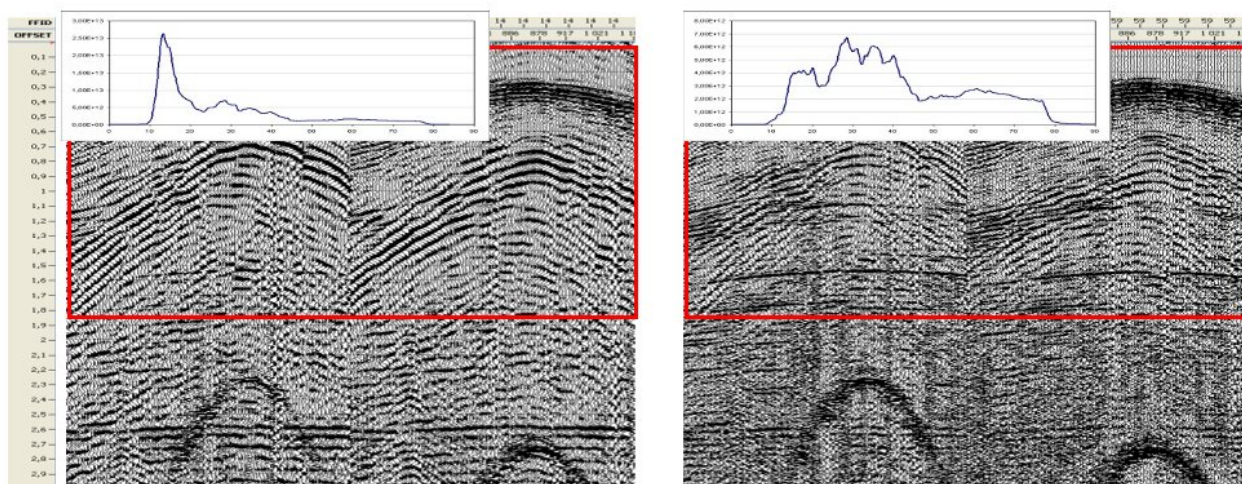


▲ Рис. 9. Семейство графиков $f(t)$ для адаптивного свип-сигнала в зависимости от коэффициента адаптации.



▲ Рис. 10. Спектры откликов для семейства адаптивных свип-сигналов в зависимости от коэффициента адаптации по реальной сейсмограмме.

снижается. На рис. 11 показаны реальные коррелограммы, полученные с ЛЧМ - и адаптивными сигналами (коэффициент адаптации = 20%). В проведенных многочисленных опытно-методических работах был определен диапазон коэффициентов от 10 до 30%, наиболее эффективных с точки зрения расширения спектра возбуждаемых колебаний.



Линейный свип

Адаптивный свип

▲ Рис. 11. Сравнение фрагментов коррелограмм 3Д и их спектров: линейный свип-сигнал 1 0-80 Гц, адаптивный свип-сигнал 10-80 Гц (фактор шума 20%)

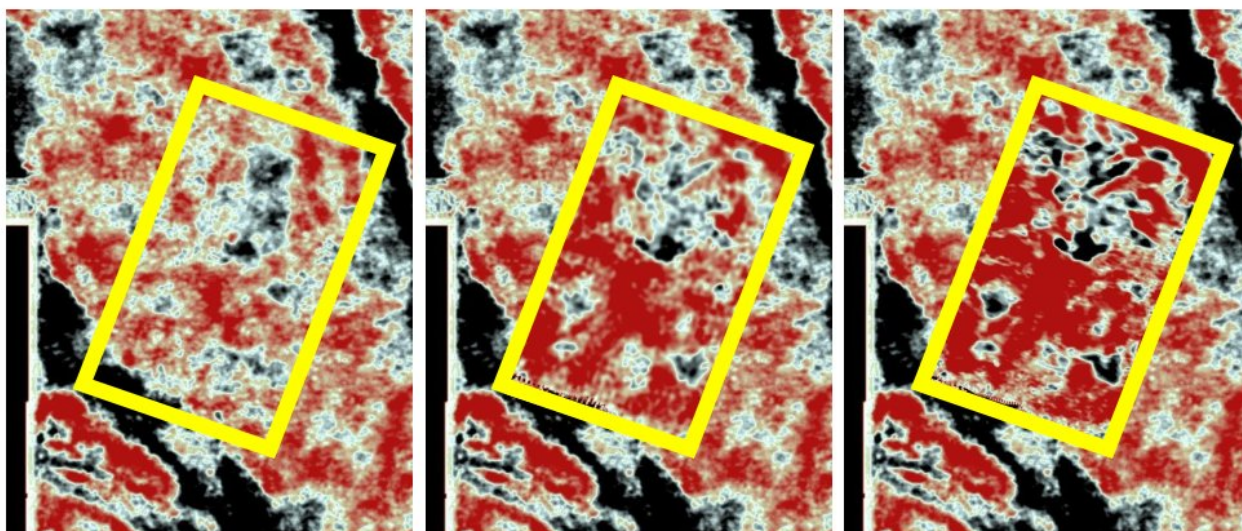
Адаптация выполняется на каждом ПВ, хотя не исключен вариант изменения возбуждаемого сигнала только при резкой смене поверхностных условий.

На Рис. 12 изображены одни из первых результатов опытно-методических работ на севере Ямало-Ненецкого округа с применением технологии АВИСейс. Необходимо пояснить, что несколько лет назад вся площадь была отработана с применением стандартной вибротехнологии (линии ЛП и ЛВ размещаются ортогонально с интервалом 300 м, ЛЧМ-

сигнал, группирование 4-х виброисточников).

По технологии АВИСейс (ЛП ЛВ – 100-200м) была отработана площадь ~ 30 кв.км в центре структуры. Обработка как старых, так и новых данных проводилась по единому графу. Для того, чтобы разделить эффекты, создаваемые применением технологии АВИСейс и уплотнением системы наблюдений по новым данным было получено два куба, - с плотной (ЛП x ЛВ = 100x200м) и разряженной (ЛПxЛВ=300x300м).

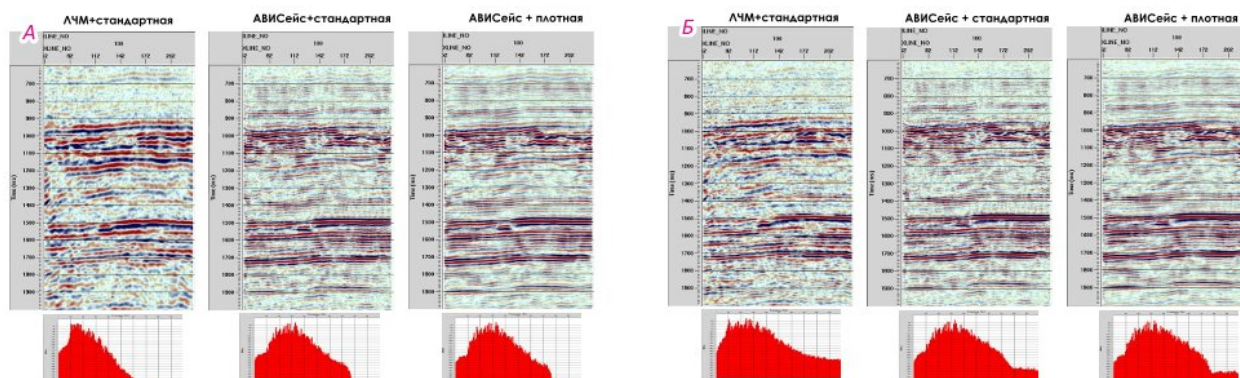
▼ Рис. 12. Повышение динамической выразительности и разрешённости сейсмической записи при совместном применении АВИСейс и плотной съёмки. Временные срезы - на уровне сеноманской залежи.



ЛЧМ + стандартная съёмка
(ЛПxЛВ=300x300 кв.м, бин 25x25 кв.м)

АВИСейс + стандартная съёмка
(ЛПxЛВ=300x300 кв.м, бин 25x25 кв.м)

АВИСейс + плотная съёмка
(ЛПxЛВ=100x200 кв.м, бин 12,5x25 кв.м)



▲ Рис. 13. АВИСейс+уплотнение системы наблюдения: а - обработка без деконволюции, б - обработка после деконволюции.

Можно отметить значительное улучшение детальности изображения за счет только применения технологии АВИСейс. Увеличение плотности съёмки обеспечивает дополнительное улучшение соотношения сигнал/помеха, без изменения конфигурации горизонтального среза. В дальнейшем вся площадь ~ 1000 кв.км. была отработана по технологии АВИСейс®. Рассматриваемая технология оказалась оптимальной для севера Западной Сибири и в дальнейшем еще около 3 500 кв.км площадей была покрыта данным видом съёмки.

Часто задаваемым вопросом на презентациях технологии АВИСейс является следующий: зачем нам применять специализированные сигналы, в частности АВИСейс, когда можно с успехом выровнять спектр виброколебаний при обработке полевых данных. Да, различные алгоритмы деконволюции позволяют это сделать, и, как правило, входят в основной граф обработки сейсмических данных. Но, в случае плохого соотношения сигнал/помеха, а как известно, земная толща поглощает в значительной степени частотные составляющие свыше 45-50Гц, применение данной операции можно привести только лишь к зашумлению результирующих данных. Задача технологии АВИСейс – повысить энергию средне-высокочастотных составляющих вибросигнала уже в процессе полевых работ. При этом будет обеспечена кор-

ректная работа операции деконволюции при дальнейшей обработке. Рис. 13 демонстрирует данный эффект.

Эти данные были получены на одной из площадей севера Западной Сибири. Отметим на полученных разрезах аномалию на времени ~1500 мс. Здесь также, как и в предыдущем примере, были проведены работы по стандартной технологии и технологии АВИСейс (~25 кв.км.)

Один из вопросов, который часто возникает – «Вы формируете на каждом ПВ свой сигнал, при этом могут исказиться динамические характеристики записей. А кто сказал, что при возбуждении ЛЧМ-сигнала в земную толщу возбуждается одинаковый сигнал?» Ответ следующий – «Да, автокорреляционная функция ЛЧМ-сигнала имеет красивый компактный вид, но вибросигнал, проходя через ВЧР (а это десятки и даже сотни метров) будет искажаться в зависимости от характеристик ВЧР в той или иной точке профиля. Скорее наоборот, адаптивный сигнал пытается компенсировать искажающее влияние ВЧР при его посылке в земную толщу».

На рис. 14 изображены горизонтальные срезы рассматриваемой площади при посылке ЛЧМ - сигнала и сигнала АВИСейс. Хорошо видно значительное увеличение четкости изображения, в случае АВИСейс.

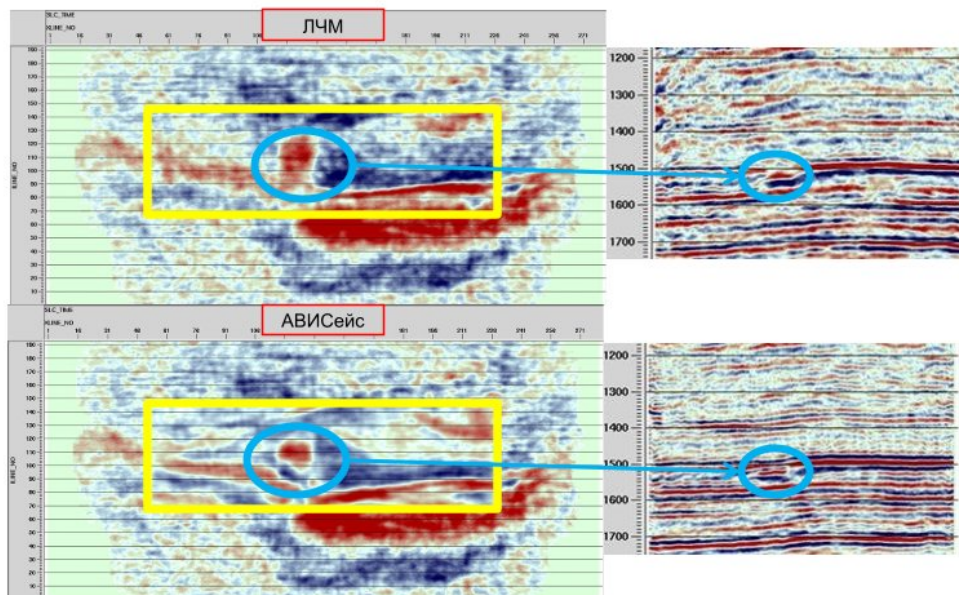


Рис. 14.
Сравнение
горизонтальных
срезов кубов 3Д
с линейным
и адаптивным
свип-сигналами.
Срез на времени
1516 мс.

Рис. 15. Отображение русловых объектов на срезах ниже ОГ М.

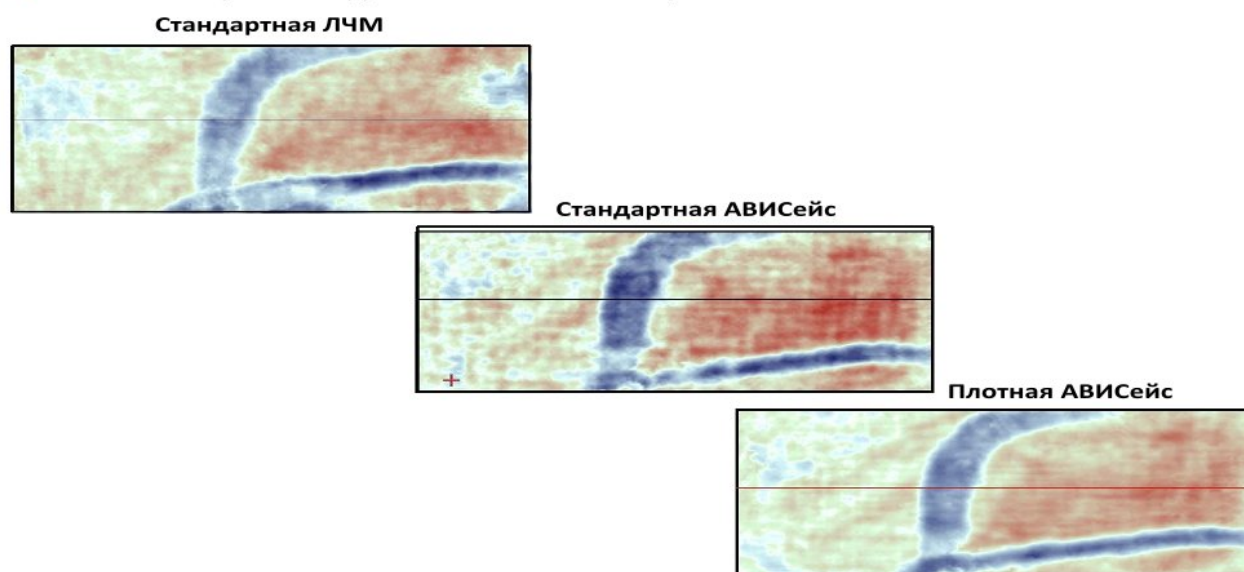
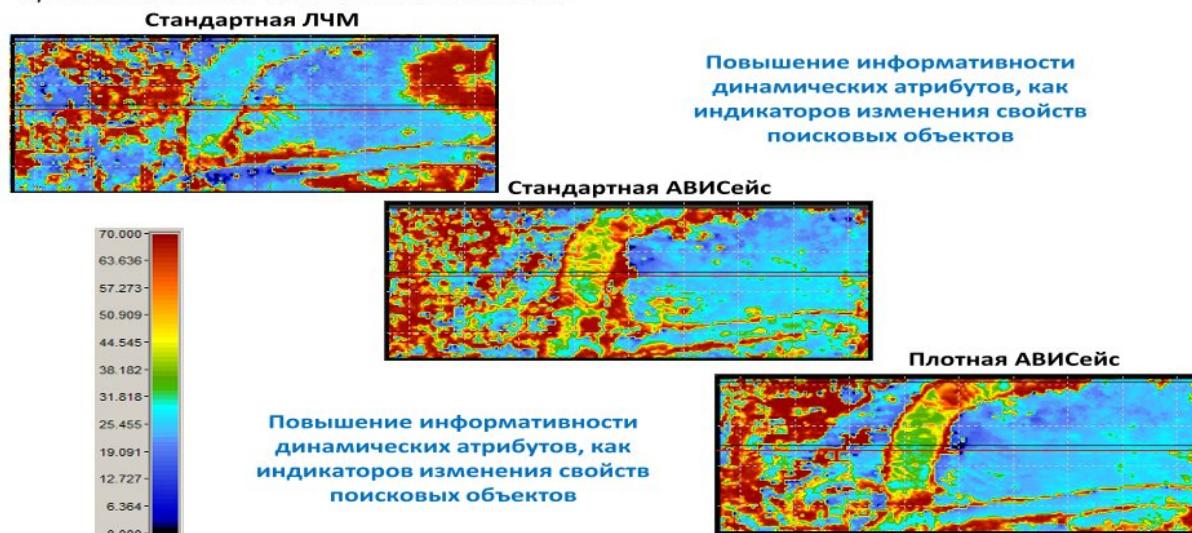


Рис. 16. Отображение русловых объектов на срезах ниже ОГ М.
Среднее значение мгновенной частоты.



На Рис. 15 показано изображение русловых объектов на срезах ниже ОГМ. На рис. 16 изображены эти же русловые объекты в средних значениях мгновенной частоты. В случае ЛЧМ-сигнала два канала имеют схожие динамические характеристики, тогда как адаптация, расширение спектра, позволило идентифицировать их как объекты с различной литологией.

Это служит хорошей иллюстрацией к вопросу об искажении динамических характеристик и, в дальнейшем, при проведении многочисленных опытно-методических работ, динамические характеристики были идентичные, как и в случае ЛЧМ-сигнала, либо более детализированные за счет более широкого частотного спектра виброколебаний.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО "НПП "Спецгеофизика" Калимулину Р.М., Малышеву А.С., Гридину П.А., Телкову М.П., внесшим большой вклад в реализацию идеи адаптации на основе создания соответствующих аппаратных и программных средств.

Литература

1. Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. М., ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000.
2. Жуков А.П. и др. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Издательство ГЕРС, Тверь, ISBN 978-5-88942-106-1, 2011.
3. Wei Z., Pan Y. Vibroseis source improvements towards broadband land acquisition. First Break, Volume 33, Issue 1, Jan 2015.
DOI: <https://doi.org/0.3997/1365-2397.33.1.79052>
4. Zhukov A. The adaptive vibroseis technology: Hardware, software, and outcomes. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013.
<https://doi.org/10.1190/segam2013-0542.1>

Подробнее об авторах



Жуков А.П.

генеральный директор
ООО "Геофизические
системы данных",
д.т.н.



Коротков И.П.

главный геофизик
ООО "Геофизические
системы данных",
к.т.н.



Тищенко А.И.

ведущий геофизик
ООО "Геофизические
системы данных"

Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на динамические и кинематические свойства отражённых волн

■ Романов В.В., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

Статья посвящена проблеме влияния приповерхностного высокоскоростного слоя на свойства волнового поля инженерной сейсморазведки МОВ-ОСТ. Рассматриваются такие эффекты, как изменение амплитуд и скоростей полезных и кратных отраженных волн в зависимости от наличия и мощности приповерхностного высоко-скоростного слоя.

Введение

При исследованиях верхней части разреза в инженерной сейсморазведке часто приходится иметь дело с маломощным приповерхностным слоем с аномально высокой скоростью распространения упругих волн. Им может быть слой сезонного промерзания, а также бетонное, асфальтовое или иное твёрдое техногенное покрытие [2]. За счет такого **приповерхностного высокоскоростного слоя** (ПВС) формируется инверсный разрез [11]. Как правило, мощность ПВС невелика — от 0,1 до 2,0 м, скорость продольных волн в нём составляет 2000–3000 м/с, поперечных — 800–1500 м/с волн [12]. Наибольшей «популярностью» в инженерной сейсморазведке МОВ-ОСТ пользуются горизонтально-поляризованные поперечные волны SH, так на отражающих границах их тип не изменяется, что делает наблюдаемое волновое поле более простым [3].

В нормальных(неинверсных) разрезах приповерхностная грунтовая толща характеризуется положительным вертикальным градиентом скорости, поэтому существенная часть сейсмограмм, полученных по схеме наблюдений $Y-Y$ [3], занята диспергирующими поверхностными волнами Лява. Эти волны образуются в приповерхностном слое конечной толщины, где происходит конструктивная интерференция объёмных SH волн. Значение вертикального градиента определяет диапазон фазовых скоростей

цуга волн Лява, поэтому уменьшение градиента положительно сказывается на прослеживании отражённых волн, особенно от неглубоких границ.

Структура поля поперечных SH волн существенно изменяется в инверсных разрезах. Если толщина приповерхностного слоя стремится к нулю, увеличивается до бесконечности или он является высокоскоростным, то волны Лява исчезают. Вместо этого в первых вступлениях наблюдается прямая волна со скоростью ПВС, а в последующих — отражённые SH волны, образованные проходящей однородной волной, сформировавшейся в подошве ПВС [4].

Несмотря на явные преимущества выполнения инженерной сейсморазведки в инверсных разрезах, рассмотренные в работах [7–9] существует и отрицательное влияние [2]. В работе поставлена цель осветить влияние ПВС на свойства последующих полезных и мешающих отражений.

Физико-геологическое моделирование

В качестве примере рассмотрим выполнение инженерной сейсморазведки МОВ-ОГТ на набережной реки Яузы, в центре Москвы. Физико-геологическая модель ВЧР здесь представлена четвертичными, юрскими и верхне-каменноугольными отложениями различного состава (Таблица 1). Наличие в разрезе аллювиально-болотных отложений приурочено к руслу малой реки Синички,

левого притока Яузы, ныне заключённой в подземный коллектор. В XIX веке речка была запружена, рядом располагались Летний военный госпиталь (сейчас детский сад 2617), Госпитальный мост, мельница и Католическое немецкое (сейчас Введенское) кладбище. Скорости и плотности для таблицы были выбраны по данным публикаций [6] [10].

В каменноугольных породах верхнего карбона встречаются зоны дезинтеграции, сложенные обломками известняков и доломитов и известковой мукой (слои 5 и 10 модели), сформированные в результате карстопроявления [5]. Кроме того, среди известняков встречаются пласты глин и мергелей, характеризующихся пониженными сейсмическими и плот-

▼ Табл. 1.

№	Состав, генезис, возраст	h , м	H , м	V_s , м/с	ρ , г/см ³
1	tQ_{IV} — техногенные насыпные пески, строительный мусор, голоцен	5	5	250	1,90
2	abQ_{IV} — аллювиально-болотные глины серо-коричневая, пластичные, иловатые, с прослоями торфа, голоцен	2	7	350	2,05
3	aQ_{III-IV} — аллювиальные пески средней крупности, серо-коричневые, рыхлые, водонасыщенные, верхний неоплейстоцен-голоцен	1	8	450	2,10
4	$J_{2-3\text{ vd-er}}$ — глины чёрные и голубовато-серые, полутвёрдые, великодворской и ермолинской свит оксфордского и келловейского ярусов	6	14	500	2,05
5	eC_{3tr2} — серые известняки, разрушенные до щебня, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	2	16	800	2,30
6	C_{3tr2} — красные глины, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	4	20	600	2,10
7	C_{3tr2} — серые известняки, трещиноватые, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	1	21	1200	2,40
8	C_{3tr2} — красные глины, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	5	26	600	2,10
9	C_{3tr1} — светло-серые известняки, трещиноватые, нижней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	4	30	1200	2,40
10	eC_{3tr1} — светло-серые известняки, разрушенные до щебня, нижней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	1	31	800	2,30
11	C_{3nv} — красные твёрдые глины, неверовской свиты хамовнической серии касимовского яруса верхнего карбона	8	39	600	2,10
12	C_{3nv} — голубовато-серые мергели, неверовской свиты хамовнической серии касимовского яруса верхнего карбона	---		700	2,20

ностными свойствами — слои 6, 8, 11 и 12. Рассматриваемая модель отражает основные особенности геологического разреза Московского региона — двухтрёхслойное строение толщи над скальным основанием, а также наличие зон пониженной скорости в толще скальных пород.

В рамках предложенной модели рассмотрено существование однократно и двукратно-отражённых волн, для которых по известным формулам были вычислены: время нормального отражения t_0 , амплитуда S , предельная эффективная и средняя скорости. Для расчета амплитуд учитывались такие факторы, как геометрическое расхождение (показатель степени — 1), эффективное поглощение (частотнезависимый декремент u — 0,10), отражение и прохождение [1]. Модель была рассмотрена в трёх вариантах — первоначальном (модификация А), с ПВС мощностью 0,5 м (модификация В) и ПВС мощностью 2 м (модификация С). Скорость поперечных волн в ПВС была выбрана 1200 м/с. Также по моделям были вычислены синтетические сейсмограммы с использованием импульса Берлаге (параметр затухания $\alpha=2,5$, преобладающая частота $f=35$ Гц; $n=1$) (1).

$$u(t) = t^n \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin 2\pi f t \quad (1)$$

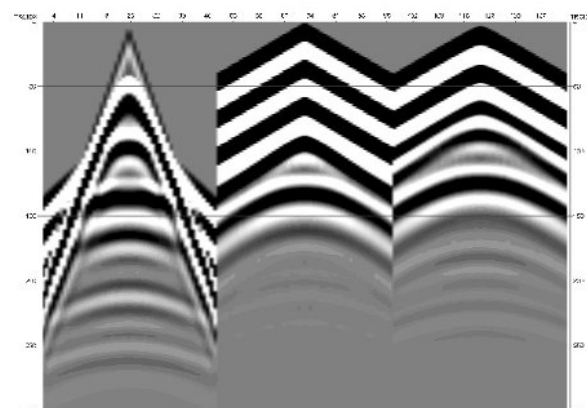
Полученные результаты

Синтетические сейсмограммы

На синтетических сейсмограммах отчётливо видно, как влияние ПВС вызывает выполаживание годографов всех отражённых волн и рост амплитуд кратных отражений в верхней части записи (Рис. 1).

Кинематические параметры

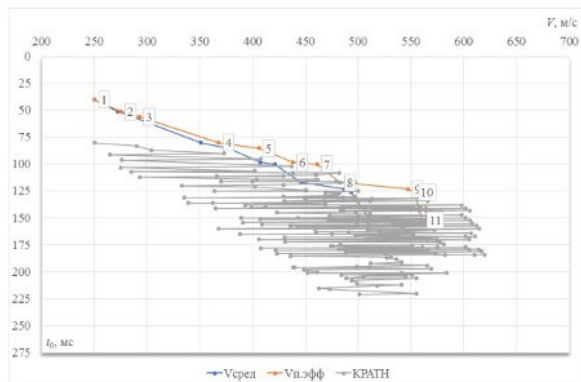
На рис. 2 представлены скоростные законы для упомянутых выше модификаций. Особое внимание следует обратить на различия средних и предельных



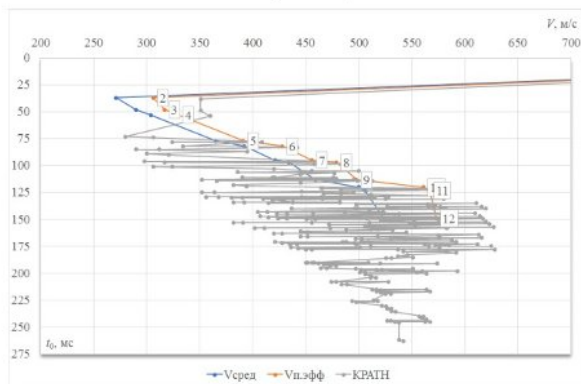
▲ Рис. 1. Синтетические сейсмограммы с осями синфазности однократных и двукратно-отражённых волн. Слева — направо: модификации А, В и С. По вертикальной оси — время вступления, мс.

эффективных скоростей. Первые применяются при вычислении глубинного разреза, вторые — приближенно определяются в результате скоростного анализа по сейсмограммам ОСТ. Использование предельных эффективных скоростей вместо средних приводит к систематическому завышению глубин отражающих границ, поэтому оценка различия между ними представляет практический интерес.

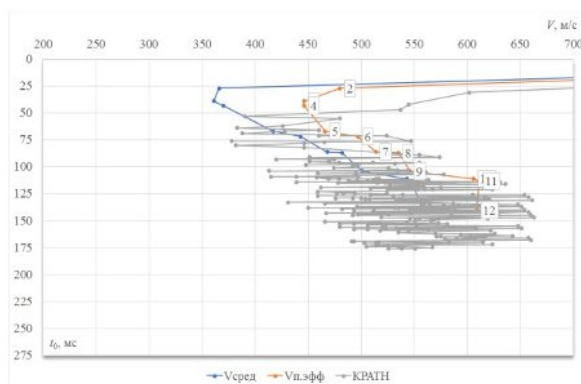
Можно заметить, что для модификации А различие предельной эффективной и средней скоростей с увеличением t_0 растёт, достигая 10 % (50 м/с) к кровле неверовских мергелей ($H=39$ м; $t_0=149$ мс). При наличии ПВС (модификации В и С) различие предельной и средней скорости вначале убывает, а потом начинает возрастать, причём с увеличением мощность ПВС эта тенденция проявляется ярче. Например, предельная эффективная скорость для предполагаемого отражения от кровли аллювиально-болотных песков ($H=7$ м; $t_0=27$ мс) в модификации С на 30 % (114 м/с) больше средней. Сами предельные эффективные скорости в инверсных разрезах возрастают на 10–200 м/с, с увеличением



Модификация А



Модификация В



Модификация С

▲ **Рис. 2. Скоростные законы.**
V_{сред} — средняя скорость однократных отражений, V_{п.эфф} — предельная эффективная скорость однократных отражений, КРАТН — предельная эффективная скорость двукратных волн. Цифрами показаны номера отражающих границ.

глубины отражающих границ различие уменьшается, то есть наибольшие отклонения наблюдаются в приповерхностной части разреза. Уровень искажений, которые вносит ПВС в предельные

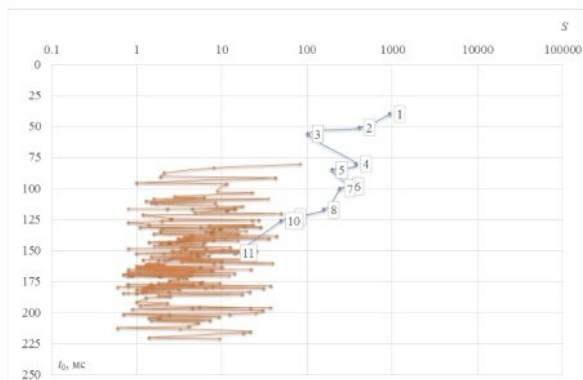
эффективные скорости прямо зависит от мощности слоя. При достаточно мощных (>0,5 м) ПВС в верхней части скоростного закона наблюдаются протяжённые участки, где предельная эффективная скорость однократных отражённых волн существенно завышена и быстро убывает с ростом t_0 .

Поверхностный высокоскоростной слой также влияет на распределение скоростей кратных волн. При скоростном анализе принято считать, что полезные отражения имеют большие фиктивные скорости, чем кратные. В нормальном разрезе большинство кратных волн действительно характеризуются меньшей предельной эффективной скоростью, что облегчает процесс их выделения на вертикальном спектре скоростей. На фоне большого количества высокоскоростных кратных волн выделяются лишь отражения от относительно глубоких границ в известняках верхнего карбона выделяются на фоне кратных с сопоставимыми скоростями.

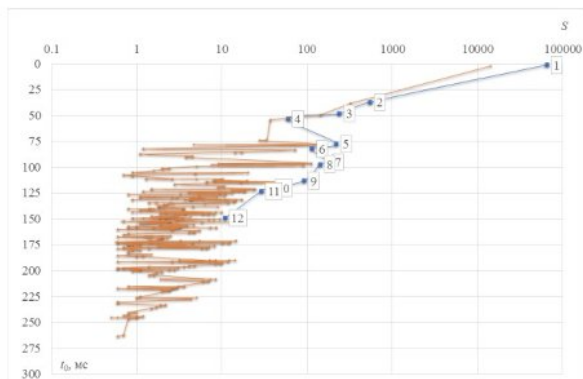
В модификации В частично кратные волны до времени 50 мс имеют предельные эффективные скорости больше чем у полезных волн. Все эти кратные волны формируются в подошве приповерхностного высокоскоростного слоя. Также высокоскоростные кратные волны наблюдаются вблизи отражений от более глубоких границ. В модификации С большинство кратных волн имеют повышенные скорости.

Динамические параметры

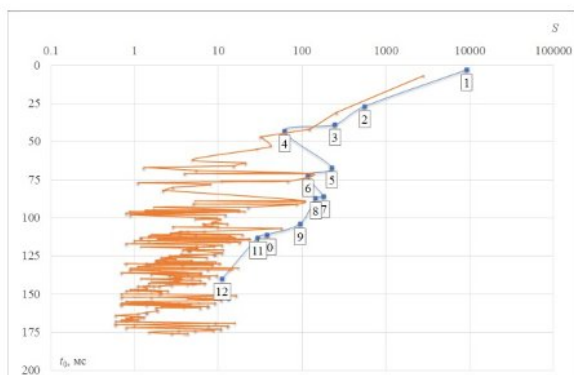
На рис. 3 представлены вычисленные амплитудные зависимости для полезных и кратных отражённых волн. В модификации А практически все кратные волны менее интенсивны, чем однократные отражённые волны в 10–100 раз. В модификации В уровень полезных отражений снижается, а кратных — возрастает, у всех полезных появляются высокоампли-



Модификация А



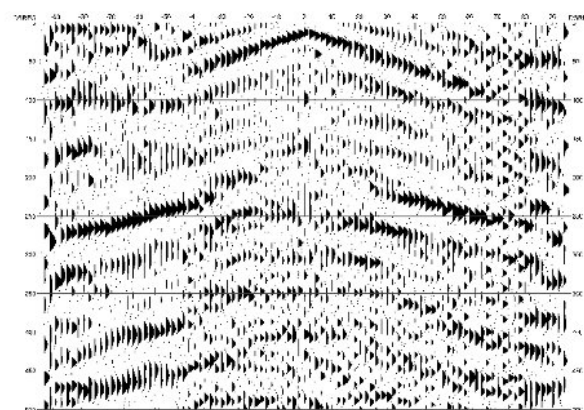
Модификация В



Модификация С

▲ Рис. 3. Амплитудные зависимости. Синей линией показана амплитудная зависимость однократных отражений, номера отражающих границ обозначены под соответствующими точками зависимости. Оранжевой линией изображена амплитудная зависимость кратных волн.

тудные волны-спутники. Отражение от подошвы в ПВС характеризуется амплитудой, значительно превышающей уровень всех остальных полезных отражённых волн. При переходе к модифика-



▲ Рис. 4. Полевая сейсмограмма МОВ. По вертикальной оси — время в мс, по горизонтальной — дистанция (хПП-хПВ), м.

ции С уровень отражения от ПВС снижается, другие амплитуды меняются незначительно, то есть влияние мощности ПВС на динамику последующих отражённых волн невелико.

В качестве доказательства полученных выводов, на рис. 4 представлена реальная полевая сейсмограмма, зафиксированная с сезонно-мёрзлого грунта толщиной около 2,8 м. Значительные амплитуды отражённых волн в интервале 0–50 мс не позволили отобразить прочие отражения без амплитудной регулировки. Множество практически параллельных осей синфазности с аномально низкой крутизной указывает на существенное влияние ПВС на структуру регистрируемого волнового поля.

Обсуждение результатов

Полученные результаты раскрывают преимущественно негативное влияние ПВС на скорости и амплитуды последующих отражений. Предельные эффективные скорости полезных отражённых волн искажаются сложным образом. В зависимости от толщины ПВС в верхней части скоростного закона выделяется зона, где предельная эффективная скорость убывает с ростом t_0 , чего не наблюдается в нормальных разрезах. Использование завышенных скоростей для расчёта глубинного разреза приведёт к система-

тическому завышению глубин отражающих горизонтов, а восстановленные пластовые скорости будут отличаться от истинных значений. Также влияние ПВС сказывается и на распределении предельных эффективных скоростей кратных волн. Оно проявляется в появлении высокоскоростных волн-спутников, затрудняющих интерпретацию вертикальных скоростных спектров. При наличии ПВС, независимо от его мощности, уменьшаются амплитуды целевых отражённых волн, снижается амплитудная разрешённость сейсмических изображений.

Выводы

Комплексный анализ результатов моделирования и оценки структуры полевых сейсмограмм позволил установить, что влияние ПВС на кинематику и динамику волновых полей МОВ-ОСТ негативно, несмотря на очевидный положительный эффект, заключающийся в исчезновении волн Лява. Устранение искажений, которое вносит этот слой в скорости полезных волн, а также подавление нежелательных кратных отражений, потребует особых подходов при скоростном анализе, оценке пластовых скоростей и вводе кинематических поправок.

Литература

1. Владов М. Л., Капустин В. В. О проблемах инженерной сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2014. № 2. С. 104-112.
2. Гиодман А. Г., Гранит Б. А. Инженерно-геофизические исследования карста на территории Москвы и Московского региона методом многоволновой сейсморазведки // Вестник МГСУ. 2010. № 4-2. С. 120-127.
3. Заалишвили В. Б. Исследование сейсмических волн, возбуждаемых искусственными источниками // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 3. С. 21-32.
4. Кауфман А. А., Левшин А. Л. Введение в теорию геофизических методов. Часть 5. Акустические и упругие волновые поля в геофизике: Пер. с англ. А.В. Кирюшина, А.Е. Соловченко. - М.: ООО «Недра- Бизнес-центр», 2006. - 663 с: ил.
5. Кутепов В. М., Козлякова И. В., Анисимова Н. Г., Еремина О. Н., Кожевникова И. А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 3. С. 215-226.
6. Несынов В. В., Трифонов Б. А., Миндель И. Г. Опыт использования разночастотных методов сейсморазведки для изучения сейсмических характеристик грунтов // В сборнике: Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образования ИГЭ РАН. Ответственный редактор В.И. Осипов. 2016. С. 670-674.
7. Романов В. В. Математическое моделирование при анализе данных метода отражённых волн в инженерной сейсморазведке // Геоинформатика. 2014. № 1. С. 51-56.
8. Романов В. В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. 2015. № 5-6. С. 44-49.
9. Романов В. В., Шнеерсон М. Б. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75-81.
10. Севостьянов В. В., Миндель И. Г., Трифонов Б. А., Рагозин Н. А. Геофизические методы в составе инженерно-геологических изысканий на территории мегаполисов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 6. С. 497-506.
11. Скворцов А. Г., Царев А. М., Садуртдинов М. Р. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза // Криосфера Земли. - 2011. - Т. 15. - №. 4. - С. 110-113.
12. Турчков А. М. Метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке // Seismic Technology. - 2013. - Т. 10. - №. 2

Перспективы технологии беспроводной регистрации сейсмических данных в режиме реального времени

■ Скотт Уильямс, Wireless Seismic, Inc., Хьюстон, США.

Современные технологии

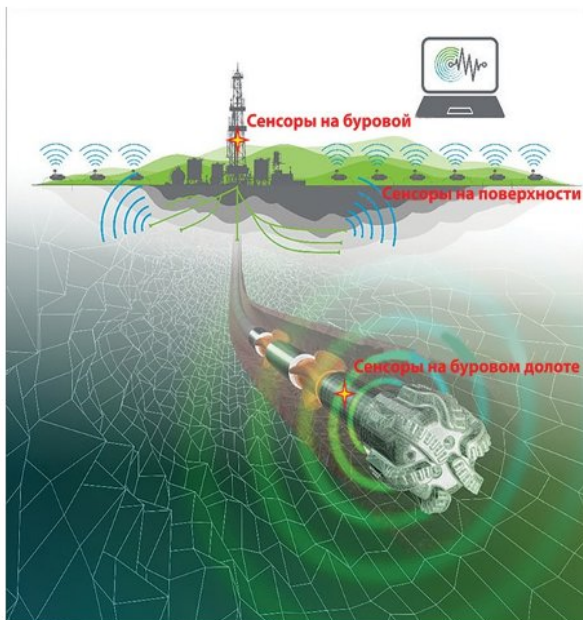
В течение последних нескольких десятилетий на рынке сейсмических исследований доминировали кабельные сейсмические системы регистрации. Кабельная телеметрия обеспечивает прием сейсмических данных в режиме реального времени на сейсмостанции и, следовательно, контроль качества данных в режиме реального времени. Некоторое время назад появилось поколение нодальных (слепых) бескабельных систем в секторе сейсмических исследований. Производители этих нодальных систем отмечают, что при использовании этой технологии наносится меньший экологический вред, обеспечивается гибкость геометрии регистрации, снижаются риски безопасности благодаря снижению веса и требуется меньше персонала. Также эта технология способствует снижению эксплуатационных расходов за счет более низких требований к обслуживанию системы и уменьшения общего времени простоя из-за разрывов кабеля и дополнительного устранения неполадок.

Однако пользователи нодальных систем соглашались не со всеми из данных утверждений, и отмечают, что не смогли сократить персонал. Почти все такие системы нового поколения, свободные от кабелей, требуют скачивания данных с каждого нода (узла) через какое-то время после регистрации. Это серьезно усложняет процесс сбора данных и контроля качества. Вследствие того, что данные хранятся локально в каждом ноду, требуется дополнительный персонал и средства передвижения либо для скачивания данных непосредственно

в поле с каждого приемника, что не решает вопрос с зарядкой, либо для доставки оборудования в базовый лагерь для выгрузки данных и зарядки батарей. Соответственно, необходимо использовать (а значит приобретать) как минимум на 15% больше оборудования для ротации под скачивание. Следующим шагом, данные должны быть преобразованы с помощью мощных рабочих станций для создания полных сейсмических записей, отсортированы, согласно произведенным возбуждениям и предоставлены для обработки. Каждый из этих шагов серьезно усложняет процесс работы и может пагубно сказаться на конечном результате, в виде потери сейсмических данных. Например из-за кражи блока, ошибок в процессе скачивания или преобразования. Пользователи таких систем обнаружили, что одна из самых больших проблем заключается в трудности оценки качества данных до окончания процесса обработки, который обычно происходит после снятия приемной расстановки.

Тем не менее нодальные системы внесли неоспоримый вклад в развитие сейсморазведки благодаря своей простоте и, в некоторых случаях, являются безусловно эффективной заменой кабельным.

И как ответ на требования рынка в предоставлении технологии объединяющей оперативную гибкость слепых нодальных систем и возможности кабельных систем в области контроля качества материала в реальном времени, полный контроль массива полевого оборудования с сейсмостанции, появилась бескабельная система RT2™ произ-



водства Wireless Seismic. Бескабельная система, работающая в режиме реального времени, упрощает получение информации из приемных пунктов, поскольку нет необходимости в посещении каждой приемной станции для извлечения данных и нет необходимости в повторной сортировке данных по порядку записи. Полная сейсмическая запись доступна непосредственно в сейсмостанции сразу после отстрела динамитом или виброисточником, что гарантирует высокое качество итогового материала.

RT2 обеспечивает все преимущества контроля качества кабельных систем, без использования кабеля и, следовательно, все преимущества слепых бескабельных систем, включая более высокую производительность наряду с сокращением эксплуатационных расходов сейсморпартии. Система радиотелеметрии в режиме реального времени устраняет вероятность простоя из-за разрывов на линии или потери данных из-за кражи блоков, содержащих много дней записи в локальной памяти.

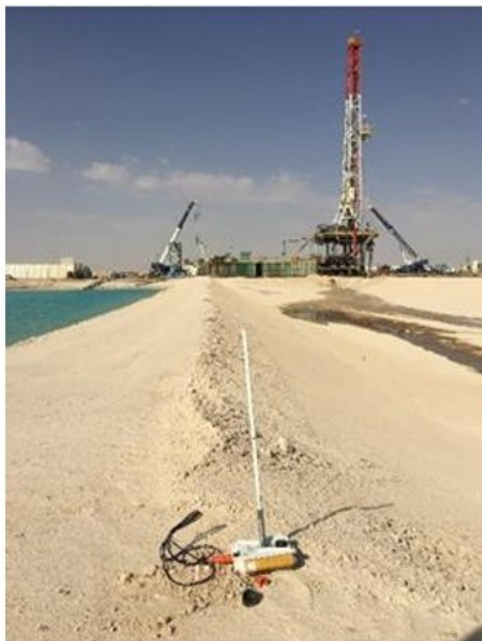
Этот тип системы уже доказал свою надежность получения высококачественных данных по всему миру.



Будущее беспроводных систем работающих в реальном времени

Возможность мгновенно получать данные большого объема через беспроводную сеть обещает не только расширить возможность применения данной технологии для различных приложений акустического мониторинга, доступных в настоящее время на рынке нефти и газа, но и помочь в реализации новых, еще не осуществленных проектов.

Мониторинг гидравлического разрыва пласта в режиме реального времени позволяет операторам управлять процессом гидроразрыва и оптимизировать добычу углеводородов из плотных нефтяных и газовых резервуаров. Получение и обработка данных в реальном времени позволяет оператору корректировать и настраивать параметры разрыва, непосредственно во время процесса и избежать избыточных финансовых и временных затрат, связанных с повторной мобилизацией. Использование беспроводной передачи данных в режиме реального времени должно обеспечить те же достижения в области операционной эффективности, что и при регистрации сейсмических данных, а также



повышение безопасности работ и снижение воздействия на окружающую среду. Некоторые примеры достижений в этой технологии включают в себя системы Halliburton SPIDRLive и Schlumberger FracCAT.

Помимо мониторинга ГРП, существуют дополнительные приложения акустического наблюдения, включая мониторинг самого процесса бурения. Инновационный проект DrillCAM компании Aramco (Бакулин и др., 2020) является прекрасным примером использования беспроводных сейсмических данных в реальном времени. С помощью DrillCAM компания Aramco записывает данные наземной сейсмики и данные датчиков, полученные от буровых долот, и с верхнего привода, чтобы лучше оптимизировать процесс бурения. Полевые испытания DrillCAM Seismic-While-Drilling (RT-SWD) продемонстрировали получение соответствующих скважинных геофизических данных, включая обновления скоростной сейсмической модели и дополнительные изображения перед долотом, подтверждающие интерпретацию и цель. Сейсмические исследования

в реальном времени также используются для мониторинга добычи из коллектора и усилий по увеличению нефтеотдачи. Эти исследования могут быть значительно упрощены за счет использования беспроводного оборудования, способного возвращать данные для анализа в реальном времени, что позволяет оператору оптимизировать операции.

Новые технологии, такие как реализация обработки путем объединения системы сейсмической регистрации, передающей данные также в режиме реального времени с дешевой и эффективной мощностью облачных вычислительных центров, и с достижениями в области машинной обработки, дадут возможность обрабатывать и даже интерпретировать полученные данные мгновенно. Таким образом позволят «на лету» получать отображение и построение земной модели, обеспечат обратную связь с сейсморазведочной партией, покажут, что полученных данных достаточно для отображения исследуемой области. Достижения в области машинной обработки сейсмических данных и выбора горизонта могут предоставить предварительный сейсмический разрез, а также модель исследуемого участка, в то время как партия все еще находится в поле, что позволит в режиме реального времени получить полные данные и проконтролировать качество полученного материала, что не достижимо с помощью нодальных систем. Высокоэффективные технологии включают в себя обратную связь с сейсмопартией в реальном времени информируя о влиянии различных источников шума на сейсмические данные. К ним относятся прерывистые источники акустического шума, такие как, например, транспортные средства или же поверхностные шумы,

которые могут влиять на качество полученных данных. Обработка в реальном времени поможет улучшить полученные сейсмические данные и идентифицировать оптимальные местоположения для приемных станций или источников. Затенение сейсмических волн из-за неправильной геометрии приемных линий также может быть оперативно устранено в режиме реального времени, значительно улучшая качество сейсмических данных, без необходимости повторной мобилизации сейсмопартии.

В любом случае, беспроводная сейсморазведка с регистрацией данных в режиме реального времени доступна уже сегодня. Эта технология имеет большие перспективы в случае необходимости предоставления информации операторам в режиме реального времени, для упрощения принятия безопасных, обоснованных решений, позволяющих сэкономить на затратах и улучшить процесс производства работ.

Литература:

Bakulin, Aldawood, Silverstov, Hemyari, & Poletto, "Seismic-while-drilling applications from the first DrillCAM trial with wireless geophones and instrumented top drive", The Leading Edge (2020 39 (6):422-429

Подробнее об авторах

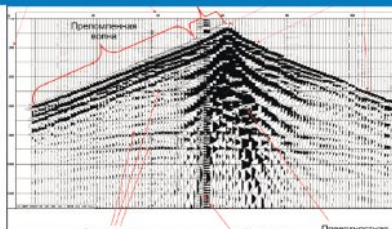
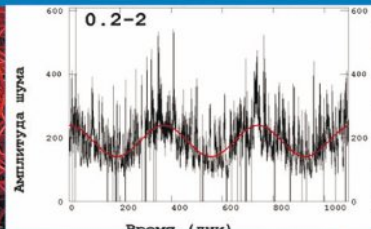
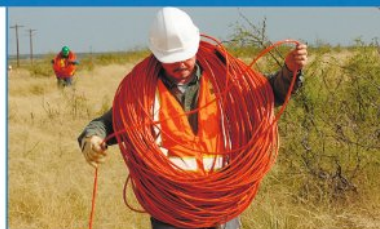


Скотт Уильямс

Wireless Seismic, Inc.
Хьюстон,
США

КАБЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

СПЕПЫЕ СИСТЕМЫ



ВЫХОД ЕСТЬ! wireless SEISMIC



НАДОЕЛИ КУЧИ
КАБЕЛЕЙ?
СПЛОЖНОСТИ РАЗМОТКИ?
ДОЛГАЯ НАПАДКА?

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ
БЕСКАБЕЛЬНАЯ
РЕГИСТРИРУЮЩАЯ
СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ RT2

ШУМНО ИЛИ НЕТ?
КАК ТАМ С
КАЧЕСТВОМ?
ТЕСТЫ В ДОПУСКЕ?



Беспроводные технологии передачи данных

Любые расстояния между приёмными
пунктами



Мониторинг ГРП

Непрерывная регистрация микросейсма в
реальном времени
Гарантия сохранности данных



Технологии Зелёной Сейсмики

Возможность полностью обойтись без рубки
сейсмических профилей



wireless SEISMIC

www.wirelesseismic.com
Москва, Кулаков пер. 9с1
Тел. +7 926 262 6071

ВРЕМЯ ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ – РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ

Изучение активных разломов в городских условиях Пекина с помощью пассивной сейсморазведки, выполненной приборами SmartSolo

■ Лю Ланьбо, University of Geosciences, г. Пекин

Наиболее серьезные геотехнические проблемы порождаются наличием разломов. Обнаружение разломов (особенно активных разломов) является первым шагом к проведению дальнейших инженерных исследований. В данной работе мы исследовали правдоподобность изображения зон разломов пассивными сейсморазведочными исследованиями.

Испытательный полигон находится в северном пригороде Пекина, вдоль южного берега реки Вэньюхэ, протекающей с северо-запада на юго-восток, где пересекается разлом Хуанчжуан-Гаолиин (HGF), активный в голоцене. Полученные результаты хорошо согласуются с сейсморазведочными исследованиями, проведенными с использованием активных источников возбуждения сейсмического сигнала и существующими скважинными данными.

Несомненно, метод активной высокоразрешающей сейсморазведки отраженных волн является надежным методом для выявления разломов. Недостатком является его высокая стоимость и невозможность использования взрывного источника в городских условиях. В отличие от этого, пассивные сейсморазведочные работы гораздо более дешевые в выполнении, позволяют так же эффективно локализовать разлом. Хотя разрешение изображения, полученного средствами активной сейсморазведки существенно выше, наш пассивный сейсмический эксперимент на участке реки Вэньюхэ показал, что и этот метод эффективен, особенно там, где стратиграфия значительно различается по разные стороны разлома.

Введение

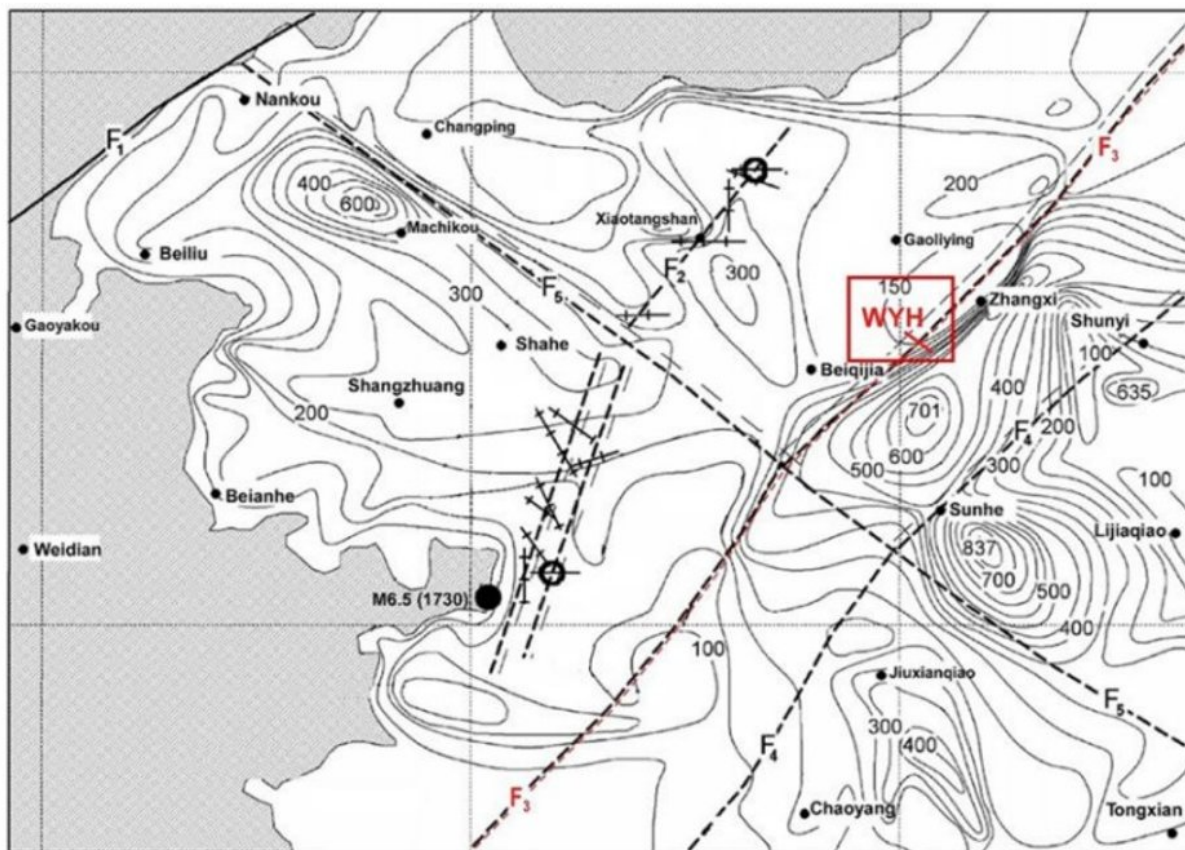
Активный разлом всегда провоцирует проблемы устойчивости грунтов, что важно при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Активные разломы, возникшие в четвертичном периоде активны и в настоящее время. С ними связывается высокая угроза новых подвижек грунтов, так как они являются границами между тектоническими блоками, продолжающими свою активность. Точное обнаружение таких разломов, особенно на урбанизированных территориях, имеет важное значение для городского планирования и снижения сейсмической опасности. Сейсмический метод является одним из важнейших геофизических методов во всех видах подземных исследований и обнаружения. Сейсморазведка благодаря своей высокой точности, разрешенности и глубинности является основным методом получения детального геологического разреза.

В статье представлена информация о состоянии HGF, полученная с помощью как

пассивных сейсмических наблюдений, так и традиционной активной сейсморазведкой. Геологическая информация контролируется скважинными данными по разные стороны разлома. Даны особенности разломов, полученные с помощью сейсмической интерферометрии с окружающим шумом при помощи численного моделирования с использованием теории изображений дневного света. Эти результаты приводят нас к выводу, что HGF проявляется как как нормальный активный разлом на участке реки Вэньюхэ.

Геологическая обстановка и значение Хуанчжуан-Гаолиин разлома

Пекин находится в Северо-Китайской тектонической провинции, характеризующейся формированием тектонических элементов, как результат сжатия с востока на северо-восток в следствии индоевразийской коллизии, а так же субдукции Тихоокеанской и Филиппинской морских плит. Правостороннее смещение удара, с севера на северо-восток создает активные



▲ Рис. 1. Геологическая карта, показывающая окрестности НЭ Пекина. В Хуанчжуан-Gaoliying вина (ХГФ) помечен как F3 со сломанной красной линией. Сейсморазведка на участке реки Вэньхуэ (WYH), обсуждаемая в данной работе, обозначается красной полосой в красной рамке, пересекающей разлом F3 (модифицированный на основе He et al., 2009). Условные обозначения: 1 - Позднечетвертичный активный разлом; 2-Раннечетвертичный разлом; 3-погребенный разлом; 4-Четвертичные отложения; 5-Раннемиоценовые коренные породы; 6-Четвертичная линия изопоха в метрах; 7 - линии геофизических исследований; 8-расположение скважины; 9-Эпицентр исторического землетрясения 1730 M6.5. F1: Разлом Нанькоу; F2: Разлом Дунбэйван-Сяотаншань; F3: разлом Хуанчжуан-Гаолиин; F4: разлом Лянсян-Шуньи; F5: разлом Нанькоу-Сунхэ. **WYH** - это область исследования, описанная в этой статье.

разломы, разделяющие блоки. Присутствует один значительный разлом иного - северо-западного направления - разлом Нанькоу-Сунхэ (Рис.1). Разлом Хуанчжуан-Гаолинь (HGF, F3 на Рис. 1) является западной окраиной Пекинского рифтового грабена, образовавшегося в третичное время и простирающийся примерно на 130 км в направлении ЮВ-СЗ.

В целом, HGF представляет собой погребенный разлом, покрытый четвертичными отложениями. Разлом был особенно активен в голоценовое время.

Это преимущественно нормальный разлом с правосторонним компонентом. Угол падения составляет 55°-75° на юго-восток. По данным глубинного каротажа, мощность четвертичных отложений составляет около 460 м в северо-западном блоке HGF, и может достигать 1080 м в юго-восточном блоке в районе реки Вэньхуэ (Рис. 1). С начала 1990-х годов наблюдается оседание грунта вдоль северного участка HGF, проявляющееся образованием заметных трещин грунта. Из-за неравномерного проседания по разные стороны

разлома, асфальтированные дороги, секущие HGF, должны регулярно ремонтироваться. Предыдущие геологические и геофизические работы, особенно в северном Пекине, значительно улучшили понимание активных особенностей HGF и поведения грунтов.

В последние несколько десятилетий сейсмическая активность в исследуемом районе в непосредственной близости от HGF относительно низкая. Последним значительным землетрясением в районе Пекина является «Событие №1730» с магнитудой 6.5 баллов, примерно в 10 км к западу от HGF.

Полевые сейсмические наблюдения на HGF

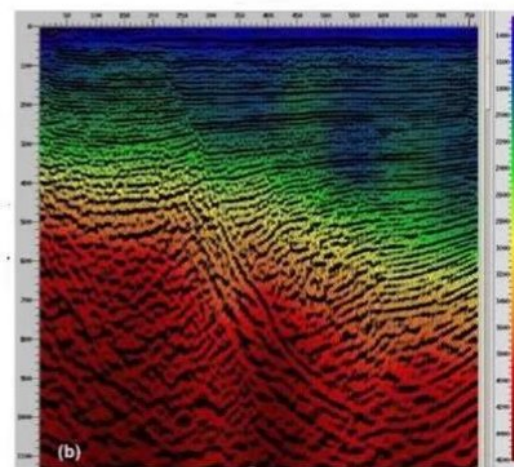
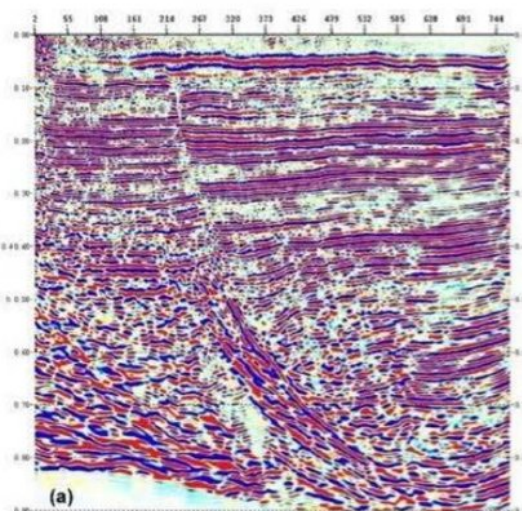
Пассивные сейсмические исследования принимают постоянно существующий окружающий шум в качестве естественных источников, беспорядочно распределенных внутри и на поверхности земли. Анализ шума позволяет оценить свойства горных пород. Такая технология проста и экономична в исполнении, не требует большого объема оборудования и использования дополнительных сейсмоисточников. Недостатками пассивных исследований является сложная обработка и длительное время наблюдения. В то же время, данная статья показывает, что по пассивным сейсмическим данным можно получить информацию, хорошо картирующуюся с активными сейсмическими работами.

Сейсморазведка АКТИВНОГО источника.

Активная сейсморазведка в данном районе была проведена в сентябре 2010 года. На этом участке было установлено, что глубина залегания грунтовых вод составляет около 6 м, что является благоприятным условием для активного



▲ Рис. 2. Район исследований Вэньюэхэ, Пекин.
* Красная пунктирная линия - Хуанчжуан-Гаоляйн разлом (HGF);
* ASLV – линия сейсмического профиля 2010 г.;
* TT54, TT-59 и TT-61 – геотермальные скважины



▲ Рис. 3. Сейсмический разрез по линии ASLV
(a) – до миграции,
(b) – глубинная миграция

сейсмического отражения сейсмического сигнала. Общая длина профиля составила 1,5 км (рис. 2), расстояние между геофонами - 4 м. Шаг ОГТ - 2 метра. Собственная частота вертикального геофона - 60 Гц, пункты приема устанавливались на 0,3 м ниже поверхности земли для достижения устойчивого сигнала. Шаг дискретизации - 1 мс.

В качестве сейсмического источника использовался падающий груз. Двойное накопление позволяло получать хороший сигнал. На участках ухудшения данных использовалось четыре накопления. Регистрация велась сразу по всей расстановке одновременно. 16-кратный профиль ОГТ показан на Рис. 3а.

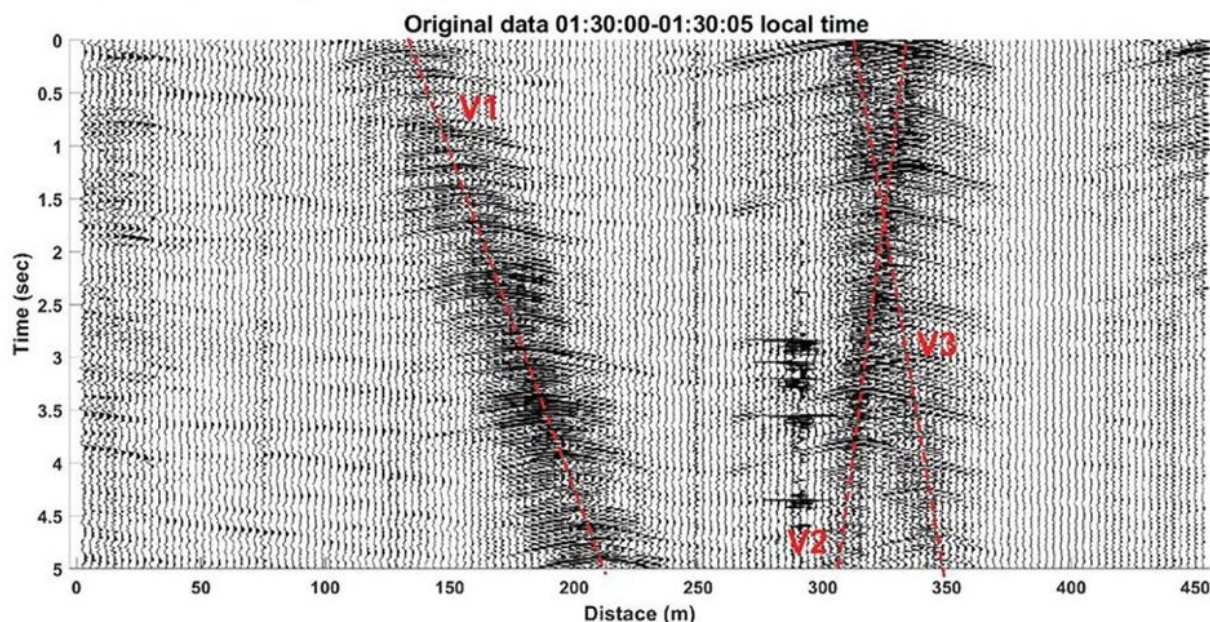
ПАССИВНАЯ сейсморазведка с использованием ВЕРТИКАЛЬНЫХ сенсорных датчиков SMARTSOLO

Пассивная сейсморазведка была проведена субпараллельно линии исследования ASLV на участке реки Вэньюхэ (Рис. 2) в августе 2018 г. Были развернуты

два типа короткопериодных сейсмических датчиков. Сначала вдоль южного берега реки Вэньюхэ было установлено 200 единиц датчиков SmartSolo чувствительностью 5 Гц (рис. 4). Исходная точка пассивных сейсмических наблюдений была определена на юго-восточном конце линии съемки, на углу пересечения дорог вдоль берега реки и той, что пересекает мост (рис. 2). Расстояние между пунктами приема SmartSolo 5 Гц составляло 3 м. Общая длина профиля составила $(200-1) \times 3 = 597$ м. Основываясь на предыдущих доступных данных активной сейсморазведки, разлом Хуанчжуан - Гаолиин пересекает пассивную сейсмическую линию в том месте, где находится датчик SmartSolo № 89. При этом расстояние от расчетной плоскости разлома до начала массива составляет около 270 м.

Частота дискретизации сбора данных SmartSolo составляет 1 мс, а максимальное время записи регистрации SmartSolo было более 3 ч. Интервал дискретизации

▼ Рис. 4. Фрагмент 5-секундных исходных данных вертикального компонента SmartSolo для временного окна с 1:30:00 до 1:30:05 по местному времени. Вибрации, вызванные тремя проезжающими транспортными средствами, могут быть четко идентифицированы при кажущихся скоростях 59,8 км/ч, -23,8 км/ч и 29,5 км/ч для транспортных средств V1, V2 и V3 соответственно.



времени в 1 мс означает, что наибольшая частота допустимой регистрации поступления энергии составляет до 500 Гц. Однако основные частотные составляющие городских шумов значительно ниже. Из-за полевых условий геофонная линия были установлены вдоль южной стороны местной дороги, проходящей по южному берегу реки Вэньюхэ (рис. 5 и 6). Движение на дороге представляет собой источник частого сильного когерентного шума, наблюдаемого на записях. Некоторые пассивные сейсмические записи содержат достаточно сильные и когерентные шумы, создаваемые проезжающими по дороге транспортными средствами (рис. 4). Однако, наш подход к анализу записи позволяет и эти локальные высокоэнергетические когерентные шумы использовать с точки зрения извлечения глубинной информации.

Пассивная сейсморазведка с использованием сейсмометров EPS2

По той же линии исследования, параллельно приборам SmartSolo, было размещено 24 единицы 3-компонентного сейсмометра EPS2, которые участвовали в записи пассивного сейсмического шума, для получения дополнительной. Расстояние между сейсмометрами EPS2 составило 24 м, причем первый датчик SmartSolo и первый датчик EPS2 расположены в начале линии наблюдения на юго-восточном конце линии съемки. На каждые восемь датчиков SmartSolo был установлен один датчик EPS2. Общая длина линии размещения EPS2 составила $(24-1) \times 24 = 552$ м. HGF пересекает массив EPS2 рядом с датчиком № 12. Частота дискретизации для датчиков EPS2 составляла $dt = 5$ мс. Максимальное время регистрации EPS2 составляет 3 799 058 сек, около 5 ч 16 мин.

Алгоритмы обработки данных

Сейсмическая интерферометрия (SI) с помощью кросс-корреляции (cross-correlation, CC) и автокорреляции (auto-correlation, AC) являются основным математическим алгоритмом для получения структурной информации из окружающего шума. Корреляции окружающих сейсмических вибраций широко и эффективно используются для восстановления импульсных реакций между двумя пассивными приемниками, как если бы на одном из них был установлен источник. Многочисленные исследования с использованием сейсмической интерферометрии окружающего шума показали, что данный метод прост, надежен и генерирует большое количество сигнатурных сигналов.

Клербут (1968) первым предложил концепцию «дневного изображения» (daylight imaging). Часть данных «дневного изображения» может быть определена как сейсмические данные, записанные на поверхности земли, но генерируемые случайно распределенными источниками в земле. Время каждого события источника «дневного изображения» представляет собой случайный временной ряд. Сейсмический дневной свет подразумевает, что существует много сейсмических источников, и их совокупная интенсивность так же ярка, как дневной свет. Сейсмическая визуализация «дневного изображения» происходит в результате корреляции одного сейсмического события в различных точках на дневной поверхности. Перекрестная корреляция двух событий в поверхностных точках А и В дает отклик, эквивалентный отклику отражения в точке В, генерируемому источником в А.

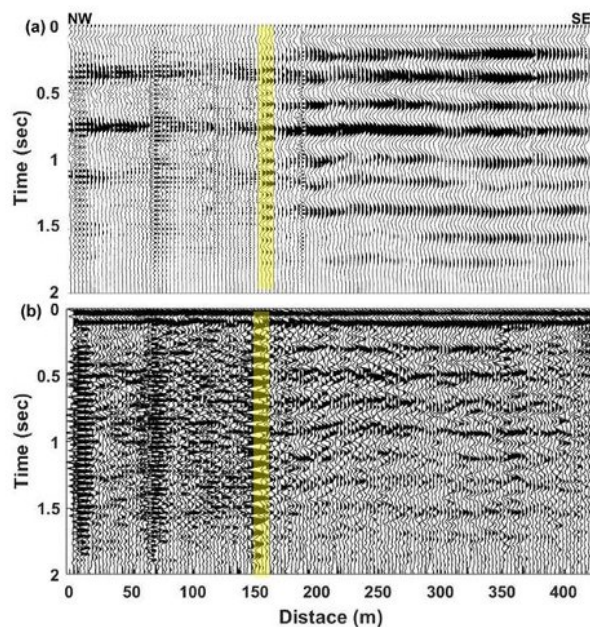
Клербут (1968) также продемонстрировал, что одна сторона автокорреляции акустической сейсмограммы, записан-

ной поверхностным приемником от источника плоской волны на глубине, является откликом отражения источника поверхностной плоской волны, записанного тем же приемником. Вапенаар и др. (2004) доказали, что результаты исследований Клербута (1968) могут быть обобщены и для трехмерной неоднородной среды.

Используя данный подход проводилась обработка в рамках данного исследования. Были выполнены автокорреляционные преобразования для зарегистрированных данных окружающего шума по вертикальной составляющей зарегистрированной датчиками SmartSolo. Чтобы воспользоваться преимуществами многокомпонентности современных сейсмометров, Hobiger et al. (2014) ввели одностанционную методику кросс-корреляции (cross-correlation SC) обработки окружающего сейсмического шума и сравнили ее результаты с установленными методами кросс-корреляции (CC) и автокорреляции (AC). По сути, SC - это корреляция двух различных компонентов одного трехкомпонентного сейсмического датчика. Учитывая, что для каждого сейсмометра доступны три компонентные записи, есть еще 3 комбинации SC рядом с 3 комбинациями AC. Мы используем этот метод для обработки 3х-компонентных данных окружающего шума, записанных сейсмометрами EPS2.

Результаты обработки и интерпретации

На рис. 6а показан результат автокорреляции (AC) данных, полученных вертикальными датчиками SmartSolo в течение одного часа. В качестве эталона и перекрестной проверки на рис. 6б показана эмпирическая функция Грина отражения с нулевым смещением, получен-



▲ Рис. 6. Изображения сейсмической интерферометрии с использованием данных SmartSolo. (а) Автокорреляция одночасовых данных окружающего шума с 2-секундным временным окном; (б) эмпирическая функция Грина, полученная путем взятия секундной производной по времени сложенной автокорреляции. *Прим. Желтая полоса показывает расположение основной зоны разлома.

ная с помощью вторичной производной по времени сложенной автокорреляции. Без какой-либо предварительной обработки, такой как фильтрация, результаты автокорреляции определенно содержат влияние поверхностных волн, которое выражается в виде доминирующих ревербераций 5 Гц (Рис. 6а). Однако, как это ни парадоксально, оба графика на рис. 6 показывают значительную разницу на левой и правой сторонах разлома. Слева от HGF (обозначенного вертикальной желтой полосой на Рис. 6), видна четкая отражающая граница примерно на 0,38 с. Если взять существующую стратиграфическую информацию, предоставленную журналами скважин, то глубина залегания коренных пород 460 м, что позволяет оценить скорость 2420м/с. Это хорошо согласуется с

Рис. 7. Результаты автокорреляции (AC) NS, EW и вертикальных компонентов (верхний ряд) и одностанционной кросс-корреляции (SC) NS-EW, NS-vertical и EW-vertical компонентов данных окружающего шума EPS2. Желтая полоска отмечает расположение основной зоны разлома.

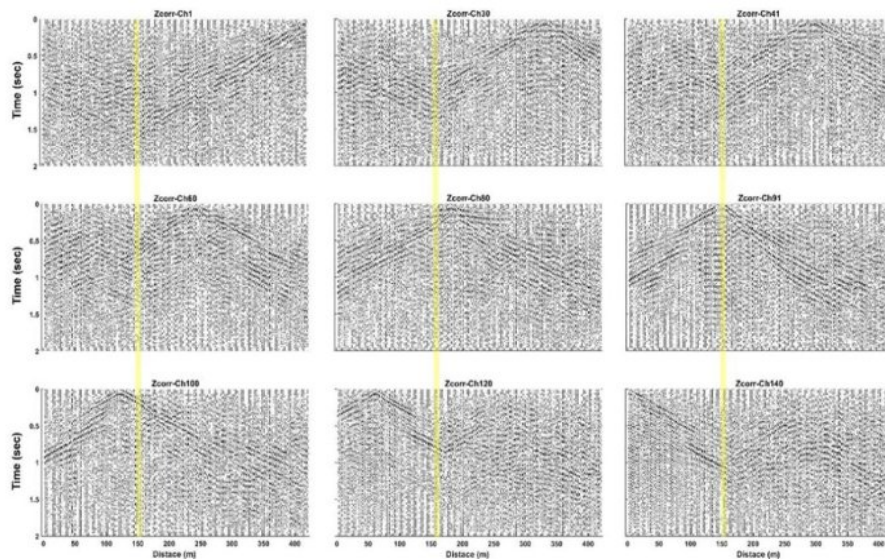
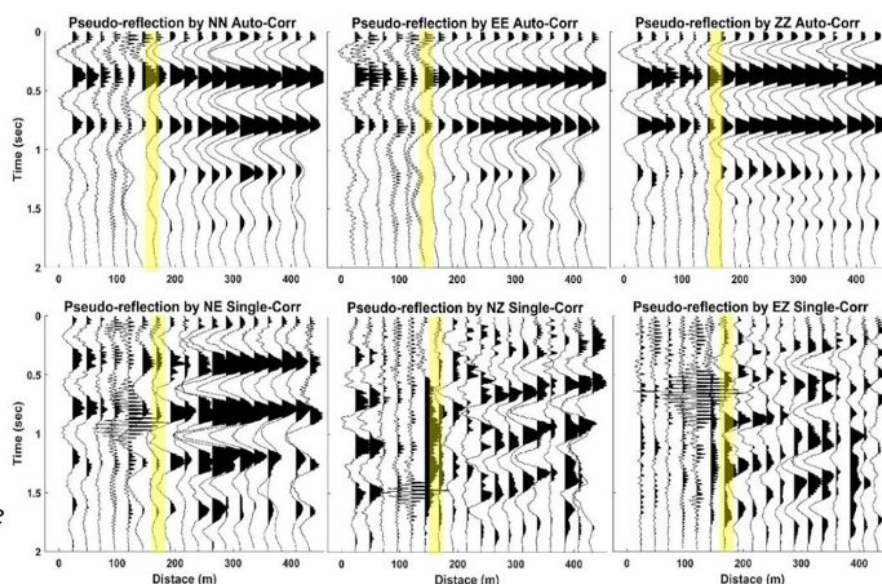


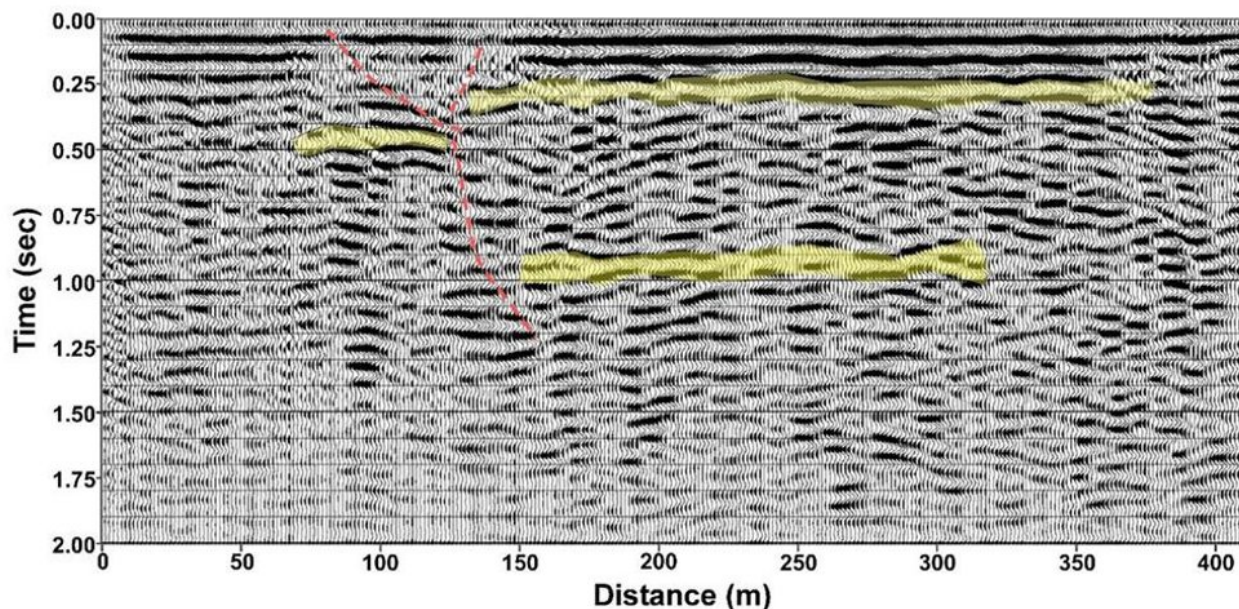
Рис. 8. Примеры результата мультисмещенной кросс-корреляции на основе данных вертикального компонента окружающего шума SmartSolo 1-h. Расположение виртуального источника указывается номерами каналов над каждой панелью.

активным сейсмическим профилированием (рис. 4b). Сильные высокоэнергетические отражения на 0,76, 1,14 и 1,52 с, вероятно, кратные волны от границы 0,38 с.

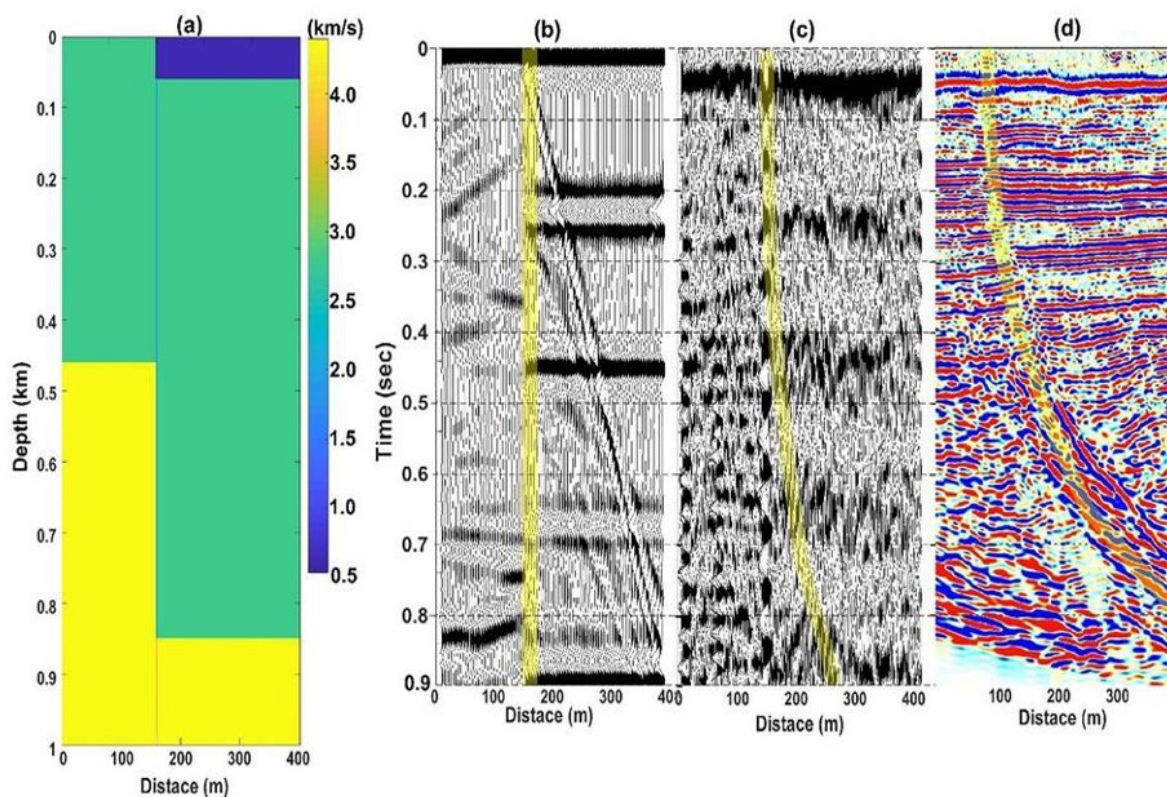
На правой стороне разлома HGF видна сильная реверберация, происходящая с периодом 0,2 с (Рис. 6а). Возможно, причина в том, что энергия сейсмических волн воспроизводится в молодом осадочном слое, образовавшемся в голоценовое время и обладающем гораздо меньшей сейсмической скоростью. Если принять это как разумную гипотезу и с помощью резонансной теории связать ее, то можно оценить толщину этого

молодого слоя примерно в 40 м: характеристики которого довольно близки к тем, что были определены по сейсмическим данным профиля ОГТ.

На Рис. 9 приводится 10-тикратный временной разрез с использованием результата кросс-корреляции на основе одночасовых данных вертикальной компоненты окружающего шума, зарегистрированного датчиками SmartSolo. Непрерывность когерентных фаз прерывается на 100-150 м по горизонтали. Разрез существенно информативнее, чем результаты автокорреляции, показанные на рис. 6.



▲ Рис. 9. 10-тикратный разрез нормального перемещения (NMO) с использованием результата мультисмещенной кросс-корреляции на основе одноканальных данных вертикального компонента окружающего шума SmartSolo.



▲ Рис. 10.

- (a) Упрощенная концептуальная модель нормального разлома;
- (b) результат численного моделирования волнового поля, генерируемого источником плоской волны за счет импульса 15 Гц, падающего с поверхности;
- (c) эмпирическая функция Грина по второй производной сложенной автокорреляции 1-часовых данных окружающего шума, записанных массивом SmartSolo;
- (d) волновое поле активной сейсморазведки (см. также рис. 4a).

Для проверки корреляции окружающего данных пассивных наблюдений было проведено численное моделирование синтетического временного разреза. Использовался метод конечно-разностной временной области (FDTD) с использованием плоской волны в сочетании с импульсным источником (вейвлет Рикера) для имитации падения дневного света с поверхности (Клаербот, 1968). Исходная частота вейвлета Рикера составляет 10 Гц. Эта простая концептуальная модель (рис. 10а) имеет глубину коренной породы 460 м с левой стороны и 850 м с правой стороны вертикального разлома соответственно. Кроме того, на правой стороне разлома имеется свежесасыпанный грунт толщиной 60 метров. Материал зоны разлома представляет собой низкоскоростную зону с 70% скоростей пласта. На рис. 10 сравниваются поля синтетического моделирования (рис. 10b), автокорреляция, сгенерированная эмпирическими результатами функции Грина с использованием записи окружающего шума SmartSolo (рис. 10c), и наблюдаемый профиль активного источника (рис. 10d). Глубинное положение основных отражателей по обе стороны разлома находится в общем согласии и проявляется последовательно на всех профилях (рис. 10b–d). Для синтетического профиля хорошо видна дифракция от разлома на каждой границе раздела (рис. 10b).

Заключение

Несомненно, качество изображения пассивной съемки (рис. 10c) ниже, чем результаты активной сейсморазведки (рис. 10d), полученные на том же участке. Тем не менее, мы хотим отметить, что все результаты Smart Solo основаны только на одном часе наблюдения. Будущие

пассивные сейсморазведочные исследования с более длительным временем записи, более плотным расположением точек наблюдения, а так же переход к площадным исследованиям являются возможным инструментом исследования разломных зон.

Современные технологии выполнения сейсморазведочных работ с использованием БТСС семейства «SCOUT»

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

Технология выполнения полевых работ с использованием бескабельных телеметрических сейсморегистрирующих систем (БТСС) имеет свои особенности, связанные не только с отсутствием кабельного канала передачи данных, но и с типом самой БТСС (сетевой, полуавтономный и автономный типы) и только всесторонний учет этих особенностей может обеспечить реализацию всех потенциальных возможностей БТСС того или иного типа.



▲ Рис. 1. БТСС семейства «SCOUT».

На рис.1 представлено семейство БТСС, разработанных АО «СКБ СП» на базе единой платформы сейсморегистрирующих систем «SCOUT». Данные БТСС обеспечивают решение широкого спектра задач, связанных с реализацией полевых технологий выполнения сейсморазведочных работ.

Рассмотрим варианты реализации полевых технологий выполнения сейсморазведочных работ с использованием БТСС «SCOUT» различного класса и назначения.

2D сейсмическая технология

При проведении 2D сейсмических наблюдений БТСС могут использоваться как в качестве самостоятельной сейсмо-

регистрирующей системы при выполнении региональных и маршрутных поисковых сейсморазведочных работ, так и в качестве вспомогательного инструмента, обеспечивающего возможность регистрации данных в эксклюзивных зонах и повышающего качество регистрируемой информации за счет использования дополнительных трасс регистрации. В частности, возможны следующие варианты использования БТСС в качестве вспомогательного инструмента:

1. Оптимизация расположения пунктов приема на профилях, пересекающих особо сложные районы с высокой урбанизацией и сложным рельефом. Например, спрямление профиля;

2. Продление приемной расстановки в зоны, недоступные для транспортных средств. Например, продление расстановки в сложный рельеф;

3. Сгущение пунктов приема в случае необходимости разряжения пунктов возбуждения.

4. Обеспечения непрерывной регистрации данных при преодолении препятствий (реки, железнодорожные пути, автострасы), осложняющих или не допускающих использование кабельных сейсморегистрирующих систем.

Как показывает мировая практика, при проведении 2D сейсморазведочных работ могут быть использованы все типы БТСС – сетевые, полуавтономные и автономные.

В [1] описан опыт применения автономного варианта БТСС «SCOUT» при проведении 2D сейсморазведочных работ в предгорных районах Кабардино-Балкарии. В данном случае БТСС использовалась как вспомогательный инструмент, обеспечивающий продление и стыковку профилей при наличии препятствий и, таким образом, получить непрерывную корреляцию отражающих горизонтов, повысить кратность прослеживания в эксклюзивных зонах и получить дополнительную сейсмическую информацию там, где было невозможно эффективно использовать кабельную систему.

3D сейсмическая технология

До недавнего времени реализация площадных систем наблюдений осуществлялась с использованием лишь кабельных многоканальных и сверхмногоканальных телеметрических сейсморегистрирующих систем. Однако в последнее время все чаще появляются сообщения о выполнении 3D проектов с использованием различных типов бескабельных сейсморегистрирующих систем.

В последние годы при выполнении 3D сейсмических наблюдений все чаще применяют гибридные приемные расстановки, состоящие из кабельных и бескабельных сегментов. Такие сегменты могут соседствовать и чередоваться (в соответствии с типом грунта, наличием препятствий и экологически чувствительных зон и т.п.) или перекрываться (если нужно сократить интервал между ПП для неглубоко залегающих целевых границ или добавить трехкомпонентные датчики для прогнозирования геологического разреза и расчета свойств коллектора).

Такие гибридные приемные расстановки могут быть использованы для решения следующих задач:

1. Локальное увеличение кратности наблюдения на площади, например, около скважины и/или для детального изучения верхней части разреза.

2. Организация одновременной записи однокомпонентных (1С) и многокомпонентных (3С) данных с использованием различного типа датчиков (аналоговых и/или цифровых).

3. Обеспечение сейсмических работ в сложных геоморфологических условиях, например, на заболоченных участках или на больших удалениях.

4. Выполнение сейсмического активного мониторинга месторождений, обеспечение организации непрерывной записи микросейсмического процесса (пассивный сейсмический мониторинг).

В случае применения такой смешанной конфигурации, важно предусмотреть совместимость всех сегментов приемной расстановки. Важно получить однородную сейсмическую информацию (одни и те же параметры регистрации, одна и та же электроника, те же меры контроля качества) в одном выходном формате.

Такие различные конфигурации приемных расстановок позволяют выполнять высокопроизводительные и высокоплотные 3D работы в более сложных поверхностных условиях и получать более качественные изображения исследуемой геологической среды.

Учитывая, что одной из областей, в которой кабельные сейсморегистрирующие системы имеют, по крайней мере, в настоящее время, бесспорное преимущество, является контроль в реальном времени уровня шума на профиле, было бы разумно использовать это качество кабельных систем в совместных расстановках с автономными БТСС. Это было бы тем более разумно, если учесть, тот факт, что в настоящее время в сейсморазведке доминируют кабельные сейсморегистрирующие системы и это оборудование еще долгое время будет в распоряжении геофизиков.

В таких совместных расстановках кабельная система может быть развернута с пониженной плотностью каналов, достаточной для контроля шума в реальном времени. Интервал между кабельными каналами может быть 100 и более метров, а интервал между кабельными линиями – не менее 500 м. Бескабельные каналы можно размещать в линии кабельных каналов, что улучшит качество данных регистрируемых данной линией наблюдения и снизит риски, связанные с возможным повреждением кабеля.

Наиболее часто гибридные расстановки используются в районах с разветвленной инфраструктурой, а также в районах с различными ограничениями, связанными с экологией местности. Хотя препятствия и ограничения оказывают влияние на размещение как пунктов приема, так и пунктов возбуждения, однако пункты приема, в основном, менее чувствительны к подобного рода воздействиям,

поскольку площадь оказываемого ими влияния на окружающую среду мала и их перемещение не составляет особого труда. В соответствии с теорией обратимости, пункты возбуждения и пункты приема взаимозаменяемы, чем можно воспользоваться при наличии препятствий и ограничений на исследуемой площади.

Новые бескабельные технологии облегчают возможность уплотнения сети наблюдения в области ограничений на исследуемой площади при существенно меньших финансовых затратах и, как результат, они находят все большее применение при выполнении 3D сейсмических работ.

Технические преимущества приемных устройств бескабельной системы при уплотнении сети наблюдения проистекают из того, что их можно разместить там, где размещение источников невозможно. Уплотнение сети наблюдения в зоне ограничения вызывает меньшие отклонения в распределении трасс в соседних с зоной ограничения областях. Кроме того, в этом случае распределение «удаление/азимут» лучше, чем при уплотнении сети пунктов возбуждения. Если применяется такая смешанная конфигурация (кабельная ТСС + БТСС), то важно получить однородную информацию (одни и те же параметры регистрации, одна и та же электроника и те же меры контроля) в одном выходном формате (например, в формате SEG-D). Такие различные конфигурации приемных расстановок позволяют выполнять высокопроизводительные и высокоплотные 3D наблюдения и получать более качественные изображения исследуемой геологической среды.

В [2] описано выполнение опытно-методических работ по сравнительному тестированию БТСС «SCOUT» и кабель-

ной телеметрической сейсморегирующей системы SN428XL. Работы были проведены в соответствии с Государственной программой по замещению импортного оборудования.

Основными целями выполнения проекта являлись:

- оценка преимуществ и недостатков бескабельной технологии в сравнении с кабельной технологией при выполнении сейсмических наблюдений в таёжной зоне с резко континентальным климатом. Температура воздуха в период проведения работ колебалась от -25°C до -35°C (местами до -45°C);

- оценка трудоёмкости всего процесса использования бескабельной системы, включая вспомогательные операции, начиная с установки блоков на пикеты и кончая съёмом и загрузкой данных в компьютер.

Как и ожидалось, сырые полевые данные бескабельной и кабельной систем практически не отличались. После обработки данных с использованием одного и того же графа обработки были получены абсолютно одинаковые разрезы (рис.2).

Небольшие отличия в шумах в основном связаны с отличиями в установке

датчиков и небольшими вариациями, связанными с выносами.

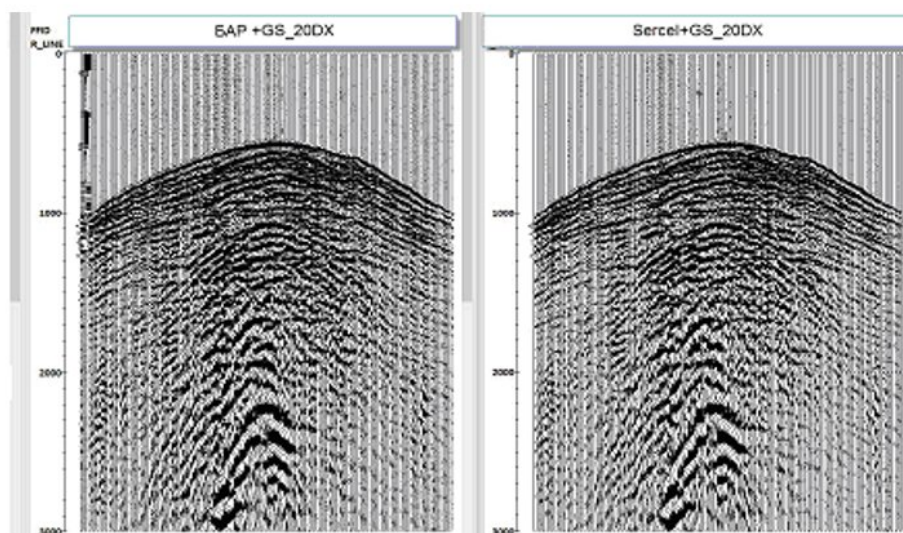
Результаты тестовых испытаний показали высокую надёжность работы бескабельной системы и подтвердили возможность использования гибридных приемных расстановок, состоящих из кабельных и бескабельных сегментов, для оптимизации сейсморазведочных работ для обеспечения их эффективности и качества данных. Как и ожидалось, никаких существенных различий в качестве исходных и обработанных данных, зарегистрированных с использованием столь отличных технологий регистрации, замечено не было. Во многом это связано с обеспечением полной интеграции между регистрирующими системами.

4D сейсмическая технология

В настоящее время наблюдения с использованием 4D сейсмической технологии в основном осуществляются с использованием многоканальных кабельных телеметрических сейсморегирующих систем.

Весьма перспективными для проведения мониторинга месторождений углеводородов являются БТСС, обеспечивающие возможность создания любого вида апертур на площади действующих

▼ Рис. 2. Фрагменты сейсмограмм, полученных различными сейсмостанциями.



месторождений. При этом при изучении направления гидроразрыва пласта использование БТСС предпочтительно в варианте передачи регистрируемой информации в центральный регистрирующий комплекс в реальном времени, что обеспечивают БТСС сетевого типа. В частности, в [3, 4] сообщается об использовании для этих целей БТСС “UNITE” и БТСС “RT System 2”, соответственно, компаниями “PanAmerican Geophysical и MicroSeismic (обе США), специализирующимися на выполнении данного вида геофизических работ. Вместе с тем, российская компания ЗАО «Градиент» (г.Казань) широко и успешно использует для мониторинга месторождений углеводородов автономный вариант БТСС “SCOUT”.

Многоволновая сейсморазведка

Для регистрации полного волнового поля и получения изображений среды на Р и S волнах требуются сверхмногоканальные сейсморегирующие системы, обеспечивающие выполнение полевых работ с высокой плотностью пунктов приема и очень большой канальностью.

С учетом регистрации 3-х компонент, необходимая канальность системы может быть более 10000. Важным моментом является также то, что при многоволновых исследованиях длина записи должна быть намного больше обычной, что связано с низкими скоростями поперечных волн.

Учитывая вышеизложенное, БТСС являются весьма перспективными для выполнения работ МВС.

Вместе с тем, следует отметить, что БТСС, как и кабельные системы имеют ряд существенных недостатков, что свидетельствует о том, что данные системы еще далеки от того, чтобы считаться «идеальным» инструментом для сбора

сейсмоданных, что, соответственно, ограничивает их потенциальные возможности по полному вытеснению кабельных систем, которые также продолжают совершенствоваться, и их возможности и надёжность всё время повышаются.

Среди ключевых ограничений, присущих каждой из вышеназванных типов систем, можно назвать следующие:

Ограничения кабельных систем

- Значительный вес системы;
- Интенсивность ручного труда и перемещений;
- Повышенный риск причинения вреда здоровью, нарушения экологии и требований безопасности;
- Ограниченный доступ в районы со сложным рельефом и развитой промышленной инфраструктурой;
- Потери времени, связанные с ремонтом и обслуживанием кабелей;

Ограничения бескабельных систем

- Отсутствие у полуавтономных и автономных БТСС контроля качества сейсмоданных в реальном времени;
- Отсутствие контроля состояния профиля у бескабельных сейсморегирующих систем автономного типа;
- Низкая скорость доставки зарегистрированных сейсмоданных для последующего их анализа и обработки;
- Проблемы, связанные большим количеством, весом и обслуживанием батарей питания в многоканальных системах.

«Идеальная» сейсморегирующая система должна быть свободна от этих ограничений, с тем, чтобы удовлетворить требования как сервисных геофизических, так и нефтяных компаний.

Одним из путей решения данной проблемы является объединение в сейсморегирующей системе лучших

элементов кабельной и бескабельной технологий сбора сейсмоданных. Результатом должна стать инновационная сейсморегистрирующая система нового поколения с уникальной архитектурой.

Первой попыткой решения данной проблемы является созданная компанией Sercel (Франция) сейсморегистрирующая система 508_{хт}, в которой используются элементы кабельной и бескабельной технологий сбора сейсмоданных [5, 6].

С целью повышения эффективности выполнения сейсморазведочных работ отечественными геофизическими сервисными компаниями, обеспечения конкурентоспособности российских сейсморегистрирующих комплексов на российском и зарубежных рынках геофизического оборудования и снижения зависимости российского топливно-энергетического комплекса от импорта данного вида оборудования, комплектующих и запасных частей, услуг иностранных компаний, АО «СКБ СП» вышло с предложением в Минпромторг РФ о создании инновационной сейсморегистрирующей системы нового поколения «SCOUT-НТ» с уникальной архитектурой, объединяющей лучшие качества кабельной и бескабельной технологий сбора сейсмоданных и предназначенной для поиска нефтяных и газовых месторождений на суше, ледовой поверхности акватории арктических морей, в транзитных и экологически чувствительных зонах.

В настоящее время в АО «СКБ СП» ведутся работы по реализации проекта, основной целью которого является разработка и внедрение в производство телеметрической сейсморегистрирующей системы, обеспечивающей сверхмногоканальные сейсмические исследования со сбором данных как в реальном, так и в нереальном времени, чрезвычайно надежной и удобной в эксплуатации,

отвечающей всем требованиям экологической и технической безопасности. Т.е. предполагается создание сейсморегистрирующей системы, свободной от недостатков сейсморегистрирующих систем, существующих в настоящее время.

Отличительной особенностью архитектуры разрабатываемой системы является использование в ней элементов как кабельной, так и бескабельной технологий регистрации сейсмоданных, что обеспечит возможность регистрации сейсмической информации в непрерывном режиме, без задержек и пауз в работе системы, независимо от состояния кабельной связи наземной расстановки с центральной регистрирующей системой (ЦРС), в любых районах проведения наземных сейсморазведочных работ на суше, ледовой поверхности акватории арктических морей, в транзитных и экологически чувствительных зонах.

Возможность работы системы в таком режиме должна обеспечиваться:

- наличием в составе системы модулей коммутатора линии наблюдения (МКЛ), каждый из которых обеспечивает прием сейсмоданных, поступающих в МКЛ из его линии наблюдения, а также сейсмоданных, поступающих из соседних линий, и передачу поступивших в МКЛ сейсмоданных в ЦРС по оптоволоконному кабельному каналу. В случае невозможности передачи данных по кабельному каналу (обрыв кабеля, сбой в процессе передачи), поступающая в модуль информация запоминается во внутренней памяти и в последующем передается в ЦРС либо по восстановленному кабельному каналу связи, либо с использованием мобильного устройства сбора данных;

- наличием буферной памяти в каждом полевом блоке сбора данных в линии наблюдения, что обеспечивает возможность в случае нарушения передачи данных по кабельному каналу связи линии наблюдения, не прерывая процесс сейсмического наблюдения, накапливать регистрируемую информацию непосредственно в блоке сбора данных и затем передать ее в ближайший МКЛ;

- возможностью использования в сейсмической расстановке автономных бескабельных блоков сбора данных БАР.

В случае применения такой смешанной конфигурации, важно предусмотреть совместимость всех сегментов приемной расстановки. Важно получить однородную сейсмическую информацию (одни и те же параметры регистрации, одна и та же электроника, те же меры контроля качества) в одном выходном формате. Имеющийся у АО «СКБ СП» богатый опыт создания как кабельных, так и бескабельных телеметрических сейсморегистрирующих систем, безусловно, позволит успешно решить данную проблему.

Одной из особенностей архитектуры предлагаемой системы является то, что она обеспечивает устранение временных простоев, связанных с необходимостью устранения неисправностей кабельного канала передачи данных в процессе выполнения работ. В случае возникновения неисправности в кабельном канале передачи данных, система либо выберет новый, безопасный маршрут передачи данных на соответствующем участке наземной расстановки, либо просто перейдет на этом участке наземной расстановки в автономный режим регистрации.

Использование в наземной расстановке системы кабельного канала обеспечит также:

- возможность контроля состояния профиля в реальном времени;

- возможность создания сети распределения питания блоков наземной расстановки, примерно так же, как это делается в современных кабельных системах. Это позволит существенно снизить количество батарей, используемых при выполнении полевых работ.

В предлагаемой системе должны быть также обеспечены:

- возможность передачи зарегистрированных в ЦРС сейсмоданных в Систему Контроля Качества (Система QC) полевого материала с использованием кабельного канала либо радиоканала.

- возможность запуска и синхронной работы двух сейсмостанций, удаленных друг от друга на несколько километров и управляемых с пункта возбуждения с помощью системы синхронизации возбуждений ССВ-2, либо ССВ-3.

- возможность реализации современных вибросейсмических технологий возбуждения сигнала на профиле (flip-flop, slip-swim и др.).

Таким образом, реализация данного Проекта обеспечит создание сейсморегистрирующей системы, свободной от ограничений, присущих как кабельным, так и бескабельным системам.

Реализация Проекта должна поднять отечественное геофизическое приборостроение на качественно новый уровень и обеспечить ему конкурентоспособность, столь необходимую для реализации задачи импортозамещения в области геофизического приборостроения и устранения угрозы возникновения полной зависимости предприятий энергетического комплекса России от поставок зарубежными компаниями геофизического оборудования, предназначенного для поиска нефтяных и газовых месторождений.

Литература

1. Емкужев А.С., Слонов Д.Н., Красных В.А., Калинин А.Ю., Опыт работы ОАО «Оренбургская геофизическая экспедиция с системой бескабельного сбора данных SCOUT в предгорных районах Республики Кабардино Балкария, Приборы и системы разведочной геофизики, № 01, 2013, стр.6-10

2. Погрецкий А.В., Стрекалов А.Я., Житкевич Ю.Б., Родин Д.В., Мехоношин В.П., Опытно-методические работы по тестированию бескабельной сейсморегистрирующей системы “SCOUT”, Приборы и системы разведочной геофизики, №01, 2017, стр.15-24

3. PanAmerican adds microseismic and cable-less to its technology portfolio. www.fb.edge.org/publication/content?id=65595

4. Wireless Seismic Announces the Purchase of RT System 2 by MicroSeismic to Monitor Hydraulic FracturingOperations, Free Online Library [2012], www.thefreelibrary.com

5. 508XT Powered by X-TECHTM, рекламный проспект компании Sercel, 2015

6. Гафаров Р.Н., Ягудин И.Р., Денисенко Н.В., О первых результатах опытной эксплуатации сейсмосистемы 508XT в АО «Башнефтегеофизика», №04, 2016, стр.43-49

Подробнее об авторах



Тарасов
Николай Васильевич

Исполнительный
директор АО «СКБ СП»,
К. Т. Н.



Гнатюк
Александр Иванович

Главный конструктор
АО “СКБ СП”,
автор нескольких
изобретений
и публикаций.



СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
SKBSP.RU

РОССИЙСКОЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ



SCOUT-L

*Надежный комплекс для
изучения ВЧР методами МПВ и ОГТ*

- | | |
|---|---|
| От 6 до 96 каналов сбора данных | Управление комплексом через wi-fi с планшета |
| Работа без системы синхронизации | Минимальный интервал квантования 0,03125 мс |
| Сейсмическая коса со стандартными отводами
РКВ-21 или РКП-2М | Работа в любых условиях от -40 до +70 |
| 3 года безусловной гарантии | Встроенный GPS/GLONASS приемник, Wi-Fi,
Li-Pol аккумуляторы, генератор тестовых сигналов |



ссылка на видео о системе

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

SmartLF как инструмент для мощного и стабильного уменьшения искажений низкочастотного сигнала

■ Жиль Оливрэн, Николя Тэлье, Sercel

Расширение диапазона сейсмического сигнала в сторону низких частот стало почти стандартом для вибросейсмических проектов, благодаря преимуществам, которые оно обеспечивает с точки зрения вертикального разрешения, распространения сигнала, инверсии или простоты интерпретации. Однако излучение сигнала в этой новой низкочастотной части спектра связано с уровнями искажений, которые значительно выше, чем в случае сигнала с обычной шириной полосы развертки, из-за конструкции сейсмических вибраторов на основе гидравлических приводов. В последние годы было предложено несколько решений для предотвращения возникновения таких искажений, но их реализация на местах до сих пор остается весьма затруднительной либо из-за ограниченной эффективности функционирования, либо из-за патентованных технологий, которые коммерчески недоступны для третьих сторон. В данной статье представлен новый подход к снижению низкочастотных искажений. Это решение, представляющее собой программный пакет, интегрированный в саму электронику вибраторов, достаточно простое в реализации и использовании при сейсмических работах. Полевые испытания, проведенные с различными вибраторами на различных участках местности, в том числе и на территории Российской Федерации, подтвердили эффективность этого нового подхода.

Введение

Появление технологий НЧ-вибросейс было связано с появлением десять лет назад низкочастотных (low-dwell) свипов (Bagaini 2007, Sallas 2010), которые остаются единственным типами развертки, позволяющими осуществлять точный контроль спектра (Tellier 2019). Выходная мощность вибратора снижается на низких частотах, чтобы соответствовать механическим и гидравлическим ограничениям вибратора, и обеспечивает минимально возможную длительность низкочастотного конуса. Генерируемый низкочастотный сейсмический сигнал имеет меньшую амплитуду, чем «традиционные» более высокие частоты и ассоциируется с более высокими искажениями из-за ограничений систем вибратора.

Это низкочастотное искажение, кроме того, плохо устраняется и представляет собой серьезный источник шума на сейсмических записях. Были предложены различные методы для устранения

этого гармонического загрязнения во время обработки (например, Meunier 2002) и преодоления ограничения в производительности вибраторов, которое связано с загрязнением гармоническим шумом данных при перекрытии записей. Тем не менее, по-прежнему остается предпочтительным избегать генерации этих искажений непосредственно в поле, поскольку сейсмические записи и так становятся все более и более зашумленными с учетом текущей отраслевой тенденции применения высокопроизводительных методов вибросейс (свободный вибратор и т.д.) и уменьшенных группирования источников и приемников, или применения одиночного источника, одиночного датчика.

О гармонических нелинейных искажениях

Генерация сейсмического сигнала с помощью вибраторов связана с гармоническими искажениями, которые обычно

различают на:

- Четные гармоники, которые в основном обусловлены распространением волны в приповерхностном слое. Эти гармоники связаны с изменением скорости распространения волн во время цикла сжатия-декомпрессии и в основном связаны с поверхностным слоем земли.

- Нечетные гармоники, которые происходят главным образом от самого вибратора и зависят от конструкции возбуждателя, его изоляции от транспортного средства и шасси, а также правильных настроек гидравлики и технического обслуживания.

Стоит помнить, что в отличие от фазы и амплитуды, которые являются предметом контроля качества (QC) сейсмического сигнала, искажение является главным образом предметом QC оборудования. Более высокий уровень искажений на одном конкретном вибраторе по сравнению с другими сигнализирует о неисправности этой установки, что потребует либо регулировки, либо ремонта, в то время как высокий уровень искажений на всех вибраторах хорошо коррелирует с эффектом, связанным с рельефом местности.

Сравнение уровней искажений, полученных различными моделями электроники вибраторов неуместно, поскольку могут использоваться разные методы расчета. Например, максимальная частота, выбранная для вычисления искажений, может отличаться (и обычно не настраивается пользователями), и вычисление искажений может основываться только на гармониках или на всех сигналах, кроме основного (последний включает как субгармонические, так и внутригармонические шумы).

Следует отметить, что положение акселерометров также имеет первосте-

пенное значение для правильного вычисления параметров QC (сила, фаза и искажение) на высоких частотах развертки. Акселерометр, расположенный на верхней части возбуждателя будет обеспечивать, по-видимому, превосходное значение параметров QC, но это не будет отражать истинного качества излучаемого в недра сигнала (для его оценки потребуются специальный стенд или проведение ВСП). И наоборот, акселерометр, расположенный на опорной плите, обеспечивает гораздо более представительное значение QC излучаемого сигнала. Достоверность параметров QC всегда может быть улучшена за счет использования нескольких акселерометров на оптимизированных местах опорной плиты (Boucard 2010, Tellier 2015).

Искажения при НЧ-вибросейс

В силу самой своей природы сейсмические вибраторы естественным образом производят уровни гармонических искажений, которые выше на низких частотах (обычно ниже 5-10 Гц, в зависимости от выбранной развертки и вибратора), чем в обычной полосе частот развертки. Это стало особенно заметно с тех пор, как были применены низкочастотные (low-dwell) свипы. Это низкочастотное искажение имеет источником главным образом следующие эффекты:

- Нелинейность вибратора на низких частотах (функция квадратного корня между потоком масла и гидравлическим давлением);

- Перекрытие сервоклапана на низких частотах (кратковременное и резкое падение гидравлического давления, когда сервоклапан проходит свое нейтральное положение);

- Нелинейные механические свойства контакта «опорная плита – грунт» и переменная площадь контакта в течение цикла (Sallas, 1984);

- Колебания гидравлического давления (хотя они и были значительно смягчены на современных вибраторах с гидроаккумуляторами, установленными как можно ближе к сервоклапану);
- Резонансная частота пневмоподушек, изолирующих возбудитель колебаний от транспортного средства или шасси (обычно ~ 2 Гц);
- Трение и износ.

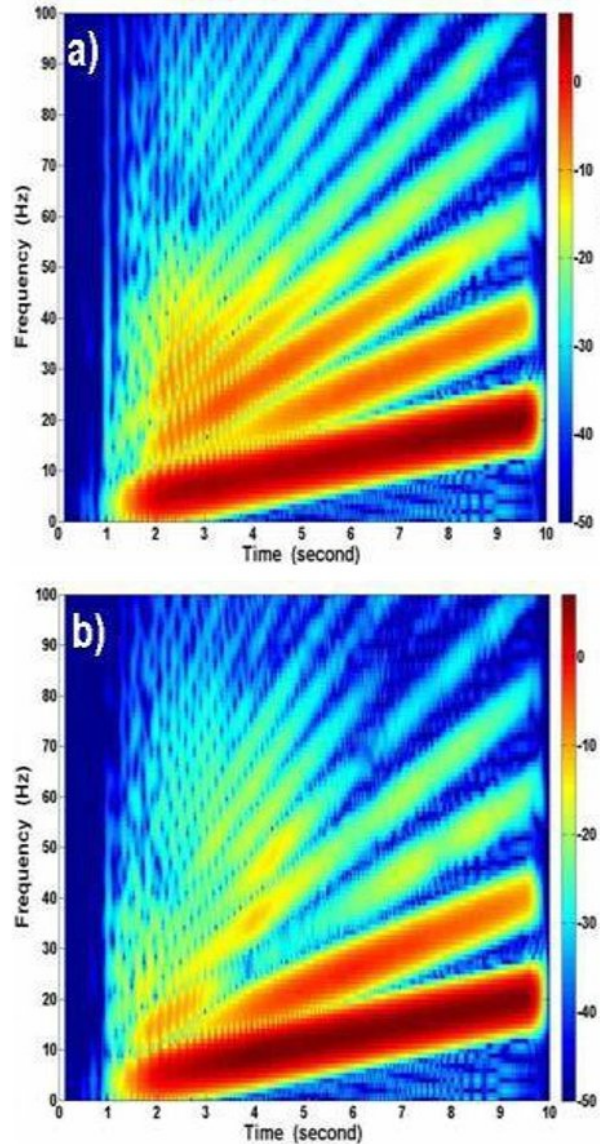
Существующие решения по смягчению последствий

В последние годы было внедрено несколько методов уменьшения искажений на низких частотах при генерации развертки:

- В электронике вибратора VE нелинейность вибратора на низких частотах (т. е. функция квадратного корня между потоком масла и гидравлическим давлением) была учтена и интегрирована в модель вибратора, начиная с VE416, выпущенного в 1988 году (Ollivrin 2008). Чтобы соответствовать ожиданиям отрасли для все более низких частот (< 5 Гц), дополнительным улучшением стал более точный контроль усиления и фазы низких частот (Tellier 2014).

- В основе VibPro HDR (Phillips 2010) лежит попытка компенсировать нелинейность гидравлической системы и перекрытие серво клапана, впрочем, она была предпринята не специально для низкочастотной части сигнала. Все гармоники уменьшены, кроме второй, которая тем не менее усиливается в соответствии с документацией, опубликованной производителем (Рисунок 1).

- CleanSweep (Castor 2014) - заключается в добавлении сигнала анти - искажения к пилоту развертки (180° фазового сдвига искажения), рассчитанного по сигналу Силы (Ground Force). Принцип подобен тому, который используется для



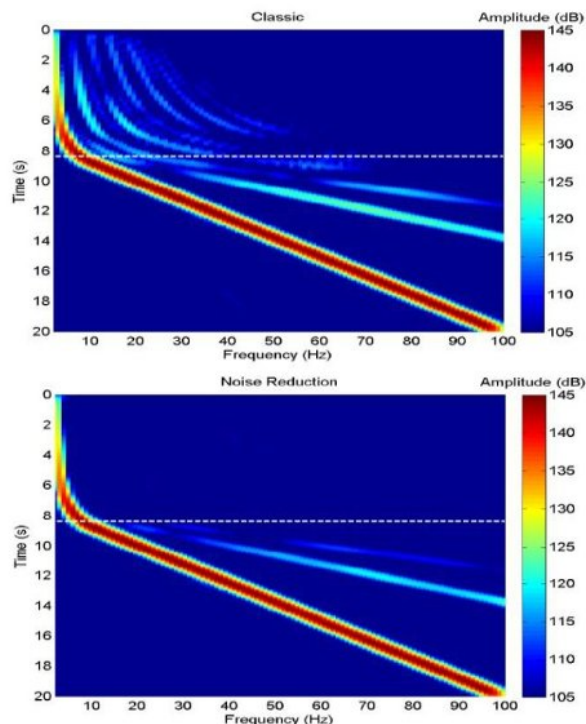
▲ Рuc. 1. Сравнение параметра Силы (Ground Force) с включенной и выключенной опцией HDR Technology на низких частотах от 1 до 21 Гц.

a) Технология HDR выключена.

b) Технология HDR включена.

Из брошюры производителя.

шумоподавления в наушниках. Это решение поддерживается электроникой VE464 в силу требования быстрого сервоуправления, способного точно следовать более сложному пилоту, предотвращающему искажение. Технология CleanSweep превосходно обеспечивает устранение искажений на низких частотах, и учитывает все уровни гармонического шума (Рисунок 2).



▲ Рис. 2. 1,5-100 Гц, 20 с, вибратор 60 000 фунтов (около 27 000 кг), без (сверху) и с (снизу) CleanSweep.
Из брошюры производителя.

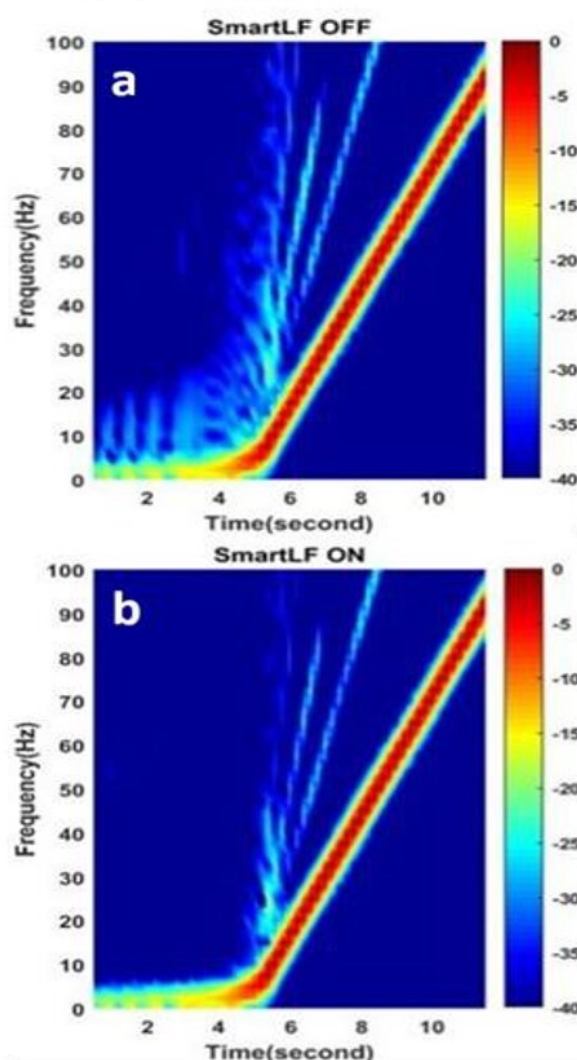
Новый подход к снижению искажений на низкой частоте

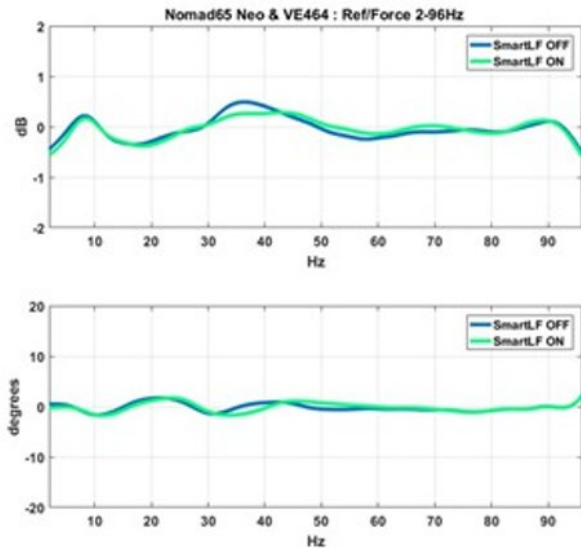
В новом подходе к преодолению ограничений предыдущих решений по снижению низкочастотных искажений с помощью надежного, мощного и простого инструмента была улучшена модель вибратора, чтобы лучше учитывать различные источники низкочастотных искажений, упомянутые выше.

На основе этой усовершенствованной модели сервоуправление способно предсказывать низкочастотные искажения: входной сигнал сервоклапана соответственно модифицируется, и генерация гармоник исключается. Рабочий пилотный сигнал остается неизменным: электроника вибратора моделирует, предвидит и корректирует внутреннее поведение системы вибратора так, чтобы гарантированно удерживать величину усилия на грунт как можно ближе к желаемому пилоту. Это приводит к

значительному снижению искажений на низких частотах. Общий сигнал усилия на грунт на низких частотах более чистый, все ранги гармоник уменьшены, и большая часть низкочастотных, ниже 15 Гц, искажений устранена (Рис.3). Надежность сервоуправления сохраняется, то есть не происходит никаких компромиссов по фазе и основным характеристикам сигнала (Рис.4). Поскольку рабочий пилотный сигнал остается неизменным для всех вибраторов, для корреляционного процесса может быть использован

▼ Рис. 3. Результаты измерения низкочастотных искажений для низкочастотного свипа (low-dwell) 2-96 Гц, 80% 12с, Nomad 65 Neo, пашня:
(a) SmartLF выключен,
(b) SmartLF включен.



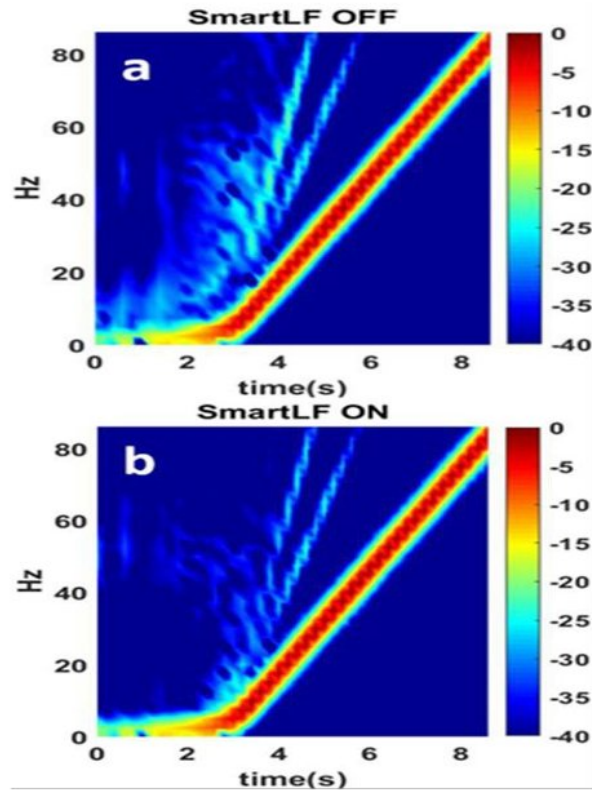


▲ Рис. 4. Сравнение между выключенным SmartLF (синяя линия) и включенным (зеленая линия) показывает, что решение не оказывает влияние на усилие на грунт (вверху) и фазу (внизу) сигнала вибрации.

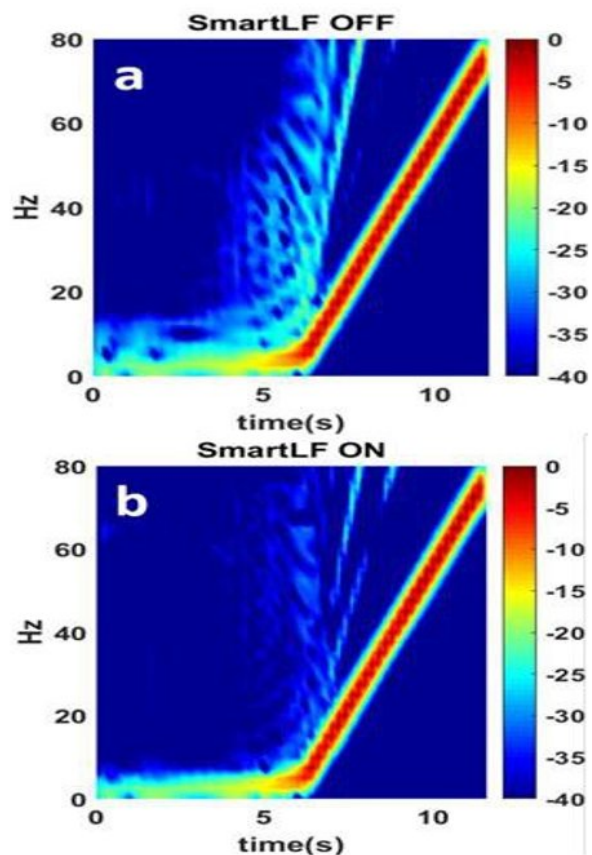
один пилот, что снижает сложность и вероятность ошибок, связанных с выделенными вибраторам пилотами.

Это решение, называемое SmartLF, встроено в электронику вибратора VE464, не требует модификации вибраторов или дополнительных механических компонентов. Его легко настроить при запуске партии без предварительного опыта или дополнительных знаний.

Несколько проведенных полевых испытаний показали эффективность решения на различных типах вибраторов: сверхтяжелых (80 000 фунтов, Рис. 5), тяжелых (62 000 фунтов, Рис.3) и легких (16 135 фунтов, Рис. 6). Хорошее качество низкочастотной развертки может быть достигнуто с последним типом, хотя эти легкие вибраторы сконструированы больше для высокочастотного выходного сигнала (до 400 Гц, в зависимости от местности), чем для низкочастотных характеристик (частота выхода сигнала на полную мощность 7 Гц).



▲ Рис. 5. Low-Dwell 1,5-86 Гц, 9 с, 75%. Вибратор 80 000 фунтов (Nomad 90 Neo), бетонная подушка, Южная Франция. (a) SmartLF выключен, (b) SmartLF включен.



Заключение

Снижение высоких уровней искажений, связанных с НЧ-вибросейс, стало ключевой задачей для нефтяных и газовых компаний. Нужно получать высококачественные наборы данных и уменьшать генерацию шума непосредственно в полевых условиях, так как записи, полученные с одновременно работающими источниками и одиночными вибраторами и приемниками и так становятся все более и более шумными.

Было разработано новое решение, интегрированное в электронику вибратора, основанное на надежной низкочастотной модели вибратора, которая лучше учитывает различные источники низкочастотных искажений; усовершенствованное сервоуправление может заранее предсказать искажение и предотвратить его генерацию, без изменения рабочего пилота и с сохранением качества развертки.

Предложенное решение легко реализовать; оно не требует ни калибровки, ни дополнительных механических компонентов, ни особых настроек вибратора. Его эффективность на различных вибраторах была доказана в полевых условиях, и на момент написания статьи внедрение решения продолжается на коммерческих производственных проектах.

Дальнейшее снижение искажения на всех частотах развертки потребует дополнительных инновационных подходов и может быть рассмотрено, если нефтегазовые компании подтвердят свою заинтересованность в необходимости записей, почти не имеющих искажений.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Николаса Гота, Ивана Торреса и коллектив Sercel в г. Сен-Годанс за поддержку в

разработке и тестировании представленного решения, а также руководство Sercel за разрешение на публикацию этой работы.

Литература:

Bagaini, C., 2007, Enhancing the low-frequency content of Vibroseis data with maximum displacement sweeps: 69th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401461>.

Boucard, D., and G. Ollivrin, 2010, Developments in vibrator control: Geophysical Prospecting, 58, no. 1, 33–40, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00848.x>.

Castor, K., T. Bianchi, O. Winter, and T. Klein, 2014, Noise reduction in vibroseis source: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded

Abstract, 16–20, <https://doi.org/10.1190/segam2014-0520.1>.

Meunier, J., and T. Bianchi, 2002, Harmonic noise reduction opens the way for array size reduction in Vibroseis™ operations: 72nd Annual

International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 70–73, <https://doi.org/10.1190/1.1817354>.

Ollivrin, G., and D. Boucard, 2008, Developments in vibrator control: EAGE Vibroseis Workshop — Vibroseis Acquisition and Processing Half

Century Later, New Developments in Data Quality and Productivity, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147507>. Phillips, T. F., 2010, Harmonic distortion reduction of seismic vibrator using vibrator control electronics: 72nd Annual International Conference and

Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201400621>.

Sallas, J. J., 1984, Seismic vibrator control and the downgoing P-wave: *Geophysics*, 49, 732–740, <https://doi.org/10.1190/1.1441701>.

Sallas, J. J., 2010, How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box: *Geophysical Prospecting*, 58, no. 1, 3–17, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00837.x>.

Tellier, N., G. Ollivrin, and D. Boucard, 2014, Optimizing the generation and QC of low-dwell sweeps: 76th Annual International Conference and

Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140755>.

Tellier, N., G. Caradec, and G. Ollivrin, 2015, Practical solutions for effective vibrator high-frequency generation: 85th Annual International Meeting,

SEG, Expanded Abstract, 201–205, <https://doi.org/10.1190/segam2015-5844765.1>.

Tellier, N., and G. Ollivrin, 2019, Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead?: *First Break*, 37, no. 1, 48–54

Подробнее об авторах



Жиль
Оливрэн
Sercel



Николя
Тэлье
Sercel



GS-ONE LF

Высокочувствительный низкочастотный
геофон Российского производства



* Единственный и неповторимый

Выпускается с собственной
частотой **4.5 и 5 Гц**
в вертикальном
и горизонтальном
исполнении.
Чувствительность
89,4 В/м/сек

ONE & ONLY ▶

Geospace Technologies Eurasia
Российская Федерация,
450001, Башкортостан, г. Уфа,
ул. Кировоградская, 36.
т.: (347) 282 39 73



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