

Обработка виброграмм как способ повышения качества результатов высокопроизводительной вибросейсморазведки

Ю.Н. Долгих^{1*}, Д.В. Гуляев¹, В.В. Соколовский¹, В.И. Кузнецов^{1,2}

¹ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

В статье представлены результаты применения специализированной технологии обработки виброграмм, получаемых при проведении высокопроизводительных вибросейсмических исследований по методике «слип-свип» («slip-sweep»). Предпосылками внедрения этой технологии являются существование объективного запроса на высокопроизводительные способы сейсморазведки и физическая реализуемость, в современных условиях, регистрации и обработки данных с уровня исходных виброграмм. Показаны преимущества и недостатки вибросейсмического метода и его высокопроизводительных модификаций, дан краткий ретроспективный анализ темы обработки виброграмм до корреляции, обоснованы методические подходы к снижению технологической зашумленности вибросейсмической съемки «слип-свип», демонстрируются примеры повышения качества данных (на уровне как коррелограмм, так и суммарных разрезов) при различном количестве групп вибросейсмических источников. Сделан вывод, что обработка виброграмм при методике «слип-свип» обеспечивает повышение качества, сопоставимое как минимум с 1,5–2-ным ростом кратности съемки.

Ключевые слова: высокопроизводительная вибросейсморазведка, обработка виброграмм, повышение качества, коррелограммы, многозональная обработка, адаптивная обработка, «слип-свип» технология

Для цитирования: Долгих Ю.Н., Гуляев Д.В., Соколовский В.В., Кузнецов В.И. (2024). Обработка виброграмм как способ повышения качества результатов высокопроизводительной вибросейсморазведки. *Георесурсы*, 26(3), с. 27–32. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.4>

Актуальность высокопроизводительной вибросейсморазведки и проблема обеспечения качества работ

Нефтегазовые компании объективно заинтересованы в сокращении сроков геологоразведочных работ, что позволяет быстрее окупить вложенные в проект инвестиции, оптимизировать финансовые и временные издержки, особенно в настоящее время, в период экономической и геополитической турбулентности. Возможность на несколько лет быстрее ввести объект в эксплуатацию, за один полевой сезон собрать данные, необходимые для построения детальной геологической 3D-модели месторождения, является очень привлекательной для экономики проектов. Повышение производительности и информативности сейсмических исследований актуально не только для севера Западной Сибири, но и для других регионов России, характеризующихся высокой геологической изученностью (Екименко, 2008). Поэтому в отрасли существует запрос на технологии сейсморазведки, обеспечивающие возможность изучения больших по площади участков в короткие сроки. Высокопроизводительная вибросейсморазведка в полной мере отвечает на этот запрос, потенциал ее производительности кратно превышает возможности традиционной сейсморазведки с использованием взрывных источников (Смирнов, Бондарев, 2017).

Однако вибросейсмический метод имеет свои недостатки, или, сформулируем корректнее, свои особенности: заведомо неоптимальные условия возбуждения волн, повышенный уровень поверхностных регулярных помех, более высокий уровень случайных помех (вследствие слабости единичного воздействия), наличие технологических помех от перемещающейся техники и параллельных воздействий (для высокопроизводительных технологий), сильную зависимость качества результатов от специфики строения верхней части разреза (ВЧР) и поверхностных (ландшафтных) условий, ограниченность полосы частот возбуждаемого сигнала как со стороны низких частот (НЧ), так и высоких частот (ВЧ) вследствие особенностей конструкции вибратора и условий контакта плита – грунт.

Типичные для обширных территорий полуострова Ямал и Гыданского полуострова условия «арктической пустыни», тем не менее, благоприятствуют применению вибросейсмических технологий. На этих территориях зона малых и пониженных скоростей находится в вечной мерзлоте, что улучшает условия прохождения волн и сохраняет высокочастотные компоненты спектра, т.к. поглощение сейсмической энергии в мерзлых породах существенно ниже. Поэтому в северных районах Западной Сибири вибросейсмический метод в ряде случаев позволяет получать результаты, сопоставимые по качеству со взрывным методом (разумеется, при определенных технико-методических условиях). И как показывает опыт, запрос на высокопроизводительные вибросейсмические технологии сейчас достаточно высок.

Важным условием эффективного применения высокопроизводительных вибросейсмических технологий

* Ответственный автор: Юрий Николаевич Долгих
e-mail: yndolgikh@novatek.ru

© 2024 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

является обеспечение качества результата. Повышенная производительность не должна быть основанием для необоснованного снижения критериев качества исходных сейсмограмм. Желательно, чтобы высокий потенциал плотности и кратности системы был не только средством компенсации технологической зашумленности полевых данных, но и предпосылкой для достижения более высокой информативности (разрешенности, динамической выразительности, отношения сигнал/помеха и др.)

К сожалению, у высокопроизводительных технологий имеется существенный недостаток – повышенный уровень случайных, квазислучайных и технологических помех (от движущейся техники и/или «параллельных» воздействий). Методические возможности подавления этих помех за счет увеличения статистического эффекта (кратности) системы наблюдений ограничены. Кроме того, чисто статистический подход не позволяет реализовать в полной мере потенциал высокоплотной съемки. Ослабляя помехи за счет увеличения кратности, мы фактически расходуем потенциал высокочастотной системы на сохранение приемлемого качества на уровне традиционных вибросейсмических съемок. Значимого повышения информативности (точности, детальности, динамической выразительности) результатов обработки при этом не происходит. Следовательно, помимо увеличения кратности необходимо повысить и качество исходных коррелограмм (КГ), однако единственным резервом повышения качества КГ (при прочих равных условиях) является обработка до корреляции, т.е. обработка виброграмм (ВГ). И в настоящее время благодаря общей тенденции к быстрому развитию и удешевлению вычислительных средств и носителей информации появилась возможность сохранения и передачи на этап обработки всего исходного массива данных, т.е. не только КГ, но и ВГ.

Первые попытки повышения качества результатов за счет обработки виброграмм до корреляции были предприняты на Западе и в СССР еще в 80-е годы XX в. (Coruh, Costain, 1983; Череповский, Бадейкин, 1988). Однако завершённой технологии в тот период создано не было, не в последнюю очередь из-за ограничений в вычислительных мощностях и в средствах хранения информации.

В связи с развитием высокопроизводительных вибросейсмических технологий уже в XXI в. западными сервисными компаниями разработаны методические подходы к подавлению определенного класса технологических помех до корреляции. Однако эти подходы обеспечивали лишь частичное решение проблемы, при этом по стоимости существенно превышали затраты на стандартную обработку материалов. Основанной на ясной теоретической концепции технологии подавления широкого класса природных и технологических помех (случайных, квазислучайных, регулярных) до корреляции виброграмм в мировой практике до недавнего времени не существовало.

Обработка виброграмм до корреляции – перспективное направление повышения качества данных

Необходимые для разработки технологии обработки виброграмм исходные данные получены в процессе выполнения опытно-методических работ (ОМР) МОВ-ОГТ 2D в полевых сезонах 2017–18 и 2018–19 гг. на ряде лицензионных участках Группы компаний ПАО «НОВАТЭК».

Информация об основных результатах исследовательских работ по обработке полученных материалов опубликована в (Долгих и др., 2019; Dolgikh et al., 2019a, 2019b).

В настоящее время в НОВАТЭК НТЦ апробирован и внедрен целый ряд методических приемов обработки виброграмм, предложенная технология получила общее название «многозональная адаптивная обработка виброграмм» (МАОВ).

Постановка вопроса о целесообразности обработки виброграмм до корреляции совершенно логична и имеет однозначное научно-теоретическое обоснование (из области теории информации, теории интерференционных систем). Если исключить значительную часть технологических и иных помех из наблюдаемого волнового поля ВГ до корреляции (рис. 1, верхний ряд), то это обеспечит условия для более эффективной селекции полезного сигнала по итогам выполнения корреляции – на уровне итоговых КГ (рис. 1, нижний ряд). Логическим следствием повышения отношения сигнал/помеха исходных КГ является более высокое (при прочих равных условиях) отношение сигнал/помеха (качество) итоговых результатов обработки.

Граф обработки ВГ представляет собой набор общеизвестных процедур, ориентированных на подавление наиболее интенсивных случайных, регулярных и технологических помех, а также на корректировку наиболее значимых искажений спектра и динамики сейсмического волнового поля.

Поскольку вибросейсмический сигнал представляет собой меняющуюся во времени частотную развертку, важным свойством технологии обработки виброграмм является возможность адаптации параметров обрабатываемых процедур по времени и/или частоте. Отдельные процедуры (в частности, направленные на подавление корреляционных помех от пересекающихся по времени воздействий) могут быть реализованы с помощью разделения сейсмического волнового поля на частотные зоны (панели).

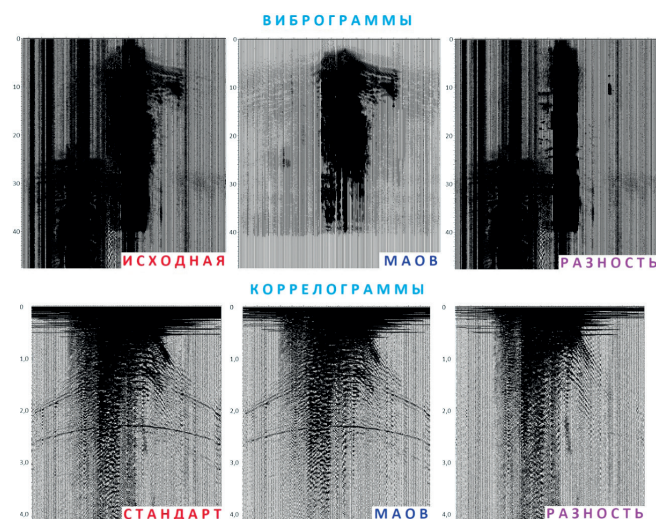


Рис. 1. Демонстрация эффектов от подавления волн помех по виброграммам до корреляции (технология многозональной адаптивной обработки виброграмм – МАОВ) на уровне виброграммы (верхний ряд) и коррелограммы (нижний ряд) («слип-свит» с использованием 3–4 групп виброисточников)

Принципиальная схема реализации технологии МАОВ (для «слип-сви́п»).

1. Весь рабочий спектр сейсмических сигналов, включающий в себя интервал частот развертки сви́п-сигнала, разбивается посредством полосовой ($F1-F2-F3-F4$) частотной фильтрации на узкие частотные диапазоны (панели) по критерию постоянного затухания, т.е. постоянства отношения ширины спектра к центральной частоте. Количество частотных полос определяется величиной коэффициента затухания, его увеличение приводит к уменьшению числа полос, а уменьшение – к увеличению. Кроме того, следует учитывать вычислительные мощности, т.к. связь между числом полос и временем обработки линейная. Фильтрация относится к числу времязатратных процедур. На основе сформированного ряда центральных частот рассчитывается серия перекрывающихся полосовых фильтров, объединение (суммирование) результатов применения которых обеспечивает восстановление исходного сигнала без искажения частотного спектра.

2. В каждой панели к узкополосной виброграмме применяется верхний и нижний мьютинг по следующему правилу: время верхнего мьютинга соответствует времени развертки сви́п-сигнала на частоте $F1$, а время нижнего мьютинга – времени развертки на частоте $F4$, а также принимается в расчет длина формируемых КГ.

Принцип подавления помех применением верхнего и нижнего мьютинга к узкополосным виброграммам иллюстрирует рис. 2.

3. После проведенной селекции полезного сигнала узкополосные виброграммы объединяются с целью получения широкополосных виброграмм.

4. К широкополосным ВГ применяются процедуры поверхностно-согласованного подавления случайных и квазислучайных помех во временной и частотной областях.

В спектрально-временной области реализация приемов 1–3 обеспечивает «хирургическую» селекцию 1-й (базовой) гармоники сигнала (рис. 3). Все остальные гармоники как основного, так и последующего во времени воздействий будут обнуляться. Будут также ослаблены любые другие квазислучайные помехи (от поездов, от растрескивания мерзлоты), если они окажутся внутри области обнуления.

На системной основе технология МАОВ применяется на объектах НОВАТЭК с 2020 г. Полученные результаты свидетельствуют о повышении их качества и разрешающей способности. При этом особенно значительный эффект отмечен при работе по технологии «слип-сви́п» с минимизированным слип-таймом, т.е. когда слип-тайм приближен к длине формируемых коррелограмм (рис. 4–6).

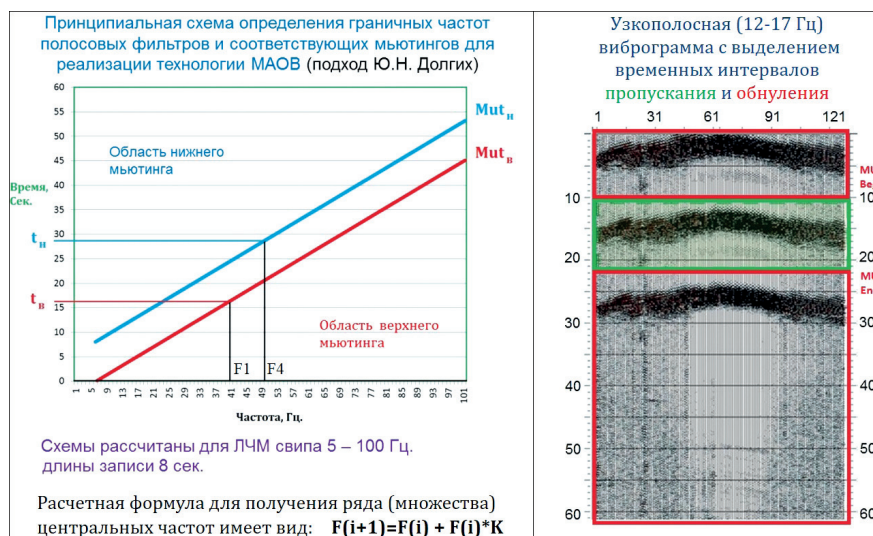


Рис. 2. Принцип подавления технологических помех применением мьютингов к узкополосным виброграммам (OMP 2D, моделирование воздействий ± 10 с от основного)

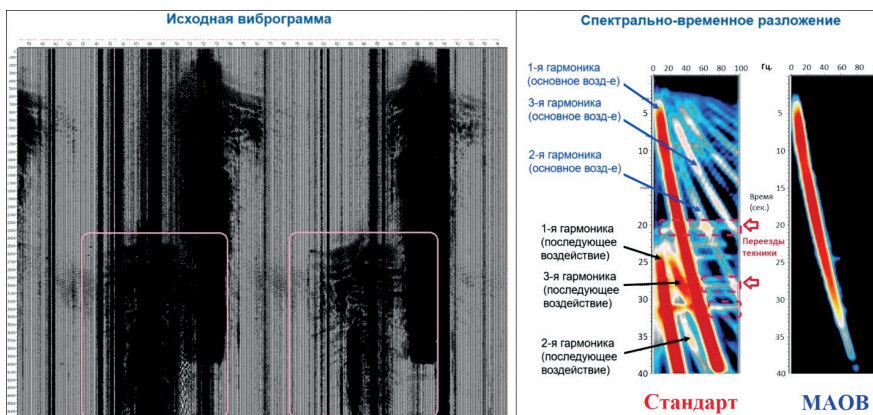


Рис. 3. Фрагмент типичной виброграммы «слип-сви́п» со следом от последующего во времени воздействия (слева) и спектрально-временные представления (справа), демонстрирующие эффект МАОВ («слип-сви́п» с использованием 3–4 групп виброисточников)

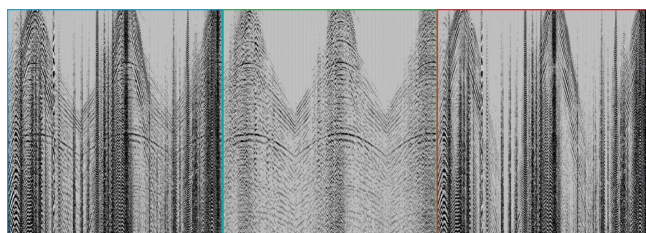


Рис. 4. Демонстрация эффекта от подавления помех по виброграмме на уровне коррелограммы («слип-сви́п» с использованием 7–8 групп виброисточников). Слева: исходная коррелограмма без применения МАОВ; центр: коррелограмма с применением МАОВ; справа: помехи, исключенные из коррелограммы за счет МАОВ

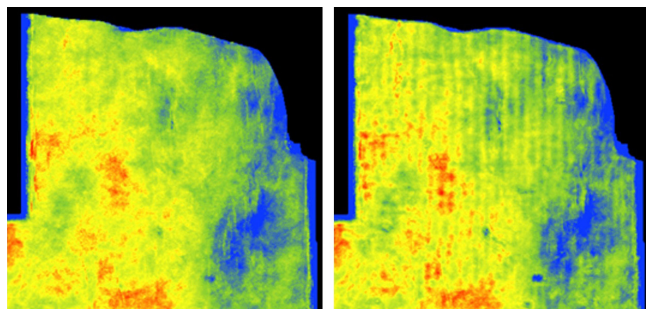


Рис. 5. Сопоставление карт RMS-амплитуд фрагмента окончательного куба 3D по ОГ Б после обработки с применением технологии МАОВ (слева) и без использования технологии (справа) («слип-сви́п» с использованием 7–8 групп виброисточников)

В технологию МАОВ заложено теоретически обоснованное применение процедур подавления случайных и квазислучайных помех на уровне как ВГ, так и КГ. Только в первом случае (на уровне ВГ) подавляются непосредственно сами помехи в сейсмическом волновом поле, а во втором случае (на уровне КГ) устраняются остаточные, посткорреляционные искажения волнового поля, обусловленные данными помехами. Сочетание внутренних мьютингов в узких частотных диапазонах с процедурами шумоподавления на уровне ВГ и КГ дает в совокупности необходимый синергетический эффект, который выражается в повышении как отношения сигнал/помеха, так и разрешающей способности результатов обработки (рис. 7, 8).

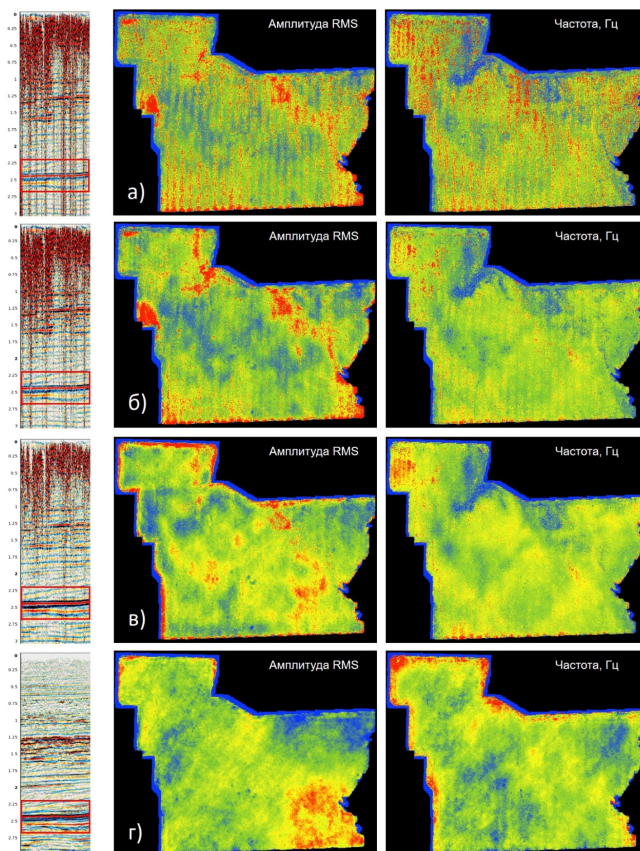


Рис. 6. Демонстрация последовательного ослабления искажений амплитуд и частот, обусловленных технологией обработки («слип-сви́п» с использованием 7–8 групп виброисточников): а) исходные данные; б) МАОВ; в) МАОВ + амплитудные поправки; г) МАОВ + амплитудные поправки + сигнальная обработка

Заключение

Технология МАОВ позволяет значительно ослабить взаимные влияния, амплитудные искажения, разного рода помехи от групп виброисточников, а также снизить общий уровень зашумленности съемки.

При прочих равных условиях обработка, начиная с уровня исходных виброграмм, обеспечивает значимое повышение общего отношения сигнал/помеха

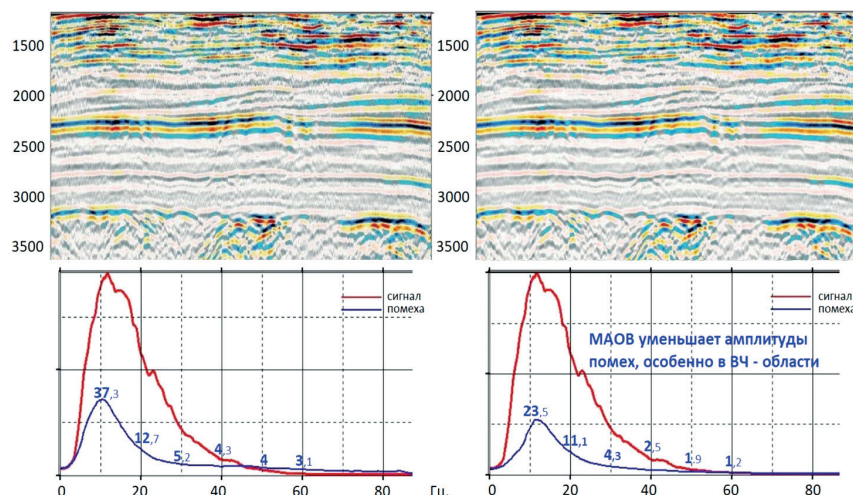


Рис. 7. Сопоставление временных разрезов и соответствующих им спектров сигнала и помехи: до (слева) и после (справа) применения технологии МАОВ («слип-сви́п» с использованием 3–4 групп виброисточников)

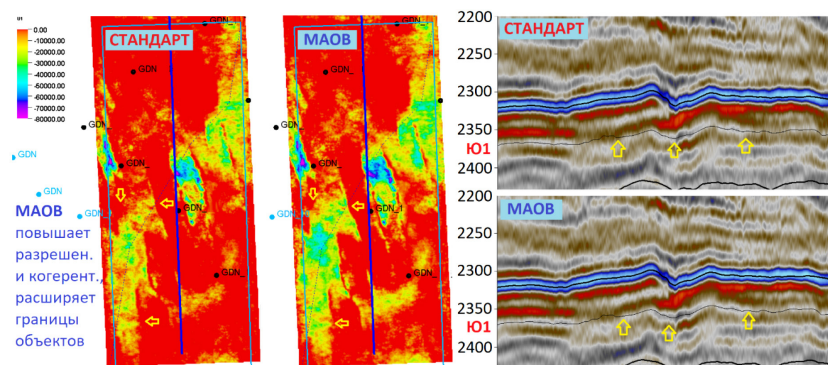


Рис. 8. Сравнение карт отрицательных амплитуд и фрагментов частично-кратных временных разрезов в диапазоне удалений 1200–2300 м) в интервале прослеживания пласта Ю₁ («слип-свип» с использованием 3–4 групп виброисточников)

окончательных результатов обработки при некотором увеличении общей разрешающей способности.

Полученный с помощью обработки виброграмм повышенный потенциал качества исходных коррелограмм создает предпосылки для дополнительного расширения спектра конечных результатов при сохранении приемлемого общего отношения сигнал/помеха.

За счет применения МАОВ обеспечивается повышение качества результатов обработки, по эффекту сопоставимое с увеличением кратности системы наблюдений в 1,5–2 раза, что особенно актуально для площадей с повышенным уровнем техногенных помех.

Благодарности

Авторы признательны научным сотрудникам лаборатории систематизации и обработки геофизических материалов АУ «НАЦ РН им В.И. Шпильмана» Е.П. Кайгородову, О.В. Киселёву и Е.В. Савенкову за их творческий вклад в научно-технические результаты исследований.

Литература

Долгих Ю.Н., Кайгородов Е.П., Глебов А.А. (2019). Многозональная адаптивная обработка виброграмм как перспективное направление повышения качества и информативности современной сейсморазведки. *Современные технологии нефтегазовой геофизики: Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф.* Тюмень: ТИУ. с. 33–39.

Екименко В.А. (2008). Сейсморазведка – основной метод поиска и разведки нефтяных залежей. *Георесурсы*, 4(27), с. 14–16.

Смирнов В.Н., Бондарев Е.Б. (2017). Современное состояние, возможности и недостатки комплекса вибросейс NOMAD по сравнению с взрывным источником сейсмических колебаний в зимних условиях ЯНАО. *Технологии сейсморазведки*, (2), с. 108–122. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2017-2-108-122>

Череповский А.В., Бадейкин А.Н. (1988). Роль регулировки амплитуд при кинематической обработке вибрационной сейсморазведки. *Разведочная геофизика. Отечественный производственный опыт: Сб. ст.* М.: ВИЭМС, Вып. 10, с. 1–4.

Dolgikh Y., Kaygorodov E., Glebov A. (2019a). Polyzonal Adaptive of Processing Vibrogram as a Promising Way to Improve the Quality and Informativeness of Modern Seismic. *Progress'19, EAGE*, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201953025>

Dolgikh Y., Kaygorodov E., Glebov A. (2019b). Results and Prospects of Some Methodical Approaches to Process Vibrogram. *Tyumen, EAGE*, 2019, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900571>

Coruh C., Costain J.K. (1983). Noise attenuation by Vibroseis whitening (VSW) processing. *Geophysics*, 48(5), pp. 543–554. <https://doi.org/10.1190/1.1441485>

Сведения об авторах

Юрий Николаевич Долгих – доктор геол.-минерал. наук, ученый секретарь, ООО «НОВАТЭК НТЦ»
Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: YNDolgikh@novatek.ru

Денис Владимирович Гуляев – заместитель начальника отдела стандартной и специализированной обработки, ООО «НОВАТЭК НТЦ»
Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: Denis.Gulyaev@novatek.ru

Владимир Владиславович Соколовский – главный технолог проекта, ООО «НОВАТЭК НТЦ»
Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: Vladimir.Sokolovskiy@novatek.ru

Владислав Иванович Кузнецов – доктор геол.-минерал. наук, старший эксперт отдела полевых сейсморазведочных работ, ООО «НОВАТЭК НТЦ»
Россия, 625031, Тюмень, ул. Пожарных и спасателей, д. 7
e-mail: vikuznetsov@novatek.ru

Статья поступила в редакцию 12.07.2024;
Принята к публикации 22.08.2024;
Опубликована 30.09.2024

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Processing Vibrograms as a Way to Improve the Quality of High-Performance Vibroseismic Survey Results

Yu.N. Dolgikh^{1*}, D.V. Gulyaev¹, V.V. Sokolovskiy¹, V.I. Kuznetsov^{1,2}

¹NOVATEK NTC, Tyumen, Russian Federation

²Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

*Corresponding author: Yuri N. Dolgikh, e-mail: yndolgikh@novatek.ru

Abstract. The article outlines the prerequisites and results of using a specialized technology for processing vibrograms obtained during high-performance vibroseismic studies using the “slip-sweep” technology. The goal is to reveal the potential and advantages of multispectral adaptive data processing, mainly associated with improving the quality and information content of the results obtained. The prerequisites for the introduction of technology are the existence of an objective demand for high-performance seismic exploration methods and the physical feasibility, in modern conditions, of recording and processing data from the level of initial vibrograms. The work describes the advantages and disadvantages of the vibroseismic method and its high-performance modifications, provides a brief retrospective analysis of the topic of processing vibrograms before correlation, substantiates specific methodological approaches to reducing the technological noise of vibroseismic “slip-sweep” surveys, demonstrates specific examples of improving data quality (both at the level of correlograms, and at the level of total sections) with different numbers of groups of vibroseismic sources. The main conclusion is that processing vibrograms using the “slip-sweep” method provides an increase in quality comparable to at least a one and a half to twofold increase in the shooting magnification.

Keywords: high-performance vibroseismic survey, vibrogram processing, correlograms, multizonal processing, adaptive processing, “slip-sweep” technology

Recommended citation: Dolgikh Yu.N., Gulyaev D.V., Sokolovsky V.V., Kuznetsov V.I. (2024). Processing Vibrograms as a Way to Improve the Quality of High-Performance Vibroseismic Survey Results. *Georesursy = Georesources*, 26(3), pp. 27–32. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.4>

Acknowledgements

The authors are grateful to the research staff of the laboratory for systematization and processing of geophysical materials of the V.I. Shpilman Research and Analytical Centre E.P. Kaygorodov, O.V. Kiselev and E.V. Savenkov for their creative contribution to scientific and technical research results.

References

Cherepovsky A.V., Badeykin A.N. (1988). The role of amplitude adjustment in kinematic processing of vibration seismic exploration. Express information of VIEMS. *Exploration geophysics. Domestic production experience: Coll. papers*, 10, pp. 1–4. (In Russ.)

Coruh C., Costain J.K. (1983). Noise attenuation by Vibroseis whitening (VSW) processing. *Geophysics*, 48(5), pp. 543–554. <https://doi.org/10.1190/1.1441485>

Dolgikh Y., Kaygorodov E., Glebov A. (2019a). Polyzonal Adaptive of Processing Vibrogram as a Promising Way to Improve the Quality and Informativeness of Modern Seismic. *Progress '19, EAGE*, pp. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201953025>

Dolgikh Y., Kaygorodov E., Glebov A. (2019b). Results and Prospects of Some Methodical Approaches to Process Vibrogram. Tyumen, *EAGE*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900571>

Dolgikh Yu.N., Kaigorodov E.P., Glebov A.A. (2019c). Results and prospects for the application of some methodological approaches to the processing of vibrograms. Tyumen, *EAGE*. (In Russ.) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900571>

Ekimenko V.A. (2008). Seismic prospecting – the principal oil exploration method. *Georesursy = Georesources*, 4(27), pp. 14–16. (In Russ.)

Smirnov V.N., Bondarev Ye.B. (2017). Current state, capabilities and disadvantages of the NOMAD vibroseis complex in comparison with an explosive source of seismic vibrations in the winter conditions of the YNAO. *Technologii seysmorazvedki*, 2, pp. 108–122. (In Russ.)

About the Authors

Yuri N. Dolgikh – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Scientific Secretary
NOVATEK NTC
7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation
e-mail: YNDolgikh@novatek.ru

Denis V. Gulyaev – Deputy Head of the Standard and Specialized Processing Department
NOVATEK NTC
7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation
e-mail: Denis.Gulyaev@novatek.ru

Vladimir V. Sokolovsky – Chief Technologist of the Project
NOVATEK NTC
7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation
e-mail: Vladimir.Sokolovskiy@novatek.ru

Vladislav I. Kuznetsov – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Expert of the Field Seismic Exploration Department
NOVATEK NTC
7, Pozharnykh i spasateley st., Tyumen, 625031, Russian Federation
e-mail: vikuznetsov@novatek.ru

Manuscript received 12 July 2024;

Accepted 22 August 2024;

Published 30 September 2024