

Сейсморазведка малых объектов: быстро, качественно, недорого

- Ошкин А.Н., Турчков А.М., Бурденко А.А., Вязниковцев А.А., ООО «Соника», МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва
- Гладилов Д.В., ООО «Соника», г. Ухта
- Мосягин Е.В., АО «СНИИГГиМС», г. Новосибирск
- Детков В. А., ООО «Красноярскнефтегеофизика», г. Красноярск

Введение

Сейсморазведка является одним из самых информативных, но, и в то же время, дорогих геофизических методов изучения строения среды. Значительную часть в стоимости полевых работ занимает рубка просек (если она актуальна) и использование большого количества дорогого оборудования и тяжелой техники. И предпосылок к возникновению высокоскоростной аэросейсморазведки пока не наблюдается.

Несколько лет назад были опубликованы результаты опытных работ по сравнению материалов, полученных импульсными источниками по стандартной технологии с накоплением сигнала на каждом ПВ и по технологии непрерывной съемки в движении (Детков, 2019), (Кузнецов и Баландин, 2021) (история развития этого подхода есть в статье (Детков, 2021)). Авторы работ отметили не только сопоставимые результаты съемок, но и «лучшую прослеживаемость горизонтов практически на всем интервале записи» при кратном сокращении затрат времени на регистрацию сейсмических данных. При этом очевидно - сокращение времени проведения полевых работ ведет к удешевлению всего проекта.

Важно также отметить, что в описанных работах сравнивались классическая съемка, выполненная импульсной группой из 4 источников, и съемка в движении, выполненная импульсной группой из 2 сейсмических источников. Облегченная импульсная группа также сокращает расходы на выполнение полевой съемки, обеспечивая кратное снижение количес-

тва технических ресурсов, задействованных при проведении работ.

Другой путь удешевления съемки в условиях лесистой местности и заболоченных, труднопроходимых участков, заключается в отказе от традиционных кабельных регистрирующих систем в пользу бескабельных. Это позволяет отказаться от тяжелой техники для смотки и размотки приемных линий и использовать легкие снегоходы зимой и квадроциклы летом, а это в свою очередь позволяет отказаться от рубки леса под приемные линии или минимизировать ее объемы. Все это приводит к существенному ускорению и удешевлению работ по подготовке сейсмических профилей в случае 3D съемки, а также уменьшает воздействие на экосистемы участка работ.

Системное удешевление работ повышает их рентабельность и расширит область применения сейсморазведки, например, позволит работать на небольших участках, в том числе краевых зонах месторождений, или выполнять съемку на твердые полезные ископаемые (ТПИ), реализовывать плотные и сверхплотные системы наблюдения.

В настоящей работе авторы делятся практическим опытом использования технологии съемки в движении с различными регистрирующими системами.

Высокоплотная съемка в движении

Суть подхода сводится к простой идее: вместо того, чтобы делать ПВ с редким шагом (обычно 50 м) и накоплениями поднимать соотношение сигнал/шум до требуемого уровня, можно производить

возбуждение сигнала непосредственно при движении источника по профилю, благо санный вариант давно известного импульсного источника «Енисей» это позволяет осуществлять без какой-либо доработки. Быстрое время заряда конденсаторов позволяет производить возбуждения каждые 6-10 секунд, что в пересчете в пространственный шаг составляет около 5 м между отдельными ПВ.

Простая арифметика показывает, что при возбуждении с шагом 50 м по профилю и 10 накоплениями на каждом ПВ в среду будет закачана такая же энергия, как и при возбуждении с шагом 5 м и одним накоплением, а ведь именно количество энергии, закачанной в среду, в первую очередь отвечает за глубинность и качество получаемого результата при прочих равных условиях. При этом не тратится время на остановку и трогание с места на пунктах возбуждения, за счет чего уменьшается время съемки.

Скорость отстрела профиля или площади может вырасти в 3 и более раз, что в свою очередь влечет за собой существенную финансовую экономию при проведении полевых работ, так как снижается время эксплуатации дорогостоящего оборудования и тяжелой техники.

Важным элементом оптимизации полевых работ является отказ от строго выдержанной сети наблюдений в пользу гибкой с регистрацией фактических координат ПВ и ПП. Метод МОГТ с успехом может применяться не только на прямоугольных, но и на нерегулярных или даже хаотичных системах наблюдений. Главным требованием может являться не факт точной установки ПВ или ПП в назначенное проектировщиком съемки место, а факт точного определения координат ПВ или ПП приблизительно в месте, назначенном проектировщиком. При известных фактических координатах ПВ и ПП процедуры бинирования будут произведены корректно, а совре-

менные алгоритмы регуляризации могут успешно пересчитать сеть на регулярную, если это необходимо. Важно лишь поддерживать некоторую минимальную плотность данных.

Отказ от жестких систем наблюдения в пользу гибких существенно упрощает выполнение полевых работ на участках с рельефом или строениями. Нет необходимости тратить существенные силы, прокладывая профиль через болото или через небольшой холм – можно немного сдвинуть ПВ в сторону, но при этом записать его координаты. Современные GNSS системы позволяют без каких-либо затруднений в режиме реального времени определять фактические координаты ПВ непосредственно в движении, а потом это учитывать при обработке, чем и пользуются авторы в своих работах.

Переход на гибкую систему наблюдений с определением фактических координат (в первую очередь это относится к координатам ПВ) в некоторых случаях позволяет также отказаться от предварительной разбивки линий возбуждения. На Рис. 1. показано фото с работ, на которых в качестве подготовительных операций была только загрузка системы профилей возбуждения в навигационную систему импульсной группы, после

▼ Рис. 1. Фото следов импульсной группы на опытных работах на ТПИ без выполнения предварительной разбивки линий возбуждения.





▲ Рис. 2. График регистрации сейсмических данных в 2022 году. Физнаблюдения приведены к стандартной съемке с шагом ПВ 50 м.

чего трактор, буксирующий источники, начинал движение, ориентируясь на показания навигатора. Такой подход позволяет не только сэкономить время, но и оперативно внести изменения в систему наблюдений при возникновении необходимости прямо в процессе работ.

Первый коммерческий проект с использованием технологии высокоплотной съемки в движении был выполнен авторами в начале 2022 года в республике Коми (Ошкин и Турчков, 2023). Особенностью работ были сжатые сроки. Начало съемки было запланировано на март, а фактически регистрация данных началась в третьей декаде марта. Несмотря на стремительно завершающийся полевой сезон и все трудности, связан-

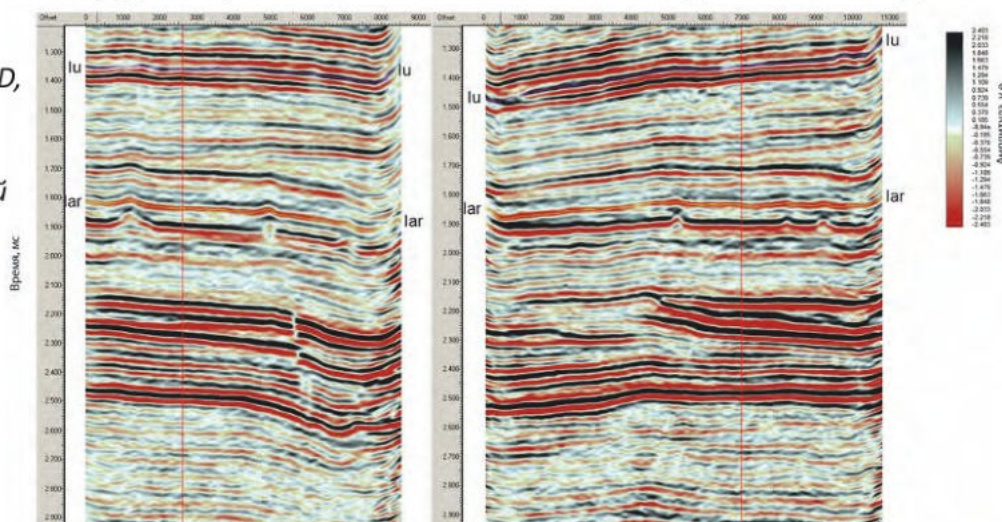
ные с ухудшением погоды и таянием снега, полевые работы были завершены в срок. Более 80 км² были отработаны за 35 календарных дней, из которых 12 дней были днями простоя, в том числе связанными с рубкой просек (Рис. 2).

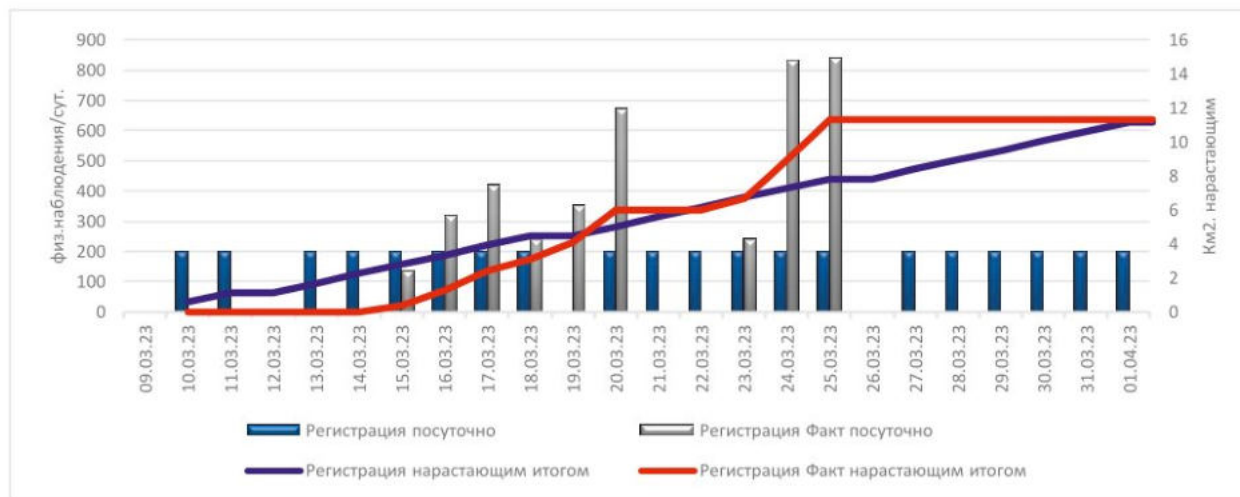
Абсолютным рекордом за день была отработка 27.6 пог. км линий возбуждения (или 552 ф.н. в пересчете на классическую съемку с шагом 50 м), при этом следует учитывать, что значительную часть времени импульсная группа простаивала в ожидании тихой погоды.

Весной в Коми становится ветрено.

Пример данных, полученных авторами на этом объекте по технологии высокоплотной съемки в движении на одном

► Рис. 3. Пример данных МОГТ 3D, полученных по технологии высокоплотной съемки в движении в 2022 году.





▲ Рис. 4. График регистрации сейсмических данных в 2023 году. Физнаблюдения приведены к стандартной съемке с шагом ПВ 50 м.

из лицензионных участков в Коми, приведен на Рис. 3.

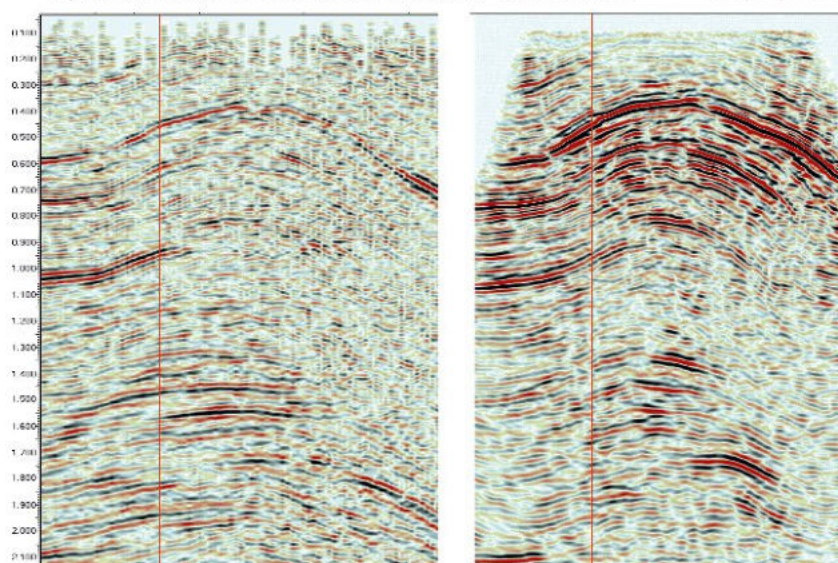
Результаты были признаны заказчиком как очень информативные, позволившие с успехом решить все поставленные геологические задачи.

Сравнение материалов, полученных при съемке в движении с архивной классической 2D съемкой с возбуждением взрывами через 50 м, показало, что новые данные как минимум не хуже (хотя следует признать, сравнение данных производилось только на качественном уровне - визуальном).

В 2023 году авторами был выполнен еще один коммерческий проект в Коми с применением высокоплотной съемки в

движении. Площадь участка работ была небольшая, однако погода позволила выполнять регистрацию круглосуточно, что в максимуме дало 41.6 пог. км линий возбуждения в сутки или 832 ф.н. в пересчете на классический 50 м шаг (Рис. 4).

Низкая стоимость отстрела позволила отработать участок двумя шаблонами, перекрывающимися не пунктами приема, как это обычно принято в сейсморазведке, а пунктами возбуждения, что в свою очередь позволило использовать вдвое меньшее число каналов в работе. «Ценой» такого решения было увеличение времени полевых работ буквально на 3-4 дня. Собственно, на графике Рис. 4. перерыв в съемке 21-23 числа был связан



◀ Рис. 5. Сравнение результатов архивной классической 2D съемки взрывами (слева) и 3D среза по той же линии, полученного по методике высокоплотной съемки в движении (справа). Коми, 2023 год.

с перестановкой сейсмических каналов с одного шаблона на другой, а работы 23-25 числа – это второй цикл возбуждения по тем же самым ПВ.

В работах 2023 года небольшие размеры сети наблюдений, не соответствующих выраженной антиклинальной геологической структуре на участке работ, затруднили изучение глубоких горизонтов. Однако на глубинах до 1.5-2 секунд сравнение с архивной 2D съемкой, выполненной по классической схеме взрывами, демонстрирует как минимум равную информативность предлагаемой методики.

Регистрирующие системы

Так как электронные элементы всех сейсмостанций близки по своим характеристикам друг к другу, качество самой регистрации для всей регистрирующих систем находится на практически неотличимом друг от друга уровне. Основные различия обусловлены надежностью и удобством применения разных систем.

Авторы имеют опыт работы с кабельной телеметрической системой «Sercel 508 XT», и бескабельными системами «GSX» от компании «Geospace», и «SmartSolo» от одноименного производителя «SmartSolo».

Кабельная система «Sercel 508 XT»

Современная система регистрации от общепризнанного производителя. Как и для любой кабельной системы при производстве полевых работ требует рубка просек под линии ПП и бригады из нескольких тяжелых вездеходов типа МТЛБ для смотки и размотки.

Авторам видится, что большинство читателей знакомы с кабельными системами, поэтому подробного описания она не требует.

К несомненным преимуществам регистрирующей системы следует отнести возможность контроля данных и

состояния оборудования в режиме реального времени. Получение сведений об уровне микросейсм или о неполадках на приемной линии позволяет своевременно остановить работы до исправления ситуации. Однако расплатой за это являются высокая цена самой системы и дополнительные расходы на сопровождение сейсмической съемки.

Также следует отметить, что данную систему крайне неудобно использовать на местности, пересеченной трубопроводами, дорогами, реками и т.д.

Бескабельная система «GSX» (Geospace Technologies Corporation)

Каждое приемное устройство этой системы (нод) представляет собой раздельный комплект, состоящий из сейсмоприемника (или группы), регистратора и аккумуляторной батареи. Разделение с одной стороны несколько осложняет работу в поле, но с другой стороны это позволяет по желанию сменить тип приемника или установить требуемую группу, а также оперативно заменить батарею, если она разрядится или выйдет из строя. Этаким универсал на все случаи жизни. Так, авторы при опытных работах (Турчков, Ошкин, Александровка 2022) отработали 2D профиль с вертикальными приемниками (на Р-волнах), а затем заменили их на горизонтальные и сделали съемку на обменных волнах. А в 2023 году авторы выполнили 3С регистрацию, устанавливая в точку три разных сейсмоприемника, подключенные к трем нодам. Отсутствие привязки к кабелю с фиксированными расстояниями между ПП расширяет возможности и, как следствие, снижает себестоимость работ.

Бескабельная станция крайне просто масштабируется под любые размеры систем наблюдений – единым комплектом оборудования можно выполнить и масштабные 3D проекты и небольшие



▲ Рис. 6. Бескабельная станция «GSX». Вариант организации ЗС регистрации, путем подключения разных приемников к нодам.

съемки на ТПИ с шагом ПП 5-10 м.

Показательный пример преимущества бескабельной системы регистрации над кабельной показан в работах авторов на территории действующего промышленного объекта ПАО «Норильский Никель» (Турчков, Ошкин, Норильск 2022). Там регистрация выполнялась вдоль имеющихся дорог. Изначально работы планировалось выполнять кабельной системой, бескабельная «GSX» была взята для тестового ознакомления, однако бесчисленные пересечения с другими дорогами, по которым перемещалась тяжелая техника, перепады рельефа, трубопроводы, заборы и прочие строения на пути профилей, после первого же опытного профиля вынудили отказаться от первоначального плана, и дальнейшая съемка была с успехом выполнена нодальной системой.

Отсутствие кабелей особенно актуально при работах с импульсными источниками в санном варианте. В этом случае на местах пересечения линий возбуждения с линиями приема не требуется организация ворот с подвешенным над проезжающим трактором кабелем, что существенно упрощает организацию полевой съемки. Особенно в районах без леса (Рис. 7. Фото авторов с участка работ на севере Красноярского края).

Для размотки приемных линий не



▲ Рис. 7. Фото следов импульсной группы на участке работ для целей ТПИ. Регистрация кабельной станцией потребовала бы сооружения ворот на местах пересечения линий возбуждения с линиями приема, что в условиях тундры существенно осложняет выполнение работ.

требуется тяжелая техника. Все работы могут выполняться с автомобиля типа пикап, либо легкого снегохода с санями.

Все перечисленные факторы снижают стоимость эксплуатации оборудования, соответственно снижают издержки при выполнении сейсмической съемки.

Конечно, у системы есть и свои недостатки, главный из которых – «слепость» оборудования, то есть, невозможность получения сейсмограмм непосредственно в ходе регистрации, а только после смотки профиля и считывания данных с каждого нода. Также отсутствуют сведения о корректности работы регистрирующего оборудования, что повышает вероятность наличия пропусков каналов в сейсмограммах. Однако качество данных изучается и «настраивается» в ходе предварительных опытных работ, выполняемых на старте съемки. А возможные пропуски в приемных линиях, во-первых, маловероятны из-за высокой надежности оборудования, а во-вторых, опыт показывает, что их опасность преувеличена.

Недостатком в ряде случаев может выступать и ограниченный емкостью аккумулятора и встроенной памяти срок работы нода в поле. Но производитель заявляет в характеристиках 1 месяц при температурах до -40. Авторы на данный

момент на своем опыте могут подтвердить 14 дней при температурах -25...-35, при которых проблем выявлено не было. В любом случае система позволяет подключать дополнительные аккумуляторы, либо производить их замену на заряженные.

Бескабельная система «SmartSolo» на базе нодов «IGU-16HR»

Более современная нодальная система, в которой каждый нод – устройство в цельном корпусе, не имеющем проводов и разъемов, весом чуть более 1 кг, что делает работу с таким оборудованием предельно простым и удобным.

Подробный отчет о тестировании системы приведен в статье (Будяк, Шаймарданов и др., 2021).

Практически все плюсы системы, связанные с ее бескабельностью и описанные в разделе про «GSX», относятся и к «SmartSolo».

Авторы познакомились с системой при выполнении работ МОГТ 3D весной 2023 года на одном из ЛУ в р. Коми. Установка и снятие оборудования на приемных линиях выполнялась с использованием снегоходов и малогабаритных саней-волокуш. Каждый вездеход за один раз увозил 50 и более нодов (каналов), а суммарное время расстановки 3 тыс. ПП не превышало 2-3 дней сейсмоотрядом из 6 человек на 3 снегоходах. Приемные линии выполнялись без рубки просек.

Тяжелая техника использовалась только на линиях ПВ (один трактор плюс один запасной).

Общая численность сейсмического отряда составила 12 человек, в том числе 4 человек ИТР.

Вкупе с выполнением возбуждения в движении использование системы «SmartSolo» позволило выполнить съемку в минимальные сроки с существенной экономией по сравнению с классическим подходом.



▲ *Рис. 8. «Smart Solo» – надежный и простой модуль. Проверка оборудования перед началом работы.*

Остается добавить, что коэффициент извлечения информации был близок к 100%, а потерь оборудования удалось избежать полностью. Хотя, конечно, в условиях иных, где могут появляться «любопытные» граждане, необходимо предусмотреть дополнительные ресурсы для визуального контроля расстановки.

Эта система также имеет ограниченное одним месяцем время непрерывной работы, после которого требуется считать данные с нодов и зарядить их. И она также слепая – проанализировать результат можно только в конце отработки шаблона.

В некоторых случаях недостатком системы будет выступать невозможность подключения внешнего приемника или приемной группы. Однако тут следует учитывать, что отказ от такого подключения существенно упрощает работу с нодами в поле. Кроме того, встроенный геофон имеет заявленную производителем чувствительность 80 В/м/с, что втрое выше, чем у классического GS-20DX. Кроме того, существует модификация «IGU-16HR-IES» с выводом для подключения внешнего сенсора, однако практи-

ческого опыта использования такой системы у авторов нет.

Выводы

Безусловно, описанный выше подход имеет и свои недостатки. Одиночное воздействие (удар) отличается малой интенсивностью. Масла в огонь добавляют интенсивные шумы от движущегося трактора – опыт показывает, что до уровня 10 мкВ (при регистрации чувствительным приемником GS-ONE) эти шумы спадают на расстоянии около 1 км от трактора. Соотношение сигнал/шум на данных, полученных в движении, характеризуется низким соотношением сигнал/шум, которое может быть меньше 1.

Решить проблему позволяют современные подходы к шумоподавлению, а также чрезвычайно кратность, которая в стандартных бинах может достигать значений в многие сотни и даже тысячи единиц. Высокая кратность и является основным средством борьбы с шумами при суммировании после ввода кинематических поправок.

Однако в любом случае, интенсивные поверхностные волны от движущегося трактора на данном этапе развития средств обработки требуют применения частотных фильтров, отсекающих все, что находится левее 10-15 Гц, что в свою очередь сильно ограничивает возможности инверсии данных, полученных таким образом.

Слепые бескабельные системы повышают вероятность пропуска ПП из-за технических неполадок или утраты нода. И хотя опыт показывает, что требование Инструкции по сейсморазведке, касающееся ограничений на количество неработающих каналов, является чрезмерно строгим, особенно при повышении плотности системы наблюдений, но там, где закон необходимо соблюдать безоговорочно, есть риск необходимости перестрела площади, что, конечно же,

никак не вписывается в концепцию снижения стоимости работ.

Еще одним слабым местом данной технологии является отсутствие отработанной системы контроля качества получаемого материала. Практика показывает, что высокая плотность возбуждения может компенсировать малую силу одиночного воздействия. Отклонения в системе наблюдений от прямоугольной или выпадение из нее нескольких каналов не является препятствием в получении качественного результата. Однако очевидно, что есть некоторая грань, при пересечении которой конечный результат будет терять в качестве, и где находится эта грань, пока неизвестно.

Разумным решением является оценка качества получаемых данных, по результатам экспресс обработки непосредственно на месте проведения работ. Для этого необходим современный взгляд Заказчика, определенная степень доверия к исполнителю работ, и как следствие возможность принятия оперативных решений по управлению качеством данных в процессе производства работ.

По результатам выполнения работ по описанной технологии авторами, во всех случаях были получены данные, решающие геологические задачи в полном объеме и удовлетворяющие требованиям Заказчика. Результаты сравнения с архивными данными свидетельствуют о как минимум не худшем качестве получаемых данных. Технология применялась как при решении нефтегазовых задач, так и для задач ТПИ, как в 2D, так и в 3D вариантах.

Описанный подход позволяет оптимизировать системы наблюдения, упростить организацию полевой съемки, ускорить сам процесс регистрации сейсмических данных, что в свою очередь приводит к существенному удешевлению всего комплекса сейсморазведоч-

ных работ. Снижение постоянных затрат на этапе организации партии, а также производственных затрат вследствие оптимальных технических решений в виде бескабельных систем регистрации, применения способа импульсного возбуждения в движении, позволяет проводить высокоплотные сейсморазведочные работы при меньшей их стоимости с большей производительностью и большей экологичностью, в сравнении с традиционным подходом.

Литература

1. Будяк А. В., Шаймарданов А. Р., Бачков А. П. Перспективные возможности ООО «ТНГ-Групп» с новым бескабельным оборудованием. – Приборы и системы разведочной геофизики, 4(71)/2021
2. Детков В. А., Баландин П. В. Технология возбуждения упругих колебаний в движении GLIDE. – Приборы и системы разведочной геофизики, 2(63)/2019.
3. Детков В. А. К 40-летию импульсного источника «Енисей»: вчера, сегодня, завтра. – Приборы и системы разведочной геофизики, 4(71)/2021.
4. Кузнецов Е. С., Баландин П. В., Дробинский А. А., Череповский А. В. Результаты анализа полевых данных ОМР МОГТ-3D, полученных по технологии возбуждения сигнала в движении GLIDE. – Приборы и системы разведочной геофизики, 1(68)/2021.
5. Ошкин А. Н., Турчков А. М., Гладилов Д. В., Мосягин Е. В. – Высокопроизводительные и высокоплотные работы с импульсными источниками в Республике Коми. – Приборы и системы разведочной геофизики, 2(77)/2023.
6. Турчков А. М., Ошкин А. Н., Детков В. А., Мосягин Е. В., Воронцов В. В. Опыт применения высокопроизводительного способа получения сейсмических данных в районе действующих рудников ПАО «Норильский Никель». – Приборы и системы разведочной геофизики, 1(72)/2022.
7. Турчков А. М., Ошкин А. Н., Коротков И. П., Воронцов В. В., Череповский А. В. Опыт применения малогабаритного источника и бескабельной системы регистрации для изучения ВЧР и неглубоко залегающих объектов. – Приборы и системы разведочной геофизики, 2(73)/2022.