

Опыт применения высокопроизводительного способа получения сейсмических данных в районе действующих рудников ПАО «Норильский Никель»

■ Турчков А.М., Ошкин А.Н., ООО «Неоген», МГУ имени М.В. Ломоносова

■ Детков В.И., Почетный разведчик недр

■ Мосягин Е.В., АО «СНИИГГиМС»

■ Воронцов В.В., ООО «Геоспейс Технолджис Евразия»

Введение

В настоящее время обозначилась потребность в изучении особенностей или деталей строения неглубоко залегающих к поверхности рудных полезных ископаемых, коренных и россыпных месторождений алмазов и сланцевых месторождений нефти и газа. (например, «Бажен» в России или «Баккен» в США и Канаде). От основного метода геофизических исследований – сейсморазведки – требуется использование технологических приемов, повышающих разрешающую способность данных. Получить более четкое и разрешенное сейсмическое изображение подземных структур можно путем отказа от группирования источников и приемников с одновременным уменьшением интервалов между ними, использования точечного возбуждения без накапливания акустических сигналов и со сгущением линий приема и возбуждения [6].

Современные высокоплотные системы наблюдений в основном используют вибрационный способ возбуждения. Для ускорения работ разработаны и внедрены в производство технологии, сокращающие время возбуждения и регистрации сейсмических сигналов. Основные недостатки: вибрационная установка – это технически сложное и дорогое изделие с ограничениями по проходимости, спектр сигнала ограничен диапазоном частот свипирования.

В отечественной практике работ ограничено используются экологически безопасные импульсные источники

электромагнитного принципа действия, разработанные в конце 90- годов прошлого столетия первоначально для условий Восточной Сибири [1]. Широкое внедрение сдерживается из-за низкой производительности по причине слабой энергетики единичного воздействия на среду источников типа «Енисей» и «Геотон». Обычно используется группа из 3-4 источников и до 10 накоплений на пункте возбуждения. Тем не менее, в начале 2000-х годов была реализована идея сбора сейсмических данных высокой плотности. Эта идея была опробована на речных работах с использованием непрерывного возбуждения импульсным источником «Енисей ВЭМ» и непрерывной регистрации данных на берегу. В ходе работ были получены высокочастотные сейсмические сигналы, и, что крайне важно, было существенно сокращено время на отработку 1 км профиля [2].

Оригинальная идея запатентована в 2021 году как «Способ и система сбора данных» (патент №2745481). Формула изобретения позволяет одновременно использовать неограниченную группировку источников, возбуждающих упругие колебания в заранее заданном порядке, что существенно ускоряет процесс сейсморазведочных работ на поверхности различных сред. В частности, предусмотрен способ скоростного сбора сейсмических данных высокого разрешения, в котором используют электромагнитные импульсные невзрывные источники, принцип действия которых позволяет возбуждать сейсмические сигналы на

поверхности различных сред, не прекращая своего движения. Скорости движения источников и удельное давление на поверхность среды контролируются и уточняются в процессе сбора данных на основании требований к качеству сейсмических данных или требованием к снижению воздействий на окружающую среду.

В 2005-2020 годах ОАО «Енисейгеофизика» и ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» были проведены опытные речные и наземные работы по опробованию технологии. Визуальные отличия и инструментальные измерения экспертной обработки стандартной технологии и предложенного способа показывают, что на разрезах четко фиксируется дополнительная детальность глубинного строения среды, лучше суммируются и прослеживаются отражения в верхней части разреза. Получен двукратный рост производительности сейсморазведочных работ и возможное снижение затрат на 20-30% ([2], [5])

Методика производства работ

Настоящая статья написана по результатам выполненных опытно-методических работ (ОМР). Целью ОМР являлось опробование и оценка технологии возбуждения в движении для производства 2D сейсморазведочных работ для изучения верхней части разреза (до 500 м) на рудном месторождении. Полевые ОМР

были выполнены осенью 2021 года на действующем промышленном объекте ПАО «Норильский Никель» (г. Норильск, Красноярский край). Работы выполнялись для уточнения геологического строения для решения гидрогеологических задач.

Возбуждение колебаний осуществлялось при помощи импульсного электромагнитного источника колебаний – СЭМ-50. В качестве регистрирующей системы использовалась бескабельная система GSX (производство компании «Geospace Technologies»). Использование бескабельных нодальных систем регистрации, записывающих данные в непрерывном режиме, является наиболее оптимальным для технологии возбуждения в движении. В качестве сейсмоприемников использовались геофоны российского производства GS-ONE с собственной частотой 10 Гц, выпускаемые по оригинальной документации разработчика на предприятии «Геоспейс Технолоджис Евразия» в Уфе.

В ходе опытных работ был отработан один профиль. Работы на профиле осуществлялись в двух режимах отстрела: стандартном режиме и режиме отстрела в движении. Положение пунктов приёма оставалось неизменным в обоих режимах. Профиль располагался по обочине автомобильной дороги.

Рабочий момент производства отстрела приведен на фото на рисунке 1.

▼ Рис. 1. Рабочие моменты производства отстрела.



► Табл. 1.
Сравнение
методик
производства
работ
в двух
режимах.

Методика работ	Стандартная	В движении
Система наблюдения	Смешанная	Смешанная
Количество регистрируемых активных каналов	265	265
Длина профиля, м	1 320	1 320
Максимальная кратность наблюдений	291	384
Расстояние между ПП, м	5	5
Расстояние между ПВ, м	5	3,8 (среднее значение)
Минимальное удаление ПВ-ПП, м	1.6	1.5
Максимальное удаление ПВ-ПП, м	1425	1400
Плотность ПВ на 1 пог. км.	221	286
Плотность трасс на 1 пог. км.	58 700	75 900
Размер бина, м	2.5	2.5
Параметры регистрации		
Шаг дискретизации, мс	0.5	0.5
Длина записи, с	2	2
Параметры возбуждения		
Источник колебаний	СЭМ-50	СЭМ-50
Количество источников в группе	1	1
Количество накоплений	5	1
Прием упругих колебаний		
Сейсмоприёмник	GS-ONE	GS-ONE
Количество сейсмоприемников в группе	1	1

Стандартный режим отстрела подразумевал обработку каждого ПВ с предварительным выходом на проектное положение ПВ, остановкой импульсного источника СЭМ-50 и последующим отстрелом. Для увеличения соотношения сигнал/помеха, на каждом ПВ осуществлялось по 5 накоплений. Режим работы в движении подразумевал обработку каждого ПВ по ходу движения импульсного источника СЭМ-50. Скорость движения тягача составляла 2-3 км/ч, отстрел осуществлялся каждые 5-7 секунд. Среднее расстояние между ПВ по технологии возбуждения в движении

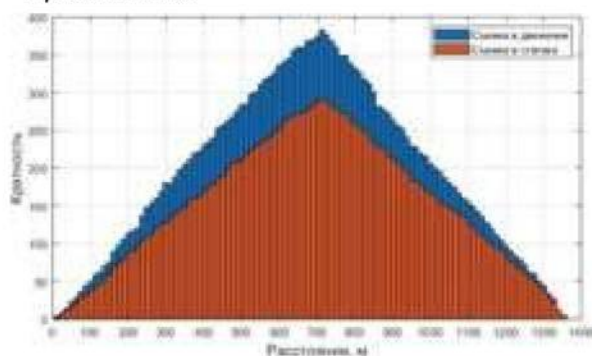
составило 3,8 м. Координаты каждого ПВ снимались в момент выстрела источника при помощи дифференциального GPS, подключённого к системе синхронизации. Полученные координаты автоматически записывались в электронный журнал.

В таблице 2 приведены сравнения ключевых параметров методики наблюдения в статике и в движении.

За счёт уменьшения шага по ПВ кратность в бине, полученная в съёмке в движении, была выше, чем для стандартного режима отстрела (см. рисунок 2).

Следует отметить, что регистрация бескабельной нодальной системой, записывающей данные в непрерывном режиме, является предпочтительнее для реализации технологии возбуждения в движении, чем регистрация кабельной системой. Например, реализация технологии возбуждения в движении в регистрирующей системе Sercel 428XL осуществляется записью в непрерывном режиме «microseismic». Технической особенностью данного режима является тот факт, что данные записываются со сме-

▼ Рис. 2. Сопоставление графиков кратности.



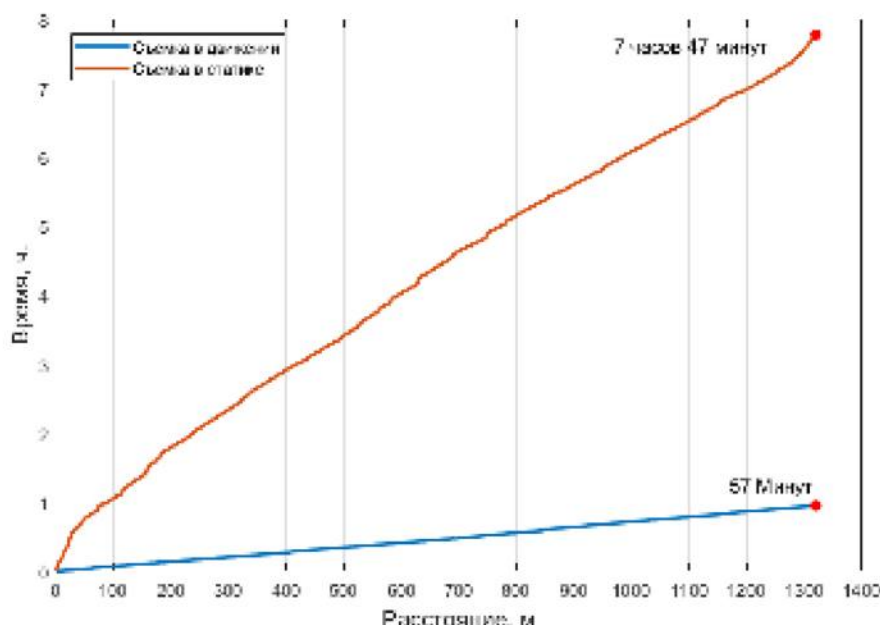


Рис. 3.
Сравнение времени
производства
отстрела
в двух режимах.

щением нуля, что приводит к дополнительным процедурам коррекции нуля на этапе ввода данных в обрабатывающую систему. В процессе регистрации бескабельной нодальной системой запись осуществляется непрерывно. Во время отстрела точное время сохраняется в интерфейс системы синхронизации источников и в дальнейшем это время используется для нарезки и выгрузки данных. Таким образом, работа источника осуществляется автономно от работы регистрирующей системы.

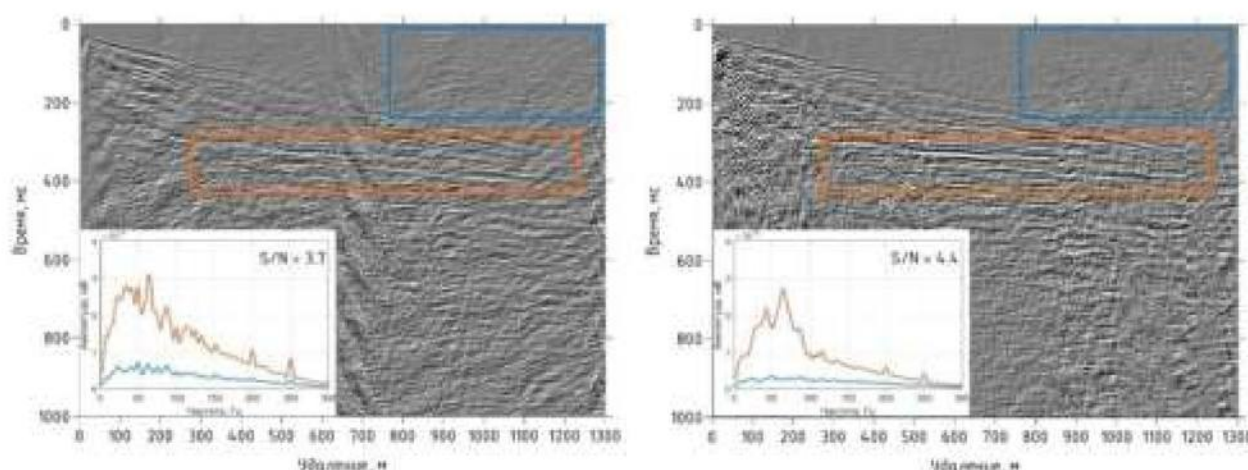
Безусловным преимуществом применения системы регистрации GSX является уменьшение числа полевых рабочих и задействованной техники для производства работ. Раскладка, установка и проверка работоспособности регистрирующей системы на профиле заняла 4 часа для бригады из 4 человек. Дополнительным преимуществом применения системы регистрации GSX для производства работ в районе действующих рудников ПАО «Норильский Никель» являлось отсутствие кабелей. Это позволило размещать профили непосредственно на территории промышленных объектов между существующими объектами.

На рисунке 3 приведены значения времени отстрела, выполненного в двух режимах. Общее время отстрела по стандартной методике (310 пунктов возбуждений по 5 накоплений, итого: 1 550 ударов) заняло в сумме 7 часов 47 минут, общее время отстрела в движении (400 пунктов возбуждений) заняло 57 минут.

Анализ одиночных сейсмограмм

На рисунке 4 приведены суперсейсмограммы ОГТ (база осреднения – 20 точек), полученные в двух режимах отстрела: стандартном режиме и режиме отстрела в движении. На обеих сейсмограммах в широком диапазоне удалений прослеживается опорный отражающий горизонт с уровнем t_0 – 270 мс (эффективная скорость до горизонта 4 500 м/с, глубина до горизонта 600 м).

По приведенным сейсмограммам были рассчитаны амплитудные спектры в окнах, содержащих полезный сигнал (отражённая от опорного горизонта волна) и микросейсм. В этих же окнах был рассчитан среднеквадратический уровень сигнала и микросейсм, получено значение соотношения сигнал/микросейсм.



▲ Рис. 4. Суперсейсмограммы ОГТ.

Рассчитанное соотношение сигнал/микросейсм на сейсмограммах после суммирования накоплений, полученных по стандартной методике, – 4,4, для одиночных сейсмограмм, полученных в движении, – 3,7. Работы на профиле проводились на территории промышленного предприятия, работающего в круглосуточном режиме. Этим обусловлен высокий уровень помех и относительно низкие значения соотношения сигнал/микросейсм. Тем не менее, как и следовало ожидать, соотношение сигнал/микросейсм выше на сейсмограммах после суммирования накоплений. С другой стороны, спектр полезного сигнала шире на одиночных сейсмограммах, полученных в движении. Ширина спектра сигнала, полученного по стандартной методике – 10-75 Гц, в движении – 10-85 Гц. В обоих случаях ширина спектра рассчитывалась таким образом, чтобы площадь спектра от нижней до верхней границы составляла половину площади всего спектра.

Обработка данных

Для обработки использовался программный комплекс RadExPro, имеющий в своем составе полный набор инструментов учета ВЧР и работы с сейсмограммами. Сейсмический материал был зарегистрирован в зоне действующего

рудника при постоянном присутствии работающей техники и других источников техногенных помех.

Методика обработки опиралась на геологические представления о районе работ, а именно наличие базальтовых покровов со слабоконтрастными, акустически невыразительными отражающими границами, залегающими местами со значительными углами наклона. Обработка данных была направлена на подавление основных волн-помех, выделение отраженных волн и отображение разломов в волновом поле окончательных разрезов.

Последовательность процедур, которая была выполнена в ходе обработки обоих наборов данных приведена в таблице 2.

Граф обработки, в целом, был идентичен, за исключением того, что статические и кинематические поправки подбирались индивидуально для каждого из профилей. Результат обработки данных, полученных по двум методикам (стандартная и технология возбуждения в движении), приведены на рисунке 5.

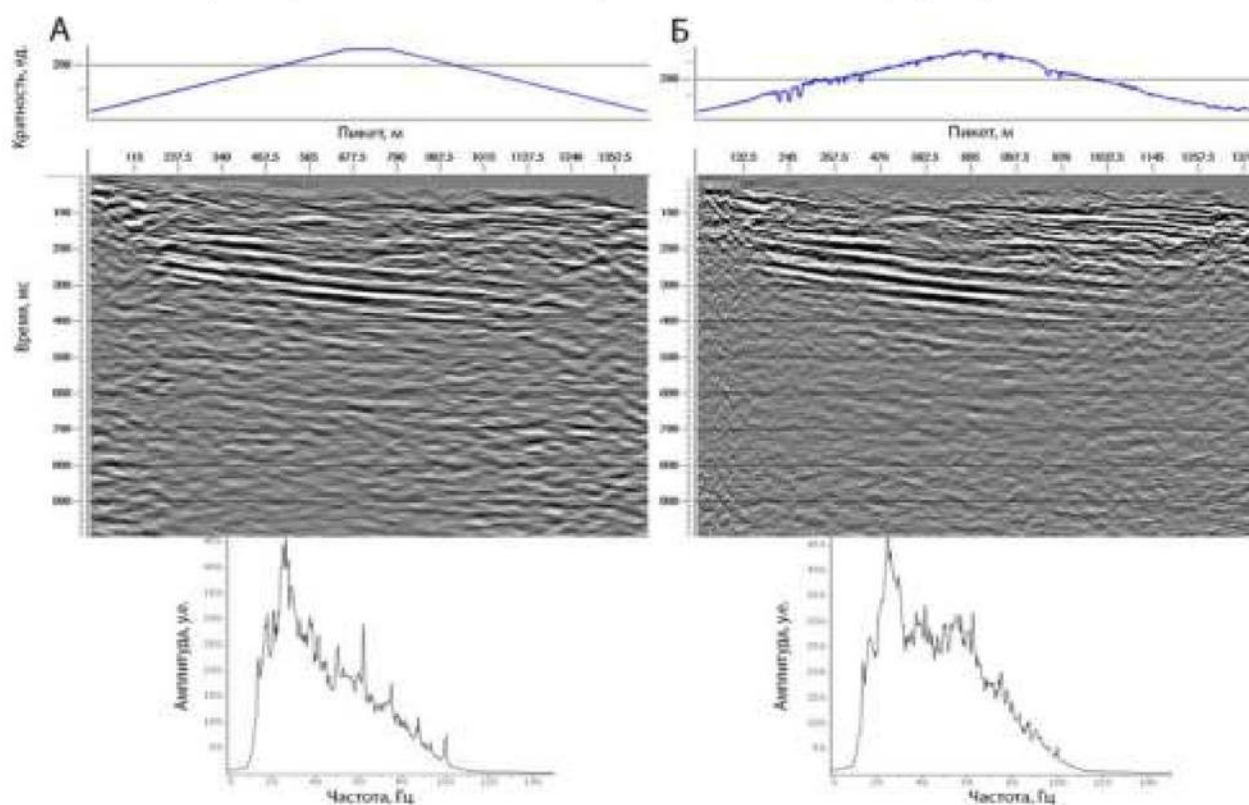
Анализ полученных результатов

Как отмечалось выше, сейсмограммы, зарегистрированные по технологии возбуждения в движении, ожидаемо имеют более низкое соотношение сиг-

1.	Описание и контроль системы наблюдения:
1.1	ввод полевых данных в программный комплекс RadExPro;
1.2	Криволинейное бинирование, присвоение геометрии сейсмическим данным;
1.3	редакция бракованных трасс/сейсмограмм;
2.	Учет влияния верхней части разреза:
2.1	прослеживание времен первых вступлений преломленных волн по сейсмограммам ОПВ до максимально возможных удалений;
2.2	построение глубинно-скоростной модели ВЧР и расчет статических поправок до финальной линии приведения 300 м со скоростью замещения 4000 м/с;
3.	Корректирующая фильтрация:
3.1	коррекция амплитуд за геометрическое расхождение;
3.2	поверхностно-согласованная нормировка амплитуд за источник/приемник;
3.3	ослабление поверхностных и звуковых волн, подавление высокоамплитудных помех по сейсмограммам ОПВ/ОПП;
3.4	поверхностно-согласованная нормировка амплитуд за источник/приемник;
3.5	подавление поверхностных волн-помех с предварительным уплотнением данных для выхода из алейсинга;
3.6	поверхностно-согласованная минимально-фазовая деконволюция;
3.7	спектральное отбеливание;
3.8	полосовая фильтрация в широком диапазоне частот;
4	Коррекция статических и кинематических поправок:
4.1	создание специального набора данных для коррекции остаточной статики;
4.2	итеративный анализ скоростей суммирования и автоматическая коррекция статических поправок;
5.	Суммирование и обработка разреза:
5.1	автоматическая регулировка усиления в окне 1000 мс
5.2	суммирование по ОГТ
5.3	когерентная фильтрация по собственным векторам;
5.4	полосовая фильтрация в диапазоне 6-12-50-70 Гц;
5.5	однооконная амплитудная балансировка.

▲ Табл. 2. Граф обработки данных МОВ-ОГТ.

▼ Рис. 5. Сопоставление временных разрезов, полученных по стандартной технологии (слева) и по технологии возбуждения в движении (справа).



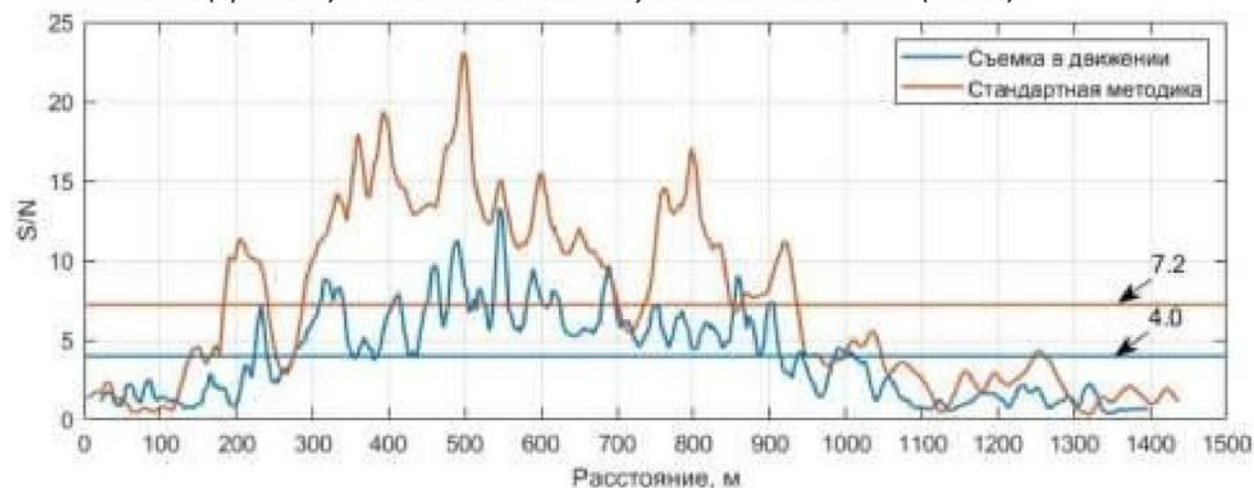
нал/помеха, чем после суммирования накоплений. Однако в процессе обработки за счет более плотного шага по пунктам возбуждения реализуется статистический эффект при выполнении поверхностно-согласованных процедур – деконволюция, нормировка амплитуд за ПВ и ПП, расчет статических поправок. Например, для данных возбуждения в движении значительно лучше сработали алгоритмы коррекции остаточных статических поправок – надежное решение удастся получить уже на первой итерации. Этот эффект наблюдался и ранее при проведении подобных работ – при тестировании движущихся источников на полигоне в Хакасии, а также при выполнении речных полевых работ водными электромагнитными движущимися источниками ВЭМ-50 (р. Нижняя Тунгуска, 2012-2014 г.) [4] и водными пушками на р. Лена в 2019 г. [7]. Современные процедуры обработки позволили подавить основной фон высокоамплитудных и регулярных помех, что нивелировало различия в соотношении сигнал/помеха между двумя методиками на обработанных сейсмограммах. Кроме того, данные, полученные по технологии возбуждения в движении, имеют более высокую кратность, что позволяет лучше реализо-

вать преимущества метода ОГТ по части подавления нерегулярных помех в процессе суммирования.

Сравнительный анализ окончательных разрезов (рисунок 5) показывает, что в результате применения технологии возбуждения в движении получен более разрешенный разрез, особенно в интервале времен 0-200 мс. Это связано, прежде всего, с отказом от суммирования накоплений в точке возбуждения. Кроме того, в этом же интервале времен наблюдается и лучшая прослеживаемость отраженных волн, что, по всей видимости, связано как с более точными статическими и кинематическими поправками, так и с общим синергетическим эффектом комплекса процедур обработки.

К положительным сторонам стандартной методики стоит отнести более высокую энергетику сигнала. На рисунке 6 приведены графики соотношения сигнал/шум вдоль опорного горизонта (200-400 мс). Максимальные значения соотношения сигнал/шум для стандартной методики достигают 25, для технологии возбуждения в движении – до 17. На участках разреза с полной кратностью (кратность выше номинальной), отношение сигнал/шум, рассчитанное для

▼ Рис. 6. График соотношения сигнал/шум вдоль опорного горизонта для стандартной технологии (красный) и по технологии возбуждения в движении (синий).



стандартной методики, почти везде выше, чем для рассчитанного для технологии возбуждения в движении. Среднее соотношение сигнал/шум для стандартной методики – 4,0, для методики в движении – 7,2.

Выводы

В результате обработки данных, полученных по стандартной методике и по технологии возбуждения в движении, были получены разрезы, со схожими амплитудно-частотными характеристиками. При этом, время производства отстрела на профиле сократилось минимум в 5 раз.

Мощности импульсных электромагнитных источников СЭМ-50 оказалось достаточно для производства работ для изучения верхней части разреза даже с учётом высокого уровня помех от действующего производственного объекта. Использование для регистрации колебаний бескабельных нодальных систем позволило обеспечить автономную работу бригады источника и уменьшить количество полевых рабочих.

Дальнейшее развитие методики, (выпуск источников для суши в санном и колесном вариантах с пиковым усилием до 100 тонн, модернизация систем их управления, синхронизации и позиционирования) позволит организовать производительную наземную технологию получения высокоплотных сейсмических данных с однократным воздействием на поверхность изучаемой среды (без накоплений).

Благодарности

Коллектив авторов благодарит компанию ООО «НН Технические сервисы» за консультационную помощь в выборе и согласовании участка для опытно-методических работ, выполненных ООО «Неоген» в 2021 г.

Литература

1. Детков В.А. К 40-летию импульсного источника «Енисей»: вчера, сегодня, завтра. Приборы и системы разведочной геофизики 4(71)/2020
2. Детков В.А., Баландин П.В., Копылов М.А. Технология возбуждения упругих колебаний в движении GLIDE. Приборы и системы разведочной геофизики 2(63)/2019
3. Детков В.А., Зарипов С.М. Повышение экономической эффективности сейсморазведочных работ на нефть и газ. Нефть. Газ. Новации. №1/2017
4. Ефимов, А.С. М.Ю. Смирнов, Г.Д. Ухлова, Е.В. Мосягин, Е.Г. Келлер, Т.Р. Кудрина Новые данные о строении Туруханской зоны дислокаций на основе комплексной интерпретации речных сейсморазведочных работ и геологических маршрутов // Геология и геофизика. – 2017. – т. 58. – № 3-4. – С. 553-564.
5. 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
6. Череповский А.В. Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. ООО «ЕАГЕ Геомодель». 2016
7. Шапорина М.Н., Мосягин Е.В., Садур О.Г. Геолого-геофизическое строение Предверхожанского краевого прогиба и прилегающих территорий по данным нового сейсморазведочного речного профиля МОГТ-2D и переинтерпретации архивных материалов. // Геология нефти и газа. – 2021. – № 5.