

Нодальная система для эффективной сейсморазведки в российских условиях

■ Стивен Уилкоккс, Sercel

Введение

В этой статье будет дано краткое описание конкретных проблем сейсморазведки в России. Затем в общих чертах представим некоторые из наблюдаемых во всем мире тенденций в сейсмических технологиях - низкочастотный сбор данных, высокоплотный сбор данных с одиночным источником и более широкое использование наземных нодальных систем.

Также в статье будет описана система WiNG, включая понимание того, как функции и функциональные возможности системы дают клиентам возможность извлекать выгоду из вышеупомянутых отраслевых тенденций даже в специфических условиях российского рынка.

Разработки технологий в области сбора полевых сейсмических данных

Особые требования к сейсмической съемке в России.

Большая часть наземных сейсморазведочных работ, проводимых на территории Российской Федерации, ведётся на Западно-Сибирской равнине, уникальное географическое положение которой создает чрезвычайно сложные условия и накладывает особые ограничения на оборудование и операции при проведении сейсморазведки. Чувствительные к внешнему воздействию тайга и тундра этого региона могут быть легко повреждены сейсмическими работами, поэтому проекты сбора сейсмических данных ограничены зимними месяцами, когда промерзшая земля и мощный снежный покров гораздо более устойчивы к воздействию транспортных средств. Прямым результатом этого является проведение операций в холодных, а иногда и экстре-

мально холодных климатических условиях. Помимо этого, в последние годы были предприняты дополнительные меры, направленные на уменьшение ущерба, наносимого флоре региона, и сокращение объема выполняемых рубок деревьев и расчистки лесов. Однако в последние годы крупные полевые сейсмические проекты все чаще планируются и реализуются в регионах Восточной Сибири. Условия этого региона отличаются еще более экстремальными температурными режимами, непростой логистикой, отсутствием развитой транспортной инфраструктуры и более сложной геологией на подавляющем большинстве перспективных к изучению объектов.

Как следствие, в России мы наблюдаем тенденцию к использованию более легкого оборудования, которое удобнее транспортировать и разворачивать, при сохранении неизменным требования удаленного мониторинга рабочего состояния оборудования для обеспечения контроля качества данных.

Мировые тенденции

Усилия по повышению качества сейсмического изображения — это непрерывный процесс, идущий в геофизическом сообществе, причем значительное внимание уделяется повышению качества данных в низкочастотной области сейсмического спектра. Многие организации перешли от геофонов с частотой среза 10 Гц к геофонам с частотой среза 5 Гц или к датчикам MEMS, чтобы улучшить низкочастотный контент, а производители вибраторов приложили много усилий для улучшения качества исходного сигнала, особенно с точки зрения линейности сигнала и искажения.

Широкополосная съемка

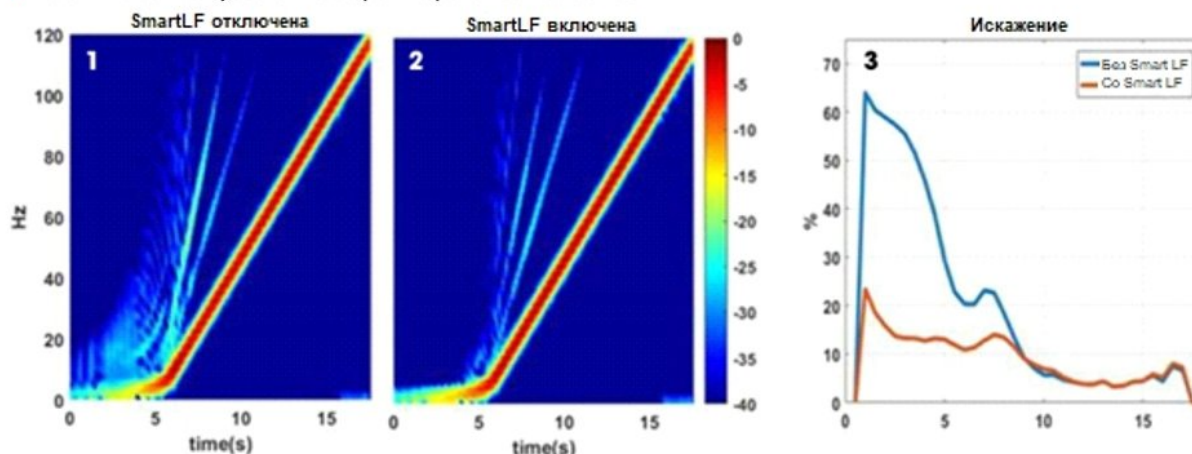
Были внесены усовершенствования в конструкцию вибраторов, включая увеличение массы и длины хода реакционной массы, увеличение давления в гидравлике и перемещение гидроаккумуляторов как можно ближе к сервоклапану. Эти конструктивные изменения в совокупности позволили снизить начальную частоту выхода на полную мощность до 5–5,5 Гц. Существует возможность и далее улучшать низкочастотные характеристики вибратора, однако это может происходить за счет значительного снижения его высокочастотных параметров в пределах представляющей интерес нормальной сейсмической полосы пропускания. Между тем были разработаны низкочастотные нелинейные свипы (low-dwell sweeps), которые на сегодняшний день остаются единственным типом развертки, позволяющим полностью контролировать генерируемый энергетический спектр на низких частотах, и достигать более низких частот, ожидаемых пользователем, без нарушения физических ограничений, налагаемых оборудованием.

Дальнейшие инновации были применены к электронике вибратора, управляющей сейсмическим источником, для обеспечения эффективного и высокочастот-

ного управления вибратором, в том числе на низких частотах (Tellier 2014). Дополнительные усовершенствования электроники управления источником включают решения по снижению низкочастотных искажений. Действительно, благодаря их конструкции искажения в низкочастотной области сейсмического сигнала намного выше, чем в обычной сейсмической полосе пропускания. Модуль SmartLF решает эту проблему эффективным и простым способом (Ollivrin 2021). Эта технология, встроенная в электронику вибратора, предсказывает гармоники и предотвращает их генерацию, не требуя предварительного обучения персонала и разработки конкретного свипа для каждого вибратора. Подробности этой технологии были описаны Ж.Оливрэном (2021). На рисунке 1 показано улучшение в части искажения сигнала источника, которое может быть достигнуто.

На Рисунке 1 графики представляют сигнал усилия вибратора и его искажение. На панели 1 показана зависимость частоты усилия от времени с отключенным подавлением искажений. Панель 2 иллюстрирует зависимость частоты усилия от времени при включенном подавлении искажений. На панели 3 показано общее искажение в зависимости

▼ Рис. 1. Сигнал усилия вибратора и искажение.



ти от времени, причем искажение выражено в процентах от общего воздействия.

Со стороны приемных устройств прогресс в большинстве случаев ограничивался переходом от геофонов с частотой среза 10 Гц к геофонам 5 Гц, и это, безусловно, увеличивает количество записываемого низкочастотного контента, однако это неполное решение. Возможность записи низкочастотного сигнала с истинной амплитудой и фазой нарушается на низкой частоте из-за явления, называемого размытием (джиттером) данных (Tellier, 2020), которое не происходит с датчиками MEMS.

В целом, максимизация качества генерации и записи низких частот зависит от сочетания выбора оборудования и методов:

- вибратор, достаточно усовершенствованный для работы на низких частотах;
- использование нелинейных низкочастотных свипов (low-dwell sweeps), с электроникой вибратора, предназначенной для поддержки правильного управления низкими частотами;
- эффективное подавление низкочастотных искажений;
- сейсмические датчики, не подверженные размытию (дрожанию) данных, такие как MEMS 3-го поколения;
- специальная низкочастотная обработка.

Высокая плотность, одиночный датчик

Плотность трасс (то есть кратность, разделенная на размер бина) в настоящее время широко признана как ключевой параметр для улучшения качества изображения и повышения точности анализа коллектора. В то же время размеры групп приемников уменьшаются, чтобы сохранить высокочастотный сигнал, снизить требования к объему

оборудования и упростить работу с ним в полевых условиях. Что касается источника, то поиск более высоких плотностей традиционно решается с использованием одиночных вибраторов и передовых высокопроизводительных методов, таких как DS4 или смешанный сбор данных, для увеличения плотности трассировки с одновременным достижением оптимального компромисса между качеством данных и стоимостью. В дополнение к сохранению высокочастотного сигнала, расстановки с высокой плотностью без группирования приемников улучшают пространственное разрешение, упрощают пикирование первых вступлений и предоставляют для обработки хорошо дискретизированный сигнал и шум, что делает удаление последнего намного более эффективным и, следовательно, значительно увеличивает отношение сигнал / шум в финальном результате по сравнению с обычными съемками.

Нодальные системы

До мирового финансового кризиса 2008 года на мировом рынке оборудования регистрации наземных сейсмических данных в значительной степени преобладали традиционные системы кабельной телеметрии. В последующий период системы беспроводной записи начали проникать на рынок, однако кризис цен на нефть 2014 года создал рыночные условия, в которых наземные нодальные системы начали заменять как системы кабельной телеметрии, так и другие конфигурации беспроводных систем. Действительно, в некоторых регионах, таких как Северная Америка, доля наземных нодальных систем, введенных в эксплуатацию (продажа и аренда), достигла почти 100%. Причины такого перехода рынка на наземные нодальные системы имеют несколько аспектов.

Хотя разница в капитальных затратах может быть незначительной по сравнению с системами кабельной телеметрии (наземные нодальные системы могут даже иметь более высокую начальную стоимость), сейсмические подрядчики и их клиенты ожидают, что эксплуатационные расходы будут ниже. Аргументы в пользу этого включают:

- требуется меньше полевого персонала для расстановки и сбора оборудования;
- сложные полевые условия легче разрешаются с помощью нодов (без организации обходов и т. д.);
- нет необходимости ремонта кабелей;
- ожидается увеличение производительности при реализации проекта по сбору данных (больше число ФН в день).

Аргумент в пользу увеличения производительности основан на отсутствии обрывов кабеля, которые могли бы прервать сбор данных, и на отсутствии простоев, вызванных контролем качества (слепые операции). Этот последний аргумент является несколько спорным, поскольку он увеличивает риск получения данных низкого качества от подрядчика для клиента. Утверждения, которые делаются некоторыми производителями наземных нодальных систем, чтобы преуменьшить этот риск, включают заявления о том, что современная электроника имеет очень высокую надежность с низкой вероятностью отказа. Это утверждение действительно может считаться обоснованным, но оно не устраняет другие факторы, влияющие на качество данных, включая шумовые помехи, а также случайные или преднамеренные помехи работе оборудования.

Применимость в России

Для оценки эффективности низкочастотного сбора данных в России были

выполнены соответствующие тесты. Их анализ и оценка представлены в работе Н.Тэлье и др. (2016). Эти испытания показали положительные результаты, что привело к реализации значительного количества проектов с использованием этих методов на полуостровах Гыдан и Ямал, а также в Волго-Уральском регионе. Тенденция к уплотнению также отчетливо прослеживается в России, где геометрия становится более плотной, а группы приемников сокращаются, в некоторых случаях до одного датчика.

До текущей даты на российском рынке не наблюдалось широкомасштабной замены кабельных телеметрических систем наземными нодальными системами, как это имело место в некоторых других частях мира, и до сих пор большинство российских сейсмических подрядчиков по-прежнему отдают предпочтение кабельным телеметрическим системам.

Наиболее вероятные причины этого заключаются в том, что кабельные телеметрические системы, предоставляя результаты контроля качества в режиме реального времени и, имея возможность автоматически и быстро генерировать файлы выходных данных, позволяют операторам сейсмических систем управлять качеством собранных данных. Это может быть особенно важно при работе в районах со сложными условиями окружающей среды. Работа вслепую, которая является обычной практикой при использовании нодальных наземных систем, считается высокорисковой в российских условиях. Кроме того, операционные ограничения нодальных систем часто означают, что полученные данные не формируются и не экспортируются в течение нескольких недель после завершения проекта, так что контроль качества данных не может выполняться в ходе проекта.

Однако это не означает, что использование нодальных систем в России полностью исключено. Существует определенный интерес к их использованию в областях, где ноды имеют решающее преимущество. Примером могут служить объекты со старой нефтяной инфраструктурой, или такие, где сама топология создает существенные препятствия для эффективного развертывания систем кабельной телеметрии. Хотя в большинстве случаев, когда используются ноды, они развертываются вместе с кабельной системой в конфигурации, известной как “сгущение”, где большая часть сбора данных выполняется обычным способом.

Несмотря на медленное проникновение этой технологии в Россию, нодальные системы действительно могут предложить российским сейсмическим подрядчикам существенные преимущества для их операций. В дополнение к уже упомянутой гибкости расстановки, когда препятствия на земле больше не мешают эффективному развертыванию и сбору оборудования, простота установки и сбора оборудования по сравнению с исключительно кабельной системой может значительно облегчить полевые операции. В частности, устранение необходимости в постоянном наличии кабины регистрации на транспортном средстве на объекте, которое присуще системам кабельной телеметрии, может существенно снизить ограничения в области ОТПБиООС и воздействие проекта на окружающую среду.

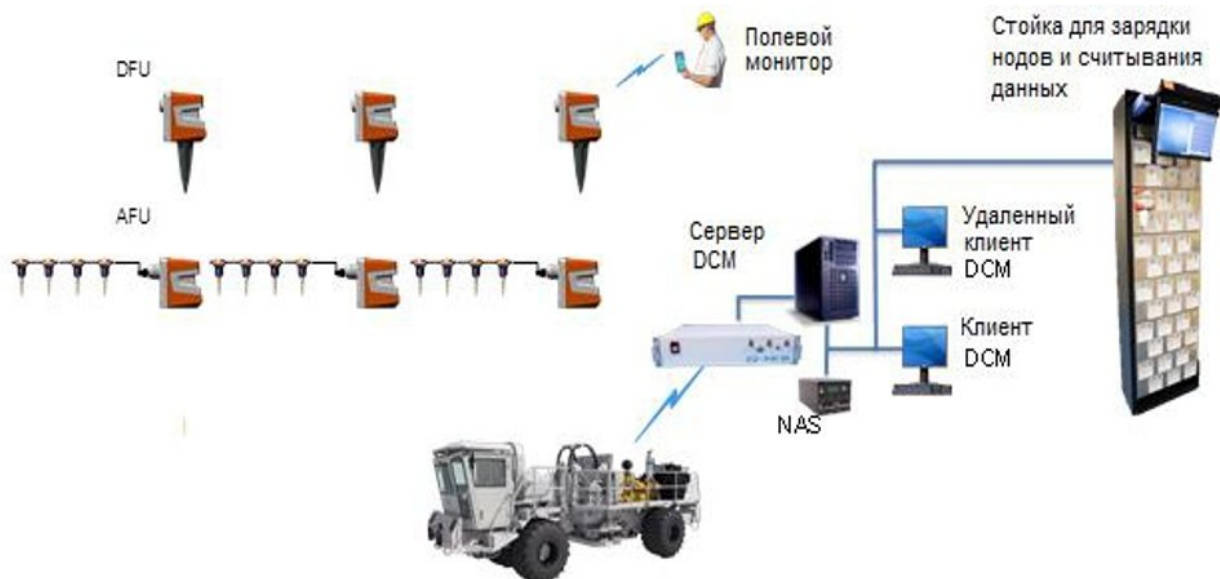
Таким образом, очевидно, что наземные нодальные системы действительно применимы на российском рынке, однако их массовое внедрение сдерживается опасениями по поводу возможности контролировать оборудование во время работы, и требованием быстро и

легко создавать файлы данных для оценки их качества.

Система WiNG

Компания Sercel уже много лет поставляет на российский рынок наземное сейсмическое оборудование, и недавно запустила в производство нодальную наземную систему, в которую интегрированы самые новейшие технологии, соответствующие современным тенденциям в области сбора сейсмических данных. Беспроводная система следующего поколения (Wireless Next Generation) или система WiNG — это комплексное системное решение, включающее два варианта ноды (DFU со встроенным цифровым датчиком и AFU с разъемом для внешнего геофона), стойки для зарядки и сбора данных, полевые инструменты и полнофункциональный центральный блок (DCM) с интегрированной функцией управления источниками (Source Manager), см. Рисунок 2.

Модуль Source Manager позволяет системе WiNG реализовать функцию Sercel Smart LF, позволяющую генерировать низкочастотный сигнал с низким уровнем искажений. Помимо этого, для регистрации сейсмического сигнала ноды WiNG DFU используют акселерометры MEMS последнего поколения. Этот датчик, получивший название Quiet Series, снимает ограничения по низкой частоте, присущие двум предыдущим поколениям датчиков MEMS. Теперь он позволяет регистрировать сейсмические сигналы с высокой точностью ниже 1 Гц (Fougerat, 2018). Датчик работает в системе Sercel 508XT с 2013 года. Его надежность и высокое качество данных были проверены на практике. Этот приемник сигналов является уникальным в отрасли, и имеет ряд преимуществ перед геофонами, интегрированными в другие ноды.



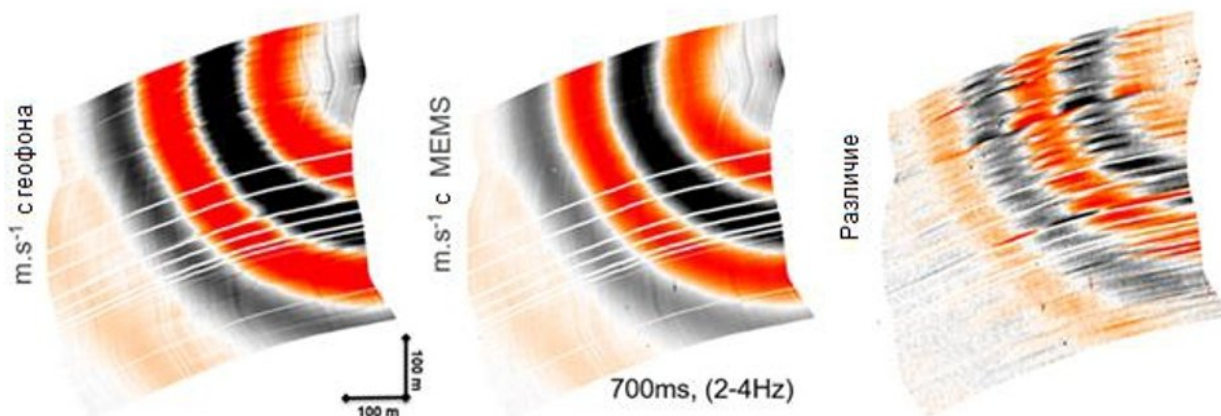
▲ Рис. 2. Схема системы WiNG.

Общие преимущества MEMS перед геофонами включают их нечувствительность к электромагнитным помехам и отсутствие паразитных частот. Уровень искажений датчика также значительно ниже (-90 дБ для MEMS по сравнению с -62 дБ для геофонов). Характеристики искажения сейсмических датчиков имеют первостепенное значение для обеспечения точности получаемых данных, хотя в целом отрасль игнорирует этот параметр. Это крайне важно, когда генерируются низкие частоты (больше гармоник в сейсмической полосе) или, когда проекты выполняются с использованием высокопроизводительных методов (контаминация внутри записи). Кроме того, искажение невозможно смоделировать, и зачастую оказывается невозможным ослабить их влияние при обработке.

Существенным преимуществом датчика QuietSeis перед геофонами является отсутствие явления, называемого джиттером (дрожанием, или размытием) данных. Оно влияет на записанные данные, внося частотно-зависимые амплитудные и фазовые искажения, которые нельзя исправить на этапе

обработки. Источником джиттера данных являются вариации отклика геофонов, которые разнятся от устройства к устройству. Ключевыми рабочими параметрами и, следовательно, откликом на сейсмический сигнал геофона являются его чувствительность, частота среза и коэффициент затухания. Однако эти параметры могут изменяться из-за производственных допусков, колебаний температуры и старения самого устройства. Процесс производства геофонов и сама их конструкция не позволяют задать одинаковые значения этих параметров каждому геофону, даже если они имеют в точности одинаковый "возраст" и одну и ту же температуру, что в свою очередь имеет следствием упомянутые отклонения в отклике отдельных геофонов в пределах расстановки. Это отклонение проявляется в виде "дрожания" данных, представляющего собой погрешность в точности записанных данных, которая может достигать более 4 дБ по амплитуде и 15° по фазе на определенных частотах для геофона с частотой 5 Гц.

Датчики Quietseis производятся с использованием полупроводниковой технологии MEMS и уже в силу этого



▲ Рис. 3. Временные срезы данных на 700 м/сек для октавы [2-4 Гц]. Амплитудные ошибки проявляются в виде полос по горизонтали (данные собраны по общему пункту приема), в то время как фазовая ошибка проявляется как «размытая» граница между максимумом сигнала (дан красным цветом) и минимумом (черным цветом). Эти два явления хорошо видны на данных с геофонов, но отсутствуют на данных с МЭМС.

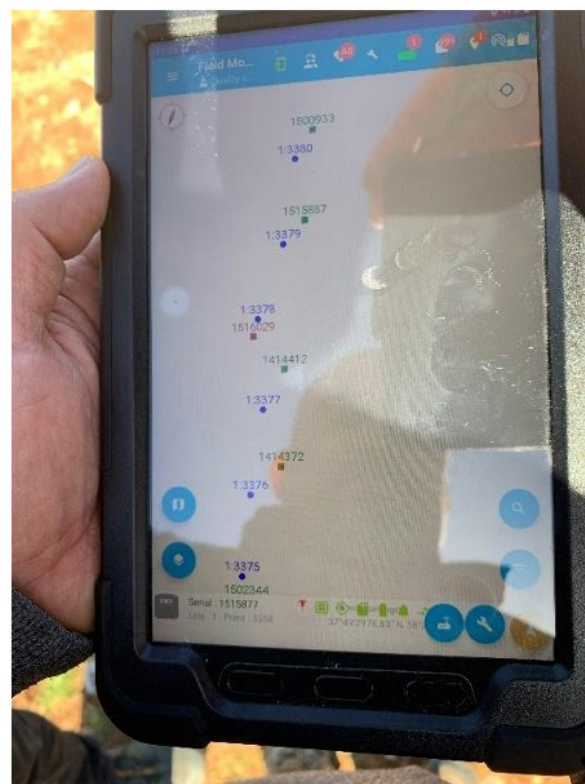
изготавливаются с очень малыми допусками, и не подвержены изменениям, вызванным температурой и старением. Как следствие, джиттер данных у них отсутствует, а записанные значения амплитуды и фазы верны, независимо от частот: от постоянного тока (0 Гц) до нескольких сотен герц. Это является значительным преимуществом для приложений FWI или AVO.

Чтобы провести сравнение, в Sercel был выполнен параллельный тест, полные результаты которого описаны в работе Н.Тэлье (Tellier 2020), по результатам которого были получены временные срезы, показанные на рисунке 3. На этих срезах джиттер данных хорошо виден при сравнении данных с геофонов с данными MEMS (QuietSeis).

Помимо сенсора, адаптированного к новейшим технологиям сбора данных, существует еще одна ключевая особенность системы WiNG, которая делает её подходящей наилучшим образом именно для российского рынка, и уникальной среди нодальных систем, а именно - возможность удаленного контроля качества по беспроводной сети. Сеть Pathfinder позволяет объединить ноды в

единую сеть после их расстановки в поле, обеспечивая устойчивую и надежную беспроводную связь. Она построена так, что каждый нод идентифицирует соседние устройства для установки связи, и передает им информацию о своем статусе для ретрансляции на конечный

▼ Рис. 4. Портативное устройство WiNG Field Monitor, взаимодействующее с нодами.



терминал. В сети используется протокол самонастройки и самовосстановления, поэтому при развертывании или перемещении нодов не требуется их донастройка или иное вмешательство оператора.

При использовании сети Pathfinder полевой персонал может быстро и без повторной проверки каждого нода собирать топографическую информацию и сведения об их состоянии, и загружать их в DCM (центральный блок) для отображения. Кроме того, ноды могут отслеживать уровень шума в поле и угол своего наклона, немедленно передавая в сеть Pathfinder сигнал, если значение параметра в какой-то момент превысило предустановленный предел.

Беспроводной сбор топографической информации также играет ключевую роль в системе WiNG. В DCM (центральном блоке) эта информация автоматически обрабатывается инструментом автоматической топопривязки (Auto Assignment tool), который сопоставляет топографические данные о местоположении нода с файлом SPS-R, и назначает каждому ноду соответствующий пикет приема, в котором он расположен. В случае какой-либо неоднозначности - например, если нод получает слабый сигнал GPS в случае ухудшения условий его приема, оператор получает соответствующее предупреждение с предложением проверить расположение этого нода. В целом для проектов за пределами городской черты рассчитано, что более 90% нодов назначаются автоматически, без вмешательства оператора.

Выполнение такой топопривязки на ранней стадии проекта имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет обнаруживать и устранять ошибки на раннем этапе, пока оборудование еще находится в поле, вместо того, чтобы устранять их при последующей обработ-

ке данных. Это также позволяет оператору создавать неполные файлы данных для целей контроля качества, по мере того как данные считываются с нодов. Это позволяет заказчику иметь уверенность в том, что геофизические цели проекта будут достигнуты в кратчайшие сроки.

DCM, или диспетчер завершения данных, представляет собой центральное устройство с широким диапазоном функциональных возможностей, которое обеспечивает все функции контроля, мониторинга и управления данными, необходимые для ведения сейсморазведки. В дополнение к уже описанным функциям автоматической топопривязки и контроля качества, DCM обеспечивает полное управление событиями источника сигнала, завершение данных, а также подготовку и экспорт файлов SEG-D. В случаях, когда система WiNG используется совместно с другой системой Sercel (например, 508 или 428), DCM может импортировать SEG-D из другой системы и объединить полученные данные для создания единого массива. Вместе с дополнительным модулем Source Manager DCM также можно использовать для настройки и управления источниками возбуждения, что отличает WiNG от многих других нодальных систем, которые полагаются на решения для управления источниками от сторонних производителей. DCM разработан с архитектурой типа «клиент-сервер», позволяющей нескольким рабочим местам отслеживать и контролировать ход операций.

Несмотря на очевидные преимущества регистрации сейсмоданных с помощью датчика QuietSeis, мы считаемся с пожеланиями многих сейсмических подрядчиков продолжать работу с обычными геофонами, как для того, чтобы оправдать сделанные ранее инвестиции, так и в силу особых контрактных обяза-



▲ Рис. 5. Нод WiNG DFU, развернутый в Южной Америке.

тельств или геофизических причин, когда требуется установка именно групп геофонов. В любом подобном случае подрядчик все же получает многие из преимуществ системы WiNG, так как доступна альтернативная комплектация нода с разъемом KCK, для регистрации данных с геофона. Такой нод (AFU) имеет почти те же функции и преимущества, что и DFU, за исключением датчика QuietSeis.

Система WiNG в настоящее время используется несколькими подрядчиками по всему миру, от Турции до Северной и Южной Америки. Несмотря на то, что условия там отличаются от российских, упомянем о том, что североамериканский оператор продолжил сбор данных во время экстремального похолодания, когда температура около -30°C сохранялась в течение многих дней, что еще раз подтверждает пригодность системы WiNG к работе в суровых климатических

условиях.

Помимо этого, недавно в Республике Саха (Якутия) российским сейсморазведочным подрядчиком были проведены полевые испытания с применением небольшой системы из 1000 нодов WiNG, в полной рабочей комплектации, для сбора данных 3D методом вибросейс в типичной для этого региона таежной местности. Испытание прошло очень успешно, с полнофункциональным контролем качества по сети Pathfinder на расстановке с интервалом между приемниками 50 м и интервалом между линиями 300 м, что в очередной раз доказало применимость системы WiNG к работе в этих условиях. На дату написания этой статьи идет подготовка проведения последующих тестов системы WiNG в различных природно-климатических условиях в течение 2021 года.

Выводы

Обстоятельства вынуждают российских сейсморазведочных подрядчиков переходить на новейшие методы наземной сейсморазведки, включая регистрацию низкочастотных сигналов, генерацию сигнала источника с меньшими искажениями, и бороться за повышение эксплуатационной эффективности, которую дают нодальные системы сбора данных. Однако преимущества, предлагаемые этими технологиями, не должны быть реализованы ценой роста проектных рисков или утраты контроля над проектом.

В этой статье мы старались показать, что система WiNG предлагает российским подрядчикам решение, позволяющее использовать нодальные технологии сбора данных без ущерба для функций мониторинга и контроля рисков, которые в настоящее время предоставляются системами кабельной телеметрии.

Литература

1. Criss J. [2020]. Операционное влияние нодов при производстве крупномасштабных сейсмических работ First Break № 38 вып. 1, 59-62.
2. Fougérat, A., Guérineau, L. and Tellier, N. [2018]. Запись высококачественного сигнала с частотой до 0,001 Гц с помощью стандартных акселерометров MEMS Материалы 88-й ежегодной конференции SEG, расширенные тезисы.
3. Ollivrin G., Tellier N., and Ellis R. [2020]. О природе сейсмических искажений Hart Energy E&P, 58-60.
4. Ollivrin, G. and Tellier, N., 2021, SmartLF как инструмент для мощного и стабильного уменьшения искажений низкочастотного сигнала. Приборы и системы разведочной геофизики, 1 (68)/2021.

5. Tellier, N., Dagaev, I. And Bolbat, V., 2016, Успешные опытные работы открывают путь к применению вибрационной сейсморазведки на низких частотах в России. Приборы и системы разведочной геофизики, 4 (58)/2016.

6. Tellier, N. and Wilcox, S., 2018, Уверенность в качестве данных с наземных сейсмических регистраторов. First Break, № 36, стр. 53-59.

7. Tellier, N., Laroche, S., Wang, H. and Herrmann, Ph., 2020, Регистрация одинокими датчиками без джиттера (размытия) данных: сравнительное исследование датчиков. Приборы и системы разведочной геофизики, 4 (67)/2020.

Подробнее об авторе



Стивен
Уилкоккс

руководитель
направления
беспроводного
оборудования
Sercel