

Скользящее цифровое накопление при импульсном возбуждении упругих волн в движении по технологии GLIDE

■ Федоров А.Б., Череповский А.В., ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка», г. Москва

Показаны возможности повышения качества первичных данных при импульсном возбуждении упругих волн по высокопроизводительной технологии GLIDE, когда электромагнитный источник «Енисей» работает в движении. Обработка линий возбуждения с единичными воздействиями на каждой точке, как правило, не позволяет получить исходные записи приемлемого качества. Однако имеется возможность существенного повышения отношения сигнал/шум на первичных сейсмограммах в процессе их регистрации за счет накопления записей на базе 40-50 м. При этом возможен вариант скользящего накопления с сохранением исходного мелкого шага между точками возбуждения. При изрезанном рельефе местности или неоднородной ВЧР, во избежание потери высоких частот необходимо выполнять не обычное вертикальное суммирование исходных записей, а скользящее цифровое накопление с учетом статических сдвигов, рассчитанных по ФВК накапливаемых сейсмограмм.

Актуальность возбуждения упругих волн в движении

Переход наземной сейсморазведки на новый технологический уровень, продолжающийся в России и за рубежом уже более 10 лет [5], выразился, в первую очередь, в резком увеличении плотности трасс, регистрируемых на 1 кв.км съемки 3D. Если при стандартных исследованиях 3D плотность трасс составляла 100-150 тысяч на кв.км, то в последние годы при высокоплотных производственных съемках 3D в России достигаются показатели от 1 до 5-6 млн. трасс на кв.км, а за рубежом (на открытой местности на Аравийском полуострове и в северной части Африки) – до 40-60 млн. трасс на кв.км.

Поначалу для достижения высокой плотности трасс акцент был сделан на уплотнение пунктов приема (ПП), то есть на сокращение расстояний между линиями приема и ПП. Соответственно, для этой цели применялись мега-партии с 40–50 тысячами каналов, а в отдельных случаях – до 200 тысяч каналов. Однако, очень высокая стоимость регистрирующего оборудования в таких мега-партиях и большой объем ручного труда для

установки и переноски десятков тысяч каналов многократно повысили стоимость высокоплотных съемок 3D, что препятствовало их дальнейшему распространению.

С другой стороны, плотность трасс в сейсморазведке 3D можно увеличить и за счет уплотнения пунктов возбуждения (ПВ) со стандартных 50-55 ПВ до 400-500 ПВ и более на 1 кв.км, но по экономическим причинам это возможно только в невзрывной сейсморазведке с высокопроизводительными источниками упругих волн, такими как вибрационные и импульсные. В настоящее время вибрационные источники наиболее популярны во всем мире, и при работах 3D по высокопроизводительным методикам с перекрытием свип-сигналов во времени достигаются показатели в десятки тысяч виброточек в сутки при использовании 30-32 тяжелых одиночных вибраторов в одной мега-партии [5].

Наша компания отличается от других сейсморазведочных подрядчиков тем, что уже более 20 лет мы производим и предлагаем всё более мощные импульсные источники «Енисей» с излучателями электромагнитного принципа

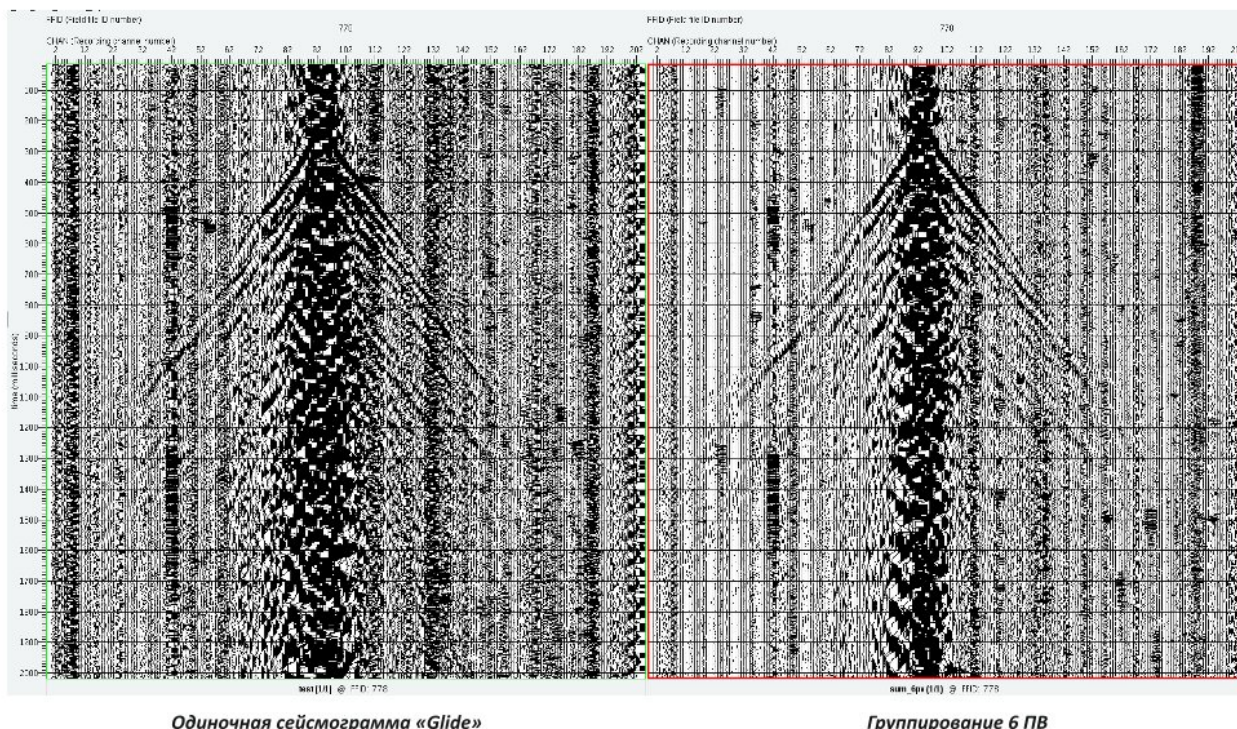
действия с обратным направлением движения инертной массы по отношению к возбуждаемой среде [3]. Для увеличения производительности работ с импульсными источниками В.А. Детковым много лет развивалась и активно пропагандировалась идея использовать источники «Енисей» в движении, со скоростью 2–3 км/час, что обеспечивает повышение производительности сейсморазведочных работ в 1,5–2 раза и позволяет превзойти показатели, достигаемые при отработке вибросейсмического профиля. Начиная с 2015 г. предприятием ООО «Эвенкиягеофизика», подразделением ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка», в Восточной Сибири было проведено несколько экспериментов, целью которых было подтверждение возможности применения движущегося источника на суше – по технологии, названной GLIDE [2]. Результаты опытно-методических работ (ОМР) показали перспективность высокопроизводительной технологии GLIDE для решения поисковых и разведочных задач методами 2D и 3D.

Отметим, что при высокоплотных работах 3D со сгущенной сетью ПВ, отрабатываемых высокопроизводительными источниками, сеть ПП может быть даже разрежена для улучшения экономики полевых работ. Например, ПП могут быть установлены по равномерной сетке 100 на 100 м по обеим координатам площади работ, что дает 100 ПП на 1 кв.км. Естественно, в таком случае для регистрации данных гораздо удобнее не традиционные кабельные системы, а легкие и компактные автономные бескабельные системы. Мы полагаем, что особенно эффективно в комплексе с технологией GLIDE может применяться первая отечественная нодальная система «Открытие» [1, 4], разработанная

нашей компанией и отличающаяся от всех других бескабельных систем, имеющих на рынке, использованием широкополосных и высокочувствительных молекулярно-электронных датчиков, выпускаемых российской компанией R-sensors.

Как известно, поверхностные источники – как вибрационные, так и импульсные – слабее скважинного взрывного источника, в связи с чем при невзрывной сейсморазведке обычно применялось и применяется накапливание или «вертикальное суммирование» от 4 до 8 или даже 16 повторных воздействий на одной и той же точке. Практика высокоплотной сейсморазведки 3D показала, что результаты обработки данных, полученных по стандартной методике, преследующей цель получить высококачественные исходные записи с большим шагом наблюдений, менее информативны, детальны и достоверны, чем результаты обработки данных, полученных с мелким шагом ПВ и без накапливания. Но с точки зрения супервайзеров существует проблема приемки исходных высокоплотных данных с низким отношением сигнал/шум (С/Ш), измеряемом как отношение амплитуд записи после первых вступлений к амплитудам до них. При сильном ветре такое отношение С/Ш может снижаться до значений 1–2 при однократных воздействиях импульсными источниками «Енисей», вместо значений 10 и более при традиционном накапливании от 8 до 12 воздействий этого же источника.

Очевидным выходом из этой проблемы является группирование (вертикальное суммирование) исходных сейсмограмм на базе 25 или 50 м (рис.1). Но результаты ОМР показали, что суммирование соседних сейсмограмм, без учета



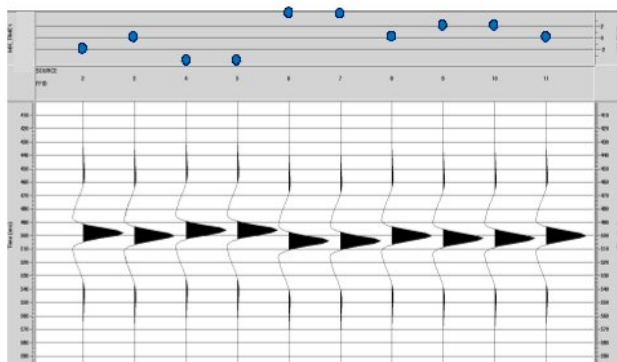
▲ Рис. 1. Сравнение одиночной сейсмограммы, полученной по технологии GLIDE, и результата группирования (суммирования) шести соседних ПВ. В отсутствие больших статических сдвигов обычное суммирование соседних сейсмограмм (непосредственно в процессе регистрации данных или на полевом ВЦ) позволяет резко снизить уровень случайных помех.

статических сдвигов между ними, хотя и повышает отношение С/Ш, особенно на низкочастотных глубоких горизонтах, одновременно ослабляет высокие частоты на более мелких целевых горизонтах и снижает разрешенность записи [2].

Здесь уместно вспомнить, что когда 15 лет назад компания Шлюмберже предложила использовать одиночные геофон-акселерометры (ГАК) с шагом 5 или 10 м вместо традиционных групп из 9–18 электродинамических сейсмоприемников с шагом ПП=50 м, исходные записи с ГАКАми были настолько зашумленными, что их не показывали Заказчику как исходный материал. Компанией Шлюмберже была разработана программа цифрового группирования соседних трасс (DGF = digital group forming) с расчетом и учетом статических сдвигов между суммируемыми трассами. Поз-

днее компания СЖЖ, также перешедшая на одиночные приемники при высокоплотных работах на Ближнем Востоке, разработала аналогичную по функциональности программу (DAF = digital array forming).

В случае технологии GLIDE естественно ожидать, что группирование (суммирование) соседних сейсмограмм – а еще лучше, их цифровое накапливание с учетом статических сдвигов – способно резко повысить отношение С/Ш на исходных данных, причем шаг ПВ по профилю необязательно увеличивать, если применять скользящее цифровое накапливание. Поскольку во время выполнения полевых работ статических поправок за ПП и ПВ еще нет, статические сдвиги между соседними сейсмограммами целесообразно рассчитывать с использованием функции взаимной корреляции (ФВК).

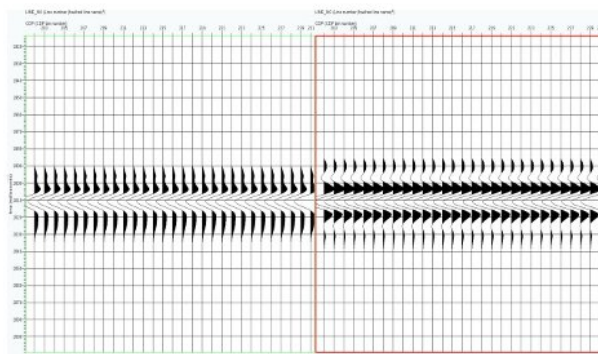


▲ Рис. 2. Функции взаимной корреляции соседних (ближайших) сейсмограмм по синтетическому профилю 2D. Наверху синими точками обозначены расчётные времена смещений максимумов ФВК, записанные в заголовки трасс.

Цифровое накапливание импульсных сейсмограмм – синтетический пример

Для оценки влияния случайных временных сдвигов на эффективность группирования (суммирования) сейсмограмм и их цифрового накапливания с учетом статических сдвигов мы использовали синтетические данные 2D, рассчитанные со следующими параметрами: шаг ПВ = 5 м, шаг ПП = 50 м, центральная активная расстановка из 121 канала, размер бина 25 м, и кратность суммирования 600. Синтетические сейсмограммы были получены с импульсами Рикера в частотном диапазоне от 20 до 80 Гц, частота дискретизации 2 мс.

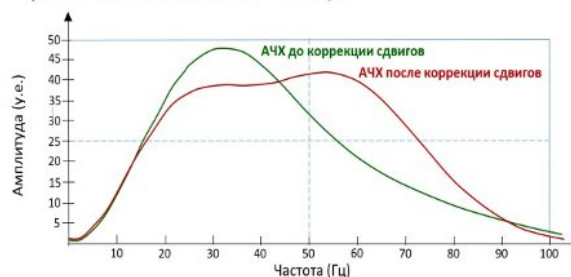
Моделирование случайных временных сдвигов для синтетических сейсмограмм было выполнено в диапазоне от -10 до +10 мс (шаг 1, 2, 5, 10 мс). Далее был выполнен расчет ФВК центральных сейсмотрасс соседних (ближайших) сейсмограмм по профилю 2D, и автоматически определены времена максимумов центра каждой ФВК. На рис.2 синими точками показаны расчетные времена смещений максимумов ФВК, занесенные в заголовки трасс. Рассчитанные нами



▲ Рис. 3. Фрагменты синтетических временных разрезов, полученных без учета (слева) и с учетом (справа) случайных сдвигов накапливаемых сейсмограмм. Интервал времен от 1920 до 2100 мс.

временные сдвиги, записанные в заголовки каждой сейсмограммы, были введены как статические поправки в синтетические данные 2D, и выполнено суммирование данных по ОГТ. В результате получены модельные временные сейсмические разрезы без учета статических сдвигов между суммируемыми сейсмограммами и с учетом этих сдвигов. На рис.3 мы видим существенные различия в форме импульса, отраженного от глубокого горизонта (на времени 2010 мс). Причиной этих различий слу-

▼ Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики записи на временных разрезах в интервале времен 1920-2100 мс (см. Рис.3). Зеленая кривая соответствует варианту «вертикального суммирования» (без учета статических сдвигов), а красная кривая – варианту «цифрового накапливания» (с учетом статических сдвигов, рассчитанных по ФВК)..



жит потеря высоких частот при обычном суммировании соседних сейсмограмм, без учета статических сдвигов. Соответствующие АЧХ показаны на рис.4.

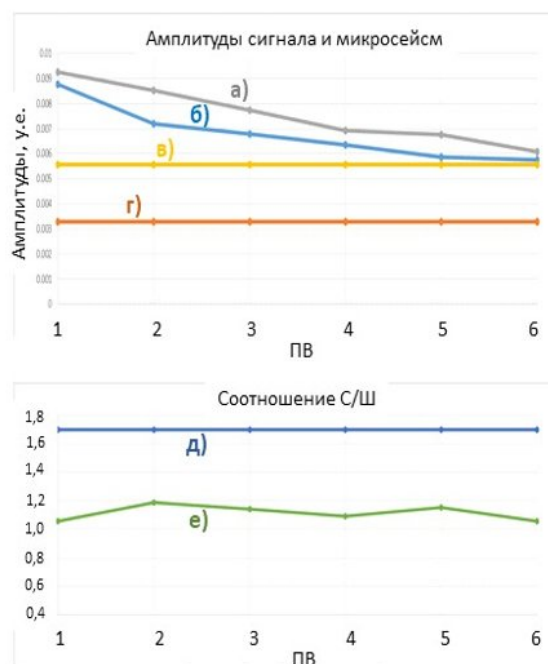
Результаты проделанного нами моделирования свидетельствуют о том, что случайные временные сдвиги между соседними сейсмограммами негативно влияют на качество временных разрезов. Опробованный нами расчет временных сдвигов с привлечением ФВК и определения времен максимумов центров ФВК на модельных данных дал положительный результат. Что касается реальных сейсмических данных, полученных с импульсными источниками «Енисей» при возбуждении упругих колебаний в движении, то необходим детальный анализ и, скорее всего, разработка дополнительных процедур для определения достоверных временных сдвигов между соседними сейсмограммами по достаточно большой группе трасс (не менее 10), чтобы осуществить успешное скользящее цифровое накопление.

- Рис. 5. Амплитуды записи после первых вступлений и до них для шести исходных суммируемых сейсмограмм и суммарной сейсмограммы (верхние графики) и отношения сигнал/шум для шести суммируемых сейсмограмм и суммарной сейсмограммы (нижние графики): а) амплитуды записи на шести исходных сейсмограммах в окне «сигнала» (после первых вступлений); б) амплитуды записи на шести исходных сейсмограммах в окне микросейсм (до первых вступлений); в) амплитуда в окне «сигнала» на суммарной сейсмограмме; г) амплитуда в окне микросейсм на суммарной сейсмограмме; д) отношение С/Ш на суммарной сейсмограмме; е) величины отношения С/Ш на шести исходных сейсмограммах.

Цифровое накопление импульсных сейсмограмм – полевые данные

Цифровое накопление было также опробовано нами на реальных полевых данных 2D, полученных по технологии GLIDE в Богучанском районе (Красноярский край) с максимальными расстояниями источник-приемник, равными 3000 м. Для исследования преимуществ цифрового накопления над обычным вертикальным суммированием сейсмограмм мы выбрали участок профиля с максимальным перепадом высот на базе 50 м, но этот перепад оказался не превышающим 3 м, и статические сдвиги шести соседних сейсмограмм оказались небольшими (среднеквадратическое значение равно 4 мс).

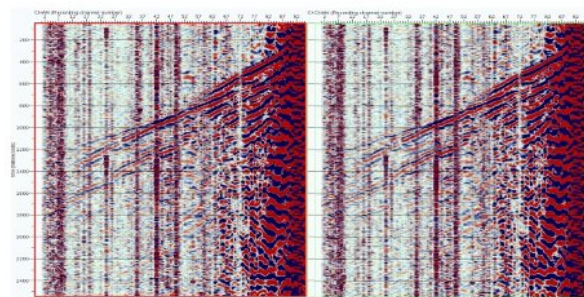
Как видно на рис.1, в условиях сильного ветра одиночные сейсмограммы, полученные по технологии GLIDE, характеризовались очень низким отношением С/Ш, и на них визуально не прослеживались полезные отраженные волны. Из-за очень высокого уровня микросейсм



амплитуды записи до и после первых вступлений на дальних трассах шести последовательных сейсмограмм (удаления 1500-3000 м) практически не отличались, и отношение С/Ш на исходных записях колебалось от 1,0 до 1,2 (рис.5). В то же время суммирование этих шести сейсмограмм (на базе 50 м) позволяет повысить отношение С/Ш до 1,7. Как мы видим на рис.1, амплитуда микросейсм закономерно снизилась при суммировании 6 ПВ, и в среднем она ниже, чем у одиночных воздействий источника «Енисей», более чем в 2 раза, что в свою очередь подтверждает правило: вертикальное суммирование давит случайный шум в $\sqrt{n}$ из количества суммируемых трасс или сейсмограмм.

Для повышения надежности расчета статических сдвигов между соседними сейсмограммами было выбрано 10 трасс в диапазоне средних удалений (1000-1600 м) и окно сигнала с наименьшими амплитудами нестационарных помех. Был выполнен расчет ФВК для 10 парных сейсмотрасс, а затем максимумы смещений ФВК были осреднены, и полученные значения занесены в заголовки трасс каждой исходной сейсмограммы. Далее полученные описанным образом статические поправки за ПВ использовались при цифровом накоплении сейсмограмм.

Из-за того, что рассчитанные по ФВК статические поправки за ПВ оказались небольшими, заметного повышения когерентности записи и улучшения прослеживания первых вступлений после цифрового накопления не было достигнуто, хотя «дребезг» первых вступлений и других регулярных волн визуально уменьшился (рис.6).



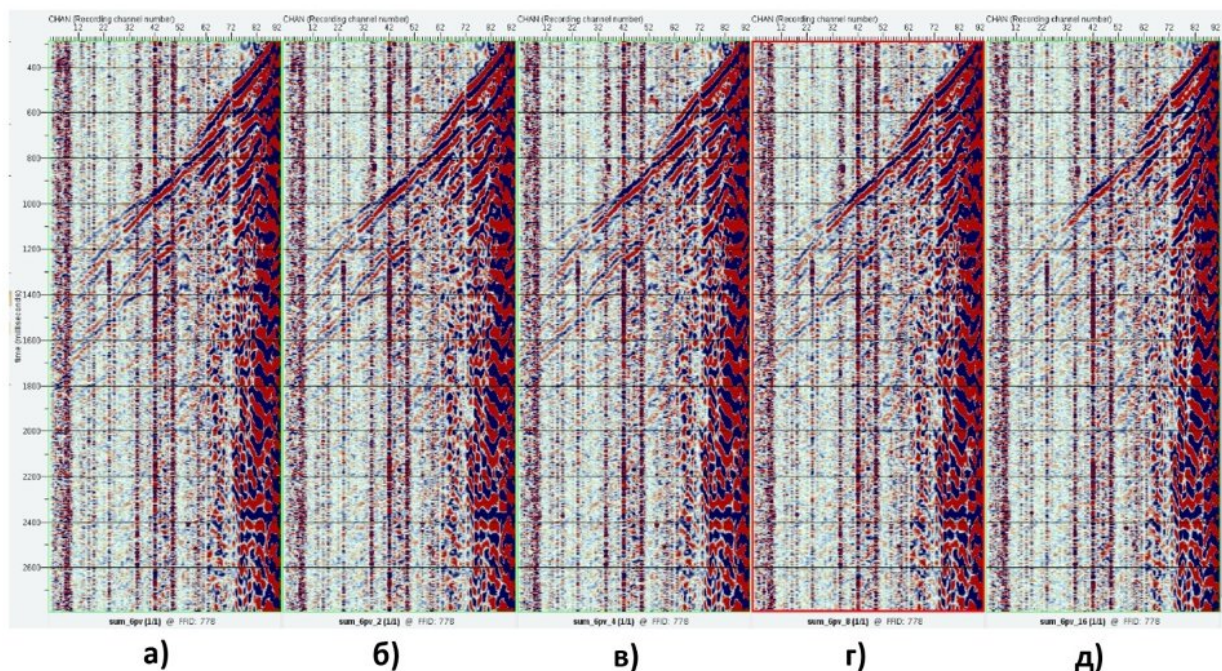
Обычное группирование 6 ПВ Цифровое накопление 6 ПВ

▲ Рис. 6. Сравнение результатов суммирования 6 последовательных ПВ: слева – обычное группирование (вертикальное суммирование), а справа – цифровое накопление с учетом статических поправок, рассчитанных по ФВК.

Чтобы проверить, при каких значениях статических поправок за ПВ регулярные волны начнут «разваливаться» – даже такие низкочастотные, как первые вступления – в те же 6 исследуемых сейсмограмм были четыре раза введены искусственные подвижки с увеличивающимися величинами (в мс):

-2	0	+2	0	-2	+2	(ср.-квадр. значение 1,63)
-4	0	+4	0	-4	+4	(ср.-квадр. значение 3,27)
-8	0	+8	0	-8	+8	(ср.-квадр. значение 6,53)
-16	0	+16	0	-16	+16	(ср.-квадр. значение 13,06)

Результаты суммирования исходных полевых сейсмограмм и четырех вариантов суммирования с разными уровнями искусственных подвижек показаны на рис.7. Первые вступления и другие низкочастотные регулярные волны начинают сильно ослабляться только при достаточно больших искусственных сдвигах со среднеквадратической величиной 13 мс. Но если бы на сейсмограммах были видны более высокочастотные отраженные волны, то нет сомнений, что они подверглись бы разрушительному влиянию несинфазного суммирования при искусственных сдвигах со среднеквадратическими величинами 4–6 мс.



▲ Рис. 7. Результаты группирования (суммирования) шести соседних сейсмограмм с различными искусственно привнесенными статическими сдвигами: а) без искусственных сдвигов; б) со сдвигами от -2 до +2 мс; в) со сдвигами от -4 до +4 мс; г) со сдвигами от -8 до +8 мс; д) со сдвигами от -16 до +16 мс.

Выводы и рекомендации

Данные, полученные с электромагнитным импульсным источником «Енисей» в движении (технология GLIDE), характеризуются низким отношением С/Ш на исходных сейсмограммах, как во всех случаях использования поверхностных сейсмических источников без накапливания. Однако, группирование (суммирование) 6-8 сейсмограмм на базе порядка 50 м может существенно снизить уровень регистрируемых микросейсм и примерно вдвое повысить отношение С/Ш. Такое суммирование не требует специального программного обеспечения и может выполняться непосредственно в процессе регистрации сейсмических данных или на полевом ВЦ в целях демонстрации потенциала технологии GLIDE. Скользящее суммирование исходных сейсмограмм позволит сохранить исходный мелкий шаг между ПВ.

Разумеется, для сохранения высоких частот на этапе обработки данных 2D и

3D, полученных по технологии GLIDE, следует выполнять не скользящее группирование (суммирование) сейсмограмм на базе 50 м, а их скользящее цифровое накапливание с учетом сдвигов, рассчитанных по ФБК выбранной группы трасс. Процедура цифрового накапливания позволит сохранить частотный состав зарегистрированных записей и получить высококачественные массивы высокоплотных данных.

Литература

1. Абдулвалиев М.Т., Тиссен А.П., Толкачев В.М., Череповский А.В., Первая отечественная нодальная бескабельная система «Открытие» с электронно-молекулярными датчиками. – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №3(66)/2020, С.46-53.
2. Детков В.А., Баландин П.В., Копылов М.А., Технология возбуждения упругих колебаний в движении GLIDE. – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №2(63)/2019, С.32-40.

3. Детков В.А., Бердюгин И.Н., Копылов М.А., Баландин П.В., Современные импульсные источники возбуждения сейсмических сигналов как перспектива замены вибрационных источников. – Совещание по привлечению предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России к изготовлению геологоразведочного оборудования, АО «Южморгеология», Геленджик, 26-27 сентября 2019 года.

4. Тиссен А.П., Результаты ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка» в развитии новых сейсморазведочных технологий. – Материалы геолого-геофизической конференции и выставки «Геоевразия-2020», Москва, 3–6 февраля 2020 г.

5. Череповский А.В., Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Издание второе, дополненное. – Москва, ЕАГЕ Геомодель, 2017, 252 с.

Подробнее об авторах



Федоров
Андрей Борисович
руководитель направления,
дирекция главного
геофизика ПАО «ГЕОТЕК
Сейсморазведка».
Окончил Тюменский
государственный нефте-
газовый университет
в 2006 г. по специаль-
ности «Геофизические
методы поисков и разведки
месторождений полезных
ископаемых».



Череповский
Анатолий Викторович
Главный специалист НТЦ,
ПАО «ГЕОТЕК
Сейсморазведка»,
канд. техн. наук.
Окончил геологический
факультет МГУ
им. Ломоносова
в 1980 г.
Автор и соавтор 38
научных публикаций
и докладов, двух
монографий по наземной
сейсморазведке
и англо-русского/
/русско-английского
словаря по прикладной
геофизике.