

Некоторые алгоритмы подавления регулярных волн в инженерной сейсморазведке.

- Романов В.В., РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Латышев К.А., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.

Аннотация: Статья посвящена анализу коррелируемой помеховой компоненты записей инженерной сейсморазведки и адаптивным стохастическим алгоритмам её подавления.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, адаптивная фильтрация.

Введение

При выполнении инженерной сейсморазведки полезные волны прослеживаются на фоне интенсивных регулярных и случайных помех. Если случайные помехи (шум) подавляются путём накопления и вычитания реализаций при препроцессинге, то регулярные волны-помехи удаётся ослабить только на стадии основной обработки. Среди них — поверхностные и кратные волны, преломлённые и обменные волны, боковые волны от сторонних источников, волны-спутники самого разнообразного генезиса [Романов и др., 2015]. Все они наблюдаются на сейсмограммах инженерной сейсморазведки, степень их подавления — одна из главных составляющих качества получаемых сейсмических разрезов. Возможность эффективного ослабления помех определяется как амплитудной разрешённостью исходных сейсмограмм (отношением сигнал/помеха), так и различием полезных и мешающих волн по спектральному составу и скорости. В работе рассмотрен опыт реализации в ПО SeisShall [Романов, 2016] некоторых, наиболее эффективных алгоритмов, применяемых для подавления регулярных волн на сейсмограммах.

Неоптимальная фильтрация

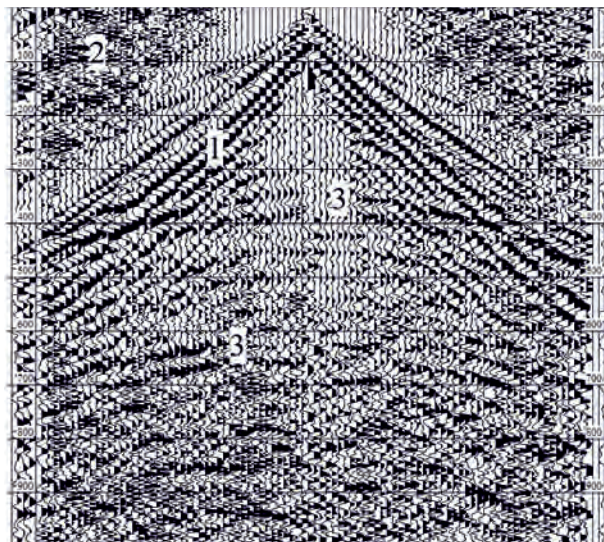
До обработки уровень мешающих регулярных волн и шума достаточно

велик, полезные волны на их фоне прослеживаются неустойчиво. На рисунке 1 приведена сейсмограмма МОВ–ОСТ, где представлены основные виды помех, затрудняющих выделение полезных отражений [Белоусов, Сергеев, 2015]. Если их уровень останется высоким до суммирования, то итоговые разрезы будут содержать большое количество ложных аномалий (артефактов) — локальных и протяжённых [Санфиров и др., 2019].

Для подавления регулярных помех применяется алгоритмы, которые основаны на изменении спектра сейсмической записи, то есть фильтрации. Определению количественных спектрально-частотных характеристик полезных и

▼ *Рис. 1. Структура типичной сейсмограммы в инженерной сейсморазведке.*

1 — поверхностные волны, 2 — шум, 3 — полезные отражения.



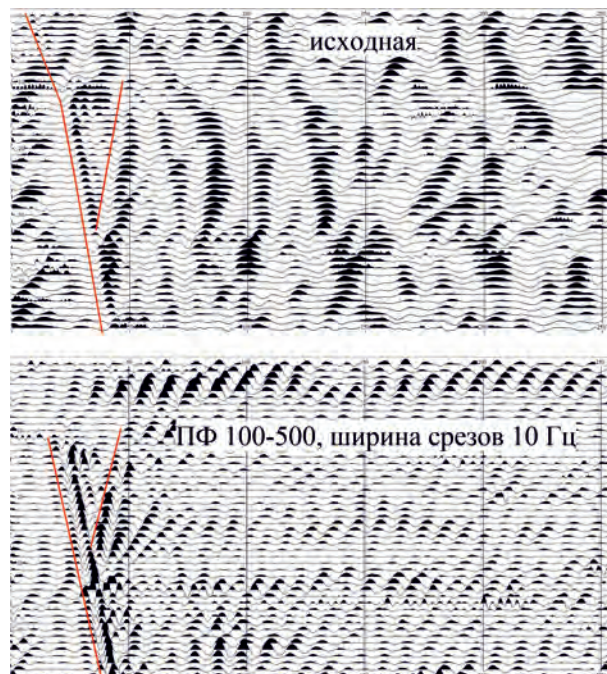
мешающих волн, знание которых необходимо для выбора и проектирования фильтров, мешает принципиальная невозможность выделить составляющие волнового поля “в чистом виде”. Спектры компонент сейсмограмм перекрываются, поэтому идеального единственного решения у задачи фильтрации нет.

В самом простом случае тип и частотную характеристику фильтра обработчик выбирает вручную, ориентируясь на спектры трасс сейсмограммы и анализируя результат обработки.

Это одноканальные цифровые фильтры верхних и нижних частот, полосовые и полосно-заграждающие фильтры с нулевой фазово-частотной характеристикой. Так как формирование частотной характеристики происходит до начала фильтрации и не учитывает изменение спектров сигнала и помехи, все эти фильтры относятся к категории неоптимальных. Наиболее востребованным алгоритмом в этом классе фильтров является полосовая фильтрация. Эта устойчивая процедура, входящая в стандартный граф обработки данных сейсморазведки. Но зачастую для существенного подавления регулярных помех её недостаточно.

На рисунке 2 показана сейсмограмма ВСП после полосовой фильтрации (90–100–500–510 Гц), коррелируемые низкочастотные помехи в области первых и последующих вступлений были существенно ослаблены, но увеличилась длина импульса полезных волн, а интервале глубин 0–10 м была ослаблена прямая волна.

Пример показывает, что в условиях, когда форма сигнала полезных волн и помех значительно меняется в пределах сейсмической записи, использование фильтров с постоянной частотной характеристикой неэффективно.



▲ Рис. 2. Подавление коррелируемых волн и шума на сейсмограмме ВСП. Линиями выделены вертикальные годографы прямой и отражённых волн.

Оптимальная фильтрация

Если спектры или корреляционные функции сигналов известны (детерминистский подход) или найдены по сейсмограммам (стохастический подход), то частотная характеристика фильтра определяется автоматически, подстраиваясь под изменение свойств компонент сейсмического поля. Для создания характеристик формулируются критерии, с точки зрения которых фильтр будет оптимальным. Алгоритмы, в которых характеристика не выбирается обработчиком, а вычисляется по оценкам спектров сигнала и помехи, называются оптимальными (адаптивными) фильтрами. Востребованными стохастическими алгоритмами, когда спектр сигнала оценивается по автокорреляционным функциям трасс сейсмограмм, а помеха считается некоррелируемым шумом.

Наиболее употребимым в обработке данных инженерной сейсморазведки является минимально-фазовая предсказывающая деконволюция [Ярославцев,

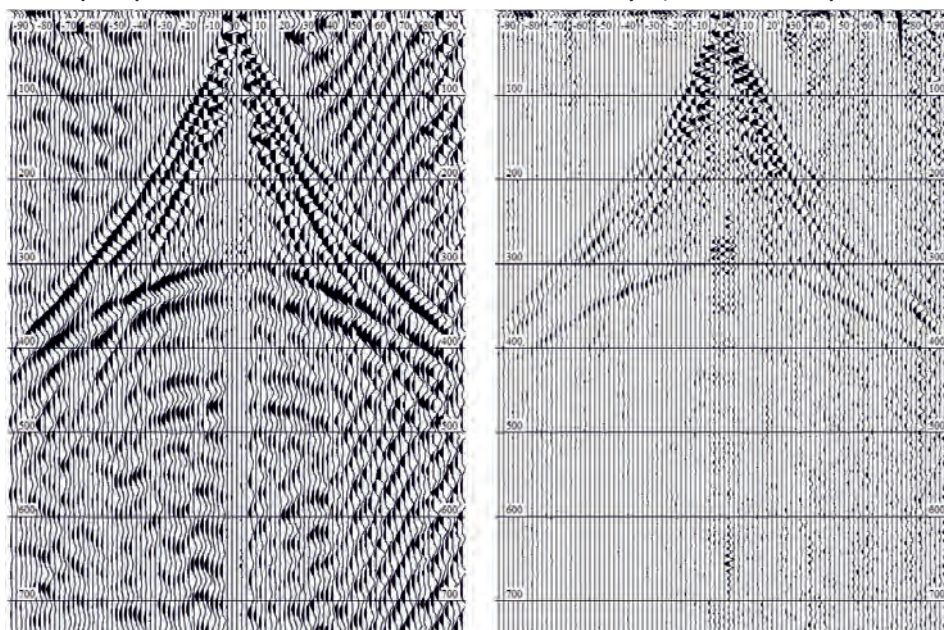
Жикин, 2012], одна из разновидностей обратной стохастической фильтрации. Критерием оптимальности для обратной фильтрации служит минимальное отклонение обработанных сигналов от дельта-импульса (Кронекера), фактически обратная фильтрация реализует уменьшение длины импульсов волн. Она основывается на минимально-фазовой модели сигнала, что позволяет вычислить оператор фильтра только по матрице АКФ сейсмической трассы. Из исходного сигнала вычитаются отсчёты, предсказанные на целое количество шагов дискретизации вперёд — интервал предсказания. Оценка АКФ выполняется по отдельным трассам, по осреднённой трассе сейсмограммы или её части [Романов и др., 2022]. В обработке данных МОВ-ОГТ деконволюция применяется как к сейсмограммам до суммирования (Рисунок 3) и временным разрезам (Рисунок 4). Так как в результате суммирования доминируют полезные отражённые волны, предпочтительней выполнять обратную фильтрацию именно разрезам. Использование обратной фильтрации позволяет увеличить ширину полосы спектра полезных волн и повысить вертикальное разрешение

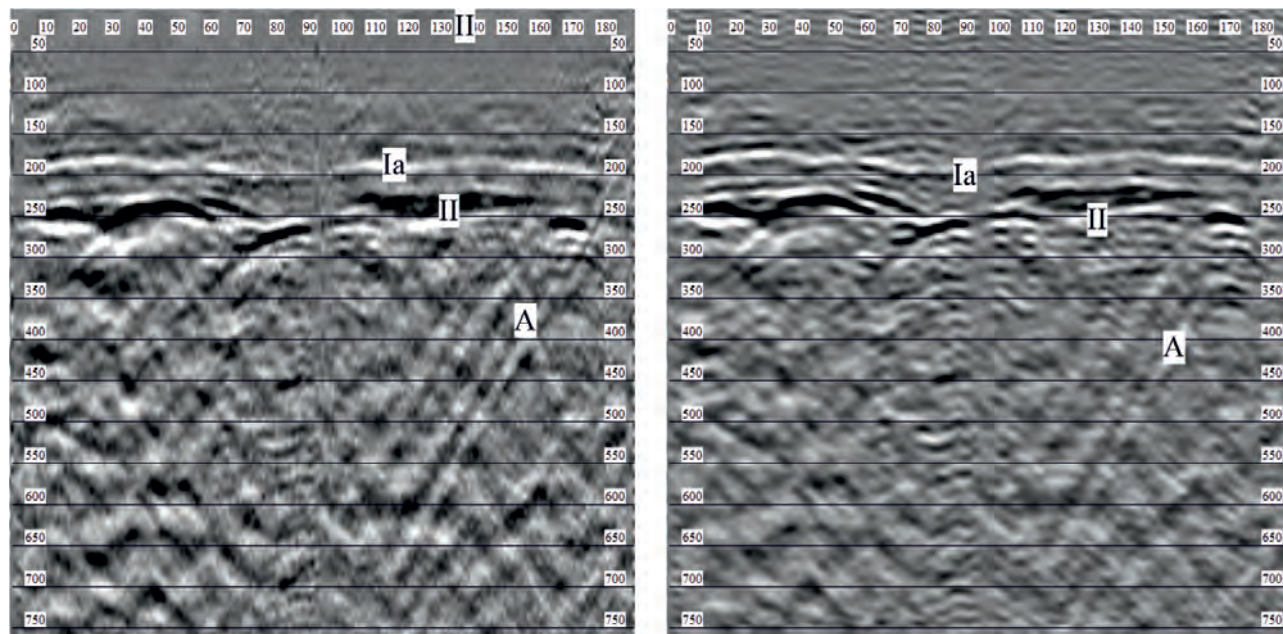
сейсмограмм и разрезов, уменьшить протяжённость колебаний боковых волн. Отрицательный эффект деконволюции заключается в возрастании уровня белого шума, поэтому после неё дополнительно выполняется полосовая фильтрация. Для повышения помехоустойчивости деконволюции задаётся стабилизирующий коэффициент, с ростом которого падает доля шума в результате обработки, но уменьшается и полезный эффект фильтрации. Оптимальные значения стабилизирующего коэффициента — 10–20 %.

Большее развитие получили алгоритмы адаптивного вычитания помех, основанные на вычислении разности исходного поля и оценки его мешающей аддитивной компоненты [Денисов, 2020]. Прогноз помеховой составляющей основывается на результате статистической обработки исходных сейсмограмм или моделирования. Среди них — вычитание среднего или медианы сейсмограммы, кратных волн, вычитание скоростей. В известной мере к адаптивному вычитанию относится и предсказывающая деконволюция.

Алгоритм вычитания плоских волн с постоянными кажущимися скоростями

► Рис. 3. Применение деконволюции к суперсейсмограмме. Слева — исходная сейсмограмма, справа — после обратной фильтрации. Длина оператора фильтра 120 мс, интервал предсказания 1 мс, стабилизирующий коэффициент 15 %.





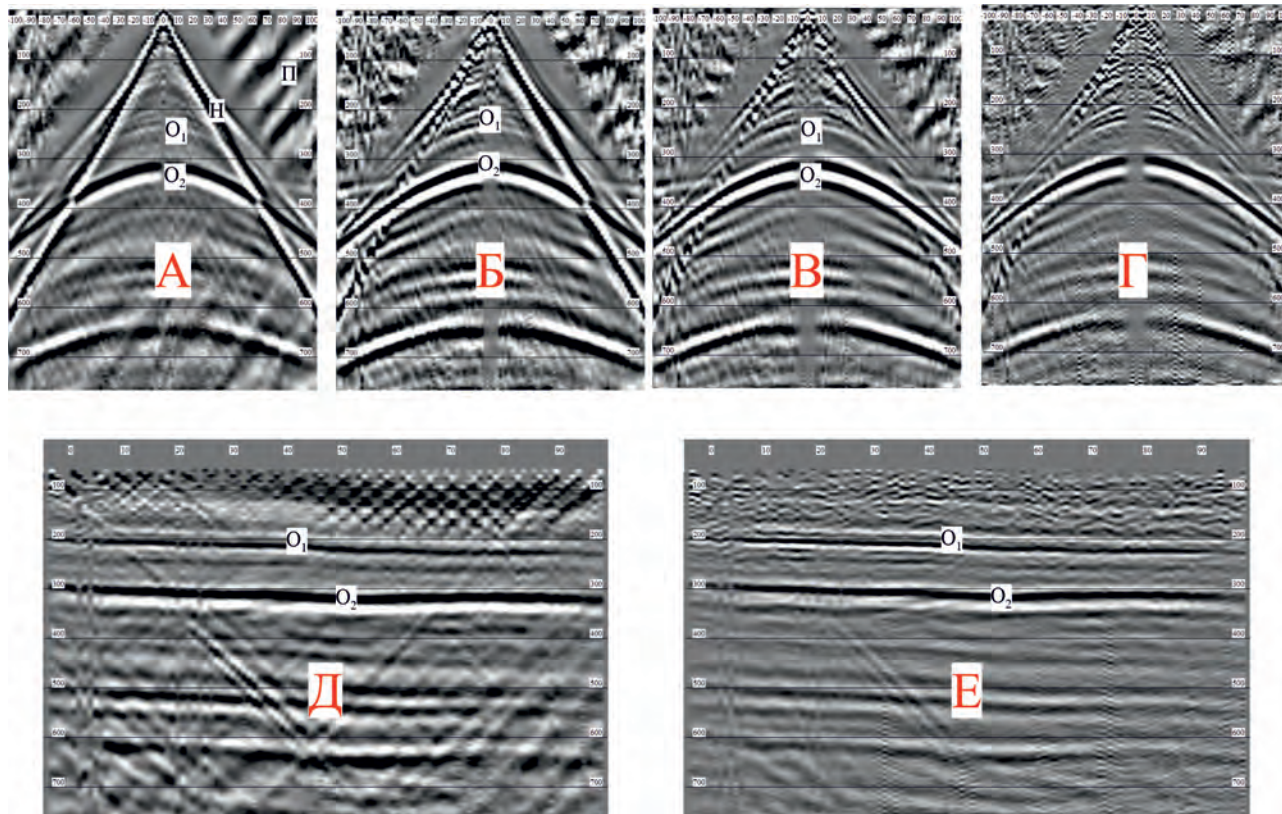
▲ Рис. 4. Увеличение разрешения временного разреза МОВ–ОСТ после применения деконволюции. Слева — исходный разрез, справа — после обратной фильтрации, Ia, II — отражающие горизонты, А - артефакты обработки, Длина оператора фильтра 120 мс, интервал предсказания 1 мс, стабилизирующий коэффициент 15%.

является простейшей разновидностью F-K фильтрации. Он основан на направленном суммировании отсчётов сейсмограммы в пределах скользящего окна по семейству прямых линий, наклон которых определяется скоростями подавляемых волн $V_{\min}$ – $V_{\max}$. После расчёта суммотрассы она вычитается из центральной трассы окна. Если вместо вычитания заменить центральную трассу окна суммо-трассой, то фильтр будет выделять волны в выбранном диапазоне скоростей. Такой подход применяется для повышения когерентности временных разрезов. Вычитание плоских волн позволяет подавить колебания поверхностных волн, боковые (левые и правые) волны от сторонних источников, разделить поле нисходящих и восходящих волн в ВСП, уменьшить влияние артефактов обработки на разрезы.

Основную трудность в прослеживании волн, наблюдаемых в последующих вступлениях (в первую очередь — отражённых), представляет цуг поверхностных волн. На записях, полученной

схемой наблюдений Z-Z это псевдорэле-евские волны, схемой Y-Y — волны Лява. Так как волны Лява не образуются при высокоскоростном приповерхностном слое [Романов, Рахматуллин, 2014], они не фиксируются, если сейсморазведочные работы проводятся с сезонно-мёрзлого слоя или твёрдого техногенного покрытия [Романов, Шнеерсон, 2018]. Волны Рэлея наблюдаются на записях продольных волн независимо от типа скоростного разреза. Оба типа волн характеризуются дисперсией скорости, низкими скоростями и центральным частотами.

Вычитание плоских волн до суммирования позволяет подавить колебания поверхностных волн, особенно при небольшой дисперсии фазовой скорости, а также уменьшить уровень боковых волн. Выделение отражённых волн также осложняется влиянием волн, отражённых от малоглубинных границ. Их практически прямолинейные группы колебаний могут пересекать оси синфаз-



▲ Рис. 5. Совместное использования вычитания плоских волн и предсказывающей деконволюции. Н — отражение от неглубокой границы, П — правые боковые волны, O1,2 — полезные отражённые волны, А — исходная суперсейсмограмма, Б — после вычитания правых боковых волн, В — после вычитания волны, отражённой от неглубокой границы, Г — после минимально-фазовой предсказывающей деконволюции, Д — разрез, построенный по сейсмограмме А, Е — разрез по сейсмограмме Г.

ности отражений от более глубоких горизонтов и мешать их прослеживанию, подобно поверхностным волнам.

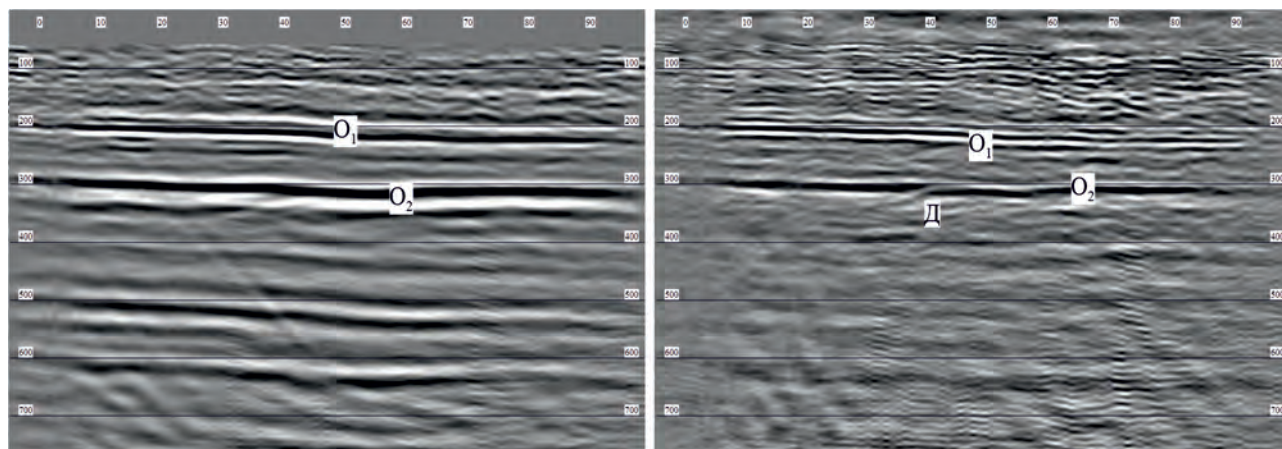
На рисунке 5 показаны результаты применения вычитания скоростей и деконволюции к данным метода отражённых волн.

Совместное использование двух адаптивных фильтров до суммирования позволило уменьшить количество артефактов обработки на временных разрезах и повысить разрешение сейсмических изображений.

На рисунке 6 (слева) продемонстрированы результаты использования когерентного фильтра, который уменьшил уровень наклонных осей синфазности, что подчеркнуло субгоризонтальные оси полезных отражений.

Адаптивное вычитание также возможно на основе оптимальной фильтрации, когда оценка мешающей коррелируемой компоненты выполняется с помощью стохастического фильтра воспроизведения (винеровского). На рисунке 6 (справа) показано подавление кратных волн на временном разрезе при помощи адаптивного вычитания коррелируемых помех.

Кроме ослабления кратных волн сократилось количество полупериодов в колебаниях полезных волн, возросла вертикальная и горизонтальная разрешенность разрезов, в частности выделился дифрактор, до обработки перекрытый осью синфазности отражённой волн.



▲ Рис. 6. Совместное использования вычитания плоских волн и предсказывающей деконволюции.
Слева — после когерентной фильтрации, справа — после адаптивного вычитания.

Заключение

Применение адаптивных алгоритмов подавления регулярных помех показало их высокую эффективность как до суммирования, так и на этапе постобработки временных разрезов. Такие алгоритмы позволяют повысить разрешение динамических разрезов, уменьшить уровень артефактов обработки, ослабить кратные волны и боковые волны. Адаптивные алгоритмы рекомендуется применять к данным метода отражённых волн и вертикального сейсмического профилирования.

Литература

1. Белоусов, А. В. Особенности обработки данных инженерной сейсморазведки / А. В. Белоусов, К. С. Сергеев // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной юбилейным датам предприятий Пермнефтегеофизика, ЧЕГИС, Пермгеокабель, ФХС-ПНГ, ГЕОЛАЙН, Пермь, 26–27 ноября 2015 года / Пермский государственный национальный исследовательский университет; Главный редактор В.И. Костицын. — Пермь: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высше-

го профессионального образования "Пермский государственный национальный исследовательский университет", 2015. — С. 16-18. — EDN VDGKFT.

2. Денисов М. С., Егоров А. А., Шнеерсон М. Б. Опробование алгоритма оптимизационной рекурсивной фильтрации для подавления гармоник на модельных и полевых коррелограммах // Геофизические технологии. — 2020. — №. 2. — С. 54-66.

3. Копылов, Д. В. Опыт исследования карстоопасного участка геофизическими методами / Д. В. Копылов, В. А. Сидоров // Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе : сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 16–22 октября 2020 года / Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. — Москва: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2020. — С. 147-151. — EDN MDYUNF.

4. Романов В.В. Программа для обработки данных инженерной сейсморазведки, полученных методами МПВ и MOB Seisshall // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016613644, 01.04.2016. Заявка № 2016611202 от 12.02.2016.

5. Романов, В. В. Определение устойчивости бортов карьеров при инженерно-геологических изысканиях / В. В. Романов,

К. С. Мальский, Е. А. Боровой // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 7. – С. 77-81. – EDN UGCBHN.

6. Романов, В. В. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосковья / В. В. Романов, И. И. Рахматуллин // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2014. – № 3. – С. 86-88. – EDN SIRHNV.

7. Оценка автокорреляционных функций данных инженерной сейсморазведки при выполнении деконволюции / В. В. Романов, К. С. Сергеев, М. Д. Кауркин, А. А. Иванов // Геофизика. – 2022. – № 1. – С. 77-83. – EDN GHTQRF.

8. Романов, В. В. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве / В. В. Романов, М. Б. Шнеерсон // Геофизика. – 2018. – № 6. – С. 75-81. – EDN SRACOD.

9. Техногенные артефакты в результатах сейсморазведочных исследований урбанизированных и горнотехнических объектов / И. А. Санфиоров, А. А. Жикин, А. Г. Ярославцев, А. И. Бабкин // Геофизика. – 2019. – № 5. – С. 4-12. – EDN YMCFLB.

10. Алгоритм подавления поверхностных волн на данных 2D сейсморазведки методом главных компонент во временно-частотной области

11. Ярославцев, А. Г. Особенности цифровой обработки сейсморазведочных данных при изучении малоглубинной калийной залежи / А. Г. Ярославцев, А. А. Жикин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 5. – С. 188-193. – EDN PWDGEJ.

12. Karsli H., Bayrak Y. Ground-roll attenuation based on Wiener filtering and benefits of time-frequency imaging // The Leading Edge. – 2008. – Т. 27. – №. 2. – С. 206-209.

Подробнее об авторах



Романов
Виктор Валерьевич

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва,



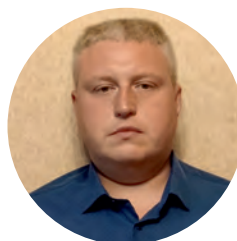
Латышев
Кирилл Алексеевич

студент, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва



Кауркин
Михаил Дмитриевич

Ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.т.н., г. Москва



Андреев
Дмитрий Олегович
Ведущий инженер лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва