

УДК 550.834

АЛГОРИТМ ПОДАВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ДАННЫХ 2D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ВО ВРЕМЕННО-ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

А.В. Яблоков^{1,2,3}, М.В. Моисеев¹, А.С. Сердюков^{1,2,3}, Д.А. Литвиченко⁴

¹Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный просп., 54, Россия

⁴ООО «Газпромнефть НТЦ», 625048, Тюмень, ул. 50 лет Октября, 14, Россия

Поверхностные волны — основной источник когерентного шума в наземной сейсморазведке, а их подавление является одним из основных этапов обработки данных общей глубинной точки (ОГТ), призванных повысить качество прослеживания однократно отраженных волн на временных разрезах. На практике для шумоподавления используются процедуры из современного программного обеспечения (ПО), основанные на численном моделировании волновых форм. Но они являются слишком ресурсоемкими и имеют большое количество субъективно настраиваемых параметров. Общий недостаток известных алгоритмов — искажение энергии отраженных волн в зоне интерференции с волной-помехой либо неудовлетворительное качество подавления шума. Текущее исследование направлено на усовершенствование алгоритма фильтрации во временно-частотной области методом главных компонент (SKL) с целью преодолеть перечисленные выше ограничения, повысить точность и скорость работы его программной реализации, а также выполнить его апробацию при обработке профильных полевых данных наземной 2D сейсморазведки. Модификация алгоритма заключается в разработке нового способа определения статических поправок для спрямления годографа поверхностной волны в частотно-временной области и в использовании предпроцессинга, на котором предварительно удаляется сигнал отраженных волн. Эти и другие модификации обеспечили ускорение вычислений и повышение качества подавления поверхностно-волновых помех. Кроме того, алгоритм SKL ускорен распараллеливанием вычислений на логические ядра процессора. В работе приведено подробное описание алгоритма, показано его существенное преимущество по сравнению со стандартными методами полосовой и f - k -фильтрации, приведено сопоставление результатов обработки полевых данных, полученных процедурой SWANA из ПО «Geovation 2.0» и алгоритмом SKL. Результат, полученный алгоритмом SKL, превосходит процедуру SWANA по качеству фильтрации поверхностной волны и имеет всего четыре настраиваемых параметра (SWANA — 20 параметров).

Шумоподавление, фильтрация, поверхностная волна, метод отраженных волн, метод общей глубинной точки, S-преобразование

ALGORITHM FOR SURFACE WAVE SUPPRESSION ON 2D SEISMIC DATA USING THE SLANT KARHUNEN–LOEVE TRANSFORM IN A TIME-FREQUENCY DOMAIN

A.V. Yablokov, M.V. Moiseev, A.S. Serdyukov, D.A. Litvichenko

Surface waves are the main source of coherent noise in land seismic survey, and their suppression is one of the main stages of common depth point data processing designed to improve the quality of tracking primary reflections on time sections. In practice, noise reduction is carried out using procedures from modern software based on numerical modeling of waveforms. However, they are too resource-intensive and have a large number of subjectively customizable parameters. The known algorithms have a common drawback: either the energy of reflected waves is distorted in an interference zone with a noise wave or the noise suppression quality is unsatisfactory. The current research is aimed at improving the filtering algorithm in a time-frequency domain using the slant Karhunen–Loeve transform in order to overcome these limitations, to increase the accuracy and rate of its software implementation, and also to test it when processing profile field data from land-based 2D seismic surveys. The algorithm is modified by developing a new method for determining static corrections for surface wave hodograph rectification in a time-frequency domain and by the application of preprocessing in which the reflected wave signal is removed preliminarily. These and other modifications ensure faster calculations and improve the quality of surface wave interference suppression. In addition, the slant Karhunen–Loeve transform is accelerated by parallelizing calculations across logical processor cores. In this paper, the algorithm is described in detail, its significant advantage over the standard methods of bandpass filtering and f - k filtering

is shown, and the results of processing the field data obtained by the SWANA procedure (Geovation 2.0) and by the slant Karhunen–Loeve transform. The result obtained by the slant Karhunen–Loeve transform is superior to the SWANA procedure in terms of the surface wave filtering quality and has only four adjustable parameters (SWANA has 20 parameters).

Noise reduction, filtering, surface wave, seismic-reflection method, common depth point method, S transform

ВВЕДЕНИЕ

Шумоподавление — один из ключевых этапов обработки сейсмических данных методом общей глубинной точки (ОГТ), выполняемый для повышения качества прослеживания отраженных волн от целевых слоев. Поверхностные волны — основной источник когерентного шума в наземной сейсморазведке, так как на их образование затрачивается около 2/3 части энергии, генерируемой источником сейсмических колебаний. При 2D наблюдениях на сейсмограмме общей точки возбуждения (ОТВ) поверхностные волны образуют цуг, сконцентрированный в пределах расходящегося «конуса» с вершиной в источнике. Цуг поверхностных волн перекрывает отраженные волны вдоль всего времени регистрации и интерферирует с ними в пересечении их частотных диапазонов. В записях вертикальной компоненты смещений поверхностные волны представлены многомодовой волной Релея, которая характеризуется низкой частотой и скоростью. При применении FK -анализа к данным наземной сейсмики часто наблюдается алиасинг — эффект наложения компонент с волновыми числами, большими пространственной частоты дискретизации, которая определяется шагом между приемниками.

Самый простой и эффективный способ подавления поверхностных волн — полосовая фильтрация (ПФ). Тем не менее она не применяется на практике из-за неспособности разделить сигналы в частотной области. В результате при эффективном подавлении поверхностной волны существенно изменяется сигнал целевых волн, необходимый на этапах дальнейшей обработки. Однако с помощью ПФ возможно получить начальную модель когерентных помех для ее последующего адаптивного вычитания из исходных данных в пространственно-временной области с помощью различных методов: NLMS [Sejnek, Vrba, 2022], аффинной проекции [Arablouei, Doğançay, 2012], нестационарного согласованного фильтра [Jiao et al., 2015] и др. В основном алгоритмы адаптивного вычитания основаны на подборе спектральных характеристик фильтра в процессе решения оптимизационной задачи. Они эффективно используются для улучшения качества подавления как поверхностных волн, так и кратных отраженных волн, но зачастую привносят шум в отфильтрованные данные и влияют на амплитуду полезного сигнала.

Более универсальный подход — FK -фильтрация, основанная на применении двумерного фильтра в области частот и волновых чисел (fk). На fk -спектре отраженные волны после ввода кинематических поправок фокусируются вблизи нулевого волнового числа, тогда как поверхностные волны наблюдаются в широком спектре. Проектируемый двумерный фильтр, который обычно задается через минимальную и максимальную кажущуюся скорость, включает в себя основной сигнал поверхностной волны. Тем не менее FK -фильтрация не устраняет поверхностные волны в случае алиасинга, так как частотные диапазоны таких поверхностных и отраженных волн пересекаются. За последние два десятилетия разработаны различные подходы к фильтрации поверхностной волны путем трансформации сейсмических данных на основе различных преобразований: S -преобразования [Askari, Siahkoobi, 2008], курвлет-разложения [Naghizadeh, Sacchi, 2018; Liu et al., 2018], преобразование Карунена—Лозва [Verma et al., 2016]. Все эти методы в различной степени справляются с удалением когерентных помех и влияют на сигнал отраженных волн, однако не получили распространения среди специалистов, занимающихся практической обработкой данных.

В настоящее время для подавления когерентного шума на практике используются процедуры из современных программных пакетов обработки сейсморазведочных данных (Geovation, Omega, ECHOS и др.), основанные на численном моделировании волновых форм. Так, в процедуре SWANA (Surface Waves Adaptive Noise Attenuation) из ПО «Geovation 2.0» поверхностная волна моделируется на основе оценки ее дисперсионных характеристик с помощью вейвлет-преобразования и адаптивно вычитается из исходных данных. Хотя полное описание коммерческого алгоритма SWANA недоступно, из публикаций известны примеры применения его ранних версий [Ali et al., 2019; Al-Heety, Thabit, 2022]. В целом SWANA обеспечивает эффективное подавление поверхностных волн в зоне алиасинга с сохранением амплитуд объемных волн, но точность алгоритма зависит от выбора большего количества управляемых параметров (около 20), подбор которых является трудоемкой задачей. Другой подход реализован в алгоритме SWAMI (Surface Wave Analysis, Modeling and Inversion) из ПО «Omega», в котором расчет волновой формы поверхностной волны основан на определении скоростной модели верхней части геологического разреза (ВЧР) путем многомодальной инверсии дисперсионных кривых поверхностных

волн [Strobbia et al., 2011; Bai, Yilmaz, 2018]. Такой подход позволяет учитывать локальные неоднородности в ВЧР и более точно рассчитывать дисперсионные волновые формы, но требует наличия в данных устойчивого сигнала поверхностной волны, является вычислительно ресурсоемким и, как и SWANA, сложно настраивается.

Альтернативный подход к шумоподавлению реализуется на основе настройки генеративно-состязательной нейронной сети (GAN), с помощью которой из изображений исходных сейсмограмм синтезируются очищенные данные [Yuan et al., 2020]. В тренировочном наборе присутствуют как примеры синтетических данных с помехами и без, так и примеры данных после шумоподавления различными методами, что требует уже настроенной процедуры подавления (SWANA или SWAMI). Обучение нейронной сети — ресурсоемкий процесс, требующий наличия мощных видеокарт. К преимуществам GUN можно отнести эффективное подавление поверхностной волны и сохранение амплитуды объемных волн, высокую производительность. Данный подход дает хорошие результаты только при репрезентативном наборе тренировочных данных, составление которого трудоемкая работа.

Таким образом, известные из публикаций алгоритмы подавления поверхностной волны имеют ряд нерешенных недостатков: субъективность выбора и большое количество настраиваемых параметров, ввод артефактов, ресурсоемкость вычислений, неудовлетворительное качество подавления. В статье [Serdyukov, 2022] предлагается алгоритм SKL (Slant Karhunen-Loeve или наклонное преобразование Карунена—Лозва) на основе временно-частотного разложения записей сейсмоприемников с помощью преобразования Стоквелла и фильтрации сейсмограмм на каждой частоте методом главных компонент. Преимуществом использования преобразования Стоквелла является учет нестационарности сейсмических данных и повышенное разрешение анализируемых спектров и, как следствие, лучшее разделение волн в отличие от стандартных подходов [Askari, Siahkoobi, 2008]. Метод главных компонент уже применяется для подавления поверхностных волн в пространственно-временной области [Verma et al., 2016], но включает в себя ряд неинтуитивных шагов и не годится для данных линейной системы наблюдений.

Текущее исследование направлено на развитие алгоритма SKL с целью повышения точности и скорости работы его программной реализации, а также на его апробацию при обработке синтетических и реальных данных 2D сейсморазведки. Основная модификация относится к способу определения статических поправок для спрямления поверхностной волны на фиксированных частотах. В отличие от оригинальной версии, где оптимальные поправки для спрямления выбирались путем анализа собственных значений уже спрямленной сейсмограммы, предлагается выполнять предварительный поиск оптимального наклона до применения метода главных компонент. Эта и другие модификации обеспечили ускорение вычислений и повышение качества подавления поверхностной волны. Кроме того, алгоритм SKL ускорен распараллеливанием вычислений на логические ядра процессора (CPU), что сократило время расчета одной итерации примерно в два раза по сравнению с последовательной версией для персонального компьютера с 16 CPU.

В первой части статьи приведено подробное описание модифицированного алгоритма SKL. Во второй — представлены результаты его тестирования на синтетических данных, сгенерированных численным решением системы уравнений теории упругости, с сопоставлением со стандартными подходами: фильтром высоких частот и *FK*-фильтрацией. Показано существенное преимущество алгоритма SKL над базовыми методами фильтрации. В третьей части статьи приведено сопоставление результатов подавления поверхностной волны на полевых данных сеймопрофилирования с месторождения в Западной Сибири с помощью алгоритма SKL и модуля SWANA из ПО «Geovation 2.0». Для количественного сопоставления рассчитывались различные метрики на уровне сейсмограмм, *f_k*-спектров и разрезов. Результат, полученный алгоритмом SKL, превосходит процедуру SWANA по качеству фильтрации поверхностной волны и имеет всего четыре настраиваемых параметра, при этом так же, как и SWANA, минимально влияет на целевой сигнал поверхностной волны.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ПОДАВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Первая версия исследуемого алгоритма введена и описана в статье [Serdyukov, 2022]. В текущем исследовании алгоритм был модифицирован с целью его оптимизации. Модификация касается способа расчета статических поправок, спрямляющих годограф поверхностной волны на фиксированной частоте, а также поиска технологий предпроцессинга для повышения эффективности результата. В первой версии алгоритма оптимальные поправки выбирались путем сравнения собственных значений спрямленной сейсмограммы в частотной области. Для улучшения быстродействия предлагается проводить предварительный выбор оптимального наклона до этапа применения метода главных компонент.

Математическая модель распространения поверхностной волны. Алгоритм основан на представлении записей сейсмических трасс и их анализе во временно-частотной области с помощью преобразования Стоквелла или *S*-преобразования. Выражение прямого *S*-преобразования сигнала записывается следующим образом:

$$S[h(t)](\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt, \quad (1)$$

где $h(t)$ — входной сигнал, f — частота, τ — временная координата центра материнского вейвлета, задаваемого окном Гаусса. Преобразование Стоквелла обратимо и восстановленный сигнал рассчитывается по формуле:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) e^{i2\pi f t} d\tau df = \frac{\sqrt{2\pi}}{|f|} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t, f) e^{i2\pi f t} df. \quad (2)$$

При рассмотрении двух сигналов $h_1(t)$ и $h_2(t)$, зарегистрированных приемниками, расположенными на одной линии с источником, S -преобразование второго сигнала связано с S -преобразованием первого сигнала соотношением:

$$S[h_2(t)](\tau, f) = e^{-i2\pi k(f)l} e^{-\lambda(f)l} S[h_1(t)](\tau - k'(f)l, f), \quad (3)$$

где $k(f)$ — волновое число поверхностной волны, определяющее сдвиг фазы сигнала, $\lambda(f)$ — параметр затухания, l — расстояние между двумя приемниками, $k'(f)$ — групповая скорость поверхностной волны, определяемая наклоном линейного годографа на фиксированной частоте. Такая математическая модель поверхностной волны дает возможность определить изменение фазовой и групповой скорости [Serdyukov, 2019]. Оценка затухания поверхностной волны может быть выполнена на основе многокомпонентного анализа и на практике осложнена эффектами интерференции и несовершенством установки сейсмоприемников. На основе математического представления (3) распространения поверхностной волны строится алгоритм ее фильтрации.

Предпроцессинг. В ходе исследования было обнаружено, что перед применением основных этапов алгоритма целесообразно ввести кинематические поправки (NMO) для спрямления годографа отраженной волны и выполнить процедуру удаления энергии горизонтальной (плоской) волны в tx -пространстве. Эта процедура реализована в модуле «denoise3d» ПО «Geovation 2.0» и имеет название исполняемого метода «gmflat». Ввод NMO и применение «gmflat» позволяет существенно уменьшить влияние алгоритмов подавления (как SKL, так и SWANA) на амплитуду отраженных волн (см. раздел «Обработка полевых данных»). Второе наблюдение относится к поиску способа повышения качества подавления данных в ближней зоне источника. Замечено, что ввод автоматической регулировки усиления (APU) существенно снижает влияние зашумленных трасс и повышает эффективность фильтрации поверхностных волн.

Основные этапы алгоритма. С помощью рассматриваемого алгоритма из исходных данных рассчитывается сейсмограмма поверхностной волны — «модель шума». Для наглядности результаты этапов алгоритма демонстрируются при обработке синтетической сейсмограммы, изображенной на рис. 1, а.

Алгоритм состоит из следующих основных этапов:

1. Задание пользователем управляемых параметров: максимальная частота фильтрации (f_{\max}), которая ограничивает диапазон работы алгоритма ($0-f_{\max}$) и экономит время вычислений; минимальная (v_{\min}) и максимальная (v_{\max}) скорость (изображены пунктирными красными линиями на рис. 1, б), которые численно равны тангенсу наклона прямых и ограничивают треугольное двумерное окно фильтрации $W(x, t)$ с вершиной в точке источника.

2. Применение окна $W(x, t)$ к исходной сейсмограмме $f(x, t)$:

$$g(x, t) = W(x, t) \odot f(x, t), \quad (4)$$

где знак \odot обозначает покомпонентное произведение матриц.

3. Применение S -преобразования (1) к каждой трассе сейсмограммы $g(x, t)$:

$$\hat{g}(x, \tau, f) = S[g(x, t)] \quad (5)$$

и выбор интервала фильтрации в пределах $0-f_{\max}$. Срез трехмерной комплекснозначной функции $\hat{g}(x, \tau, f)$ на фиксированной частоте ($\hat{g}(x, \tau)$) будем далее называть, следуя работам [Askari, Siahkoohi, 2008; Serdyukov, 2022], псевдосейсмограммой. Модуль $\hat{g}(x, \tau)$ (амплитудный спектр) при $f = 10$ Гц приведен на рис. 1, б.

4. Нормализация каждой трассы псевдосейсмограммы на свой максимум для уменьшения влияния затухания:

$$\tilde{g}^f(x, \tau) = g^f(x, \tau) \odot \left| \max_{\tau} g^f(x, \tau) \right|^{-1}. \quad (6)$$

5. Суммирование значений амплитуды вдоль множества групповых скоростей (схематично показано сплошными красными линиями на рис. 1, б) в пределах окна $W(x, t)$ для каждой псевдосейсмограммы. Статическая поправка $\Delta^f(x, \tau)$ выбирается равной наклону, вдоль которого достигается максимум суммы.

6. Применение статических поправок для каждой псевдосейсмограммы и построение сдвинутой матрицы данных Y (рис. 1, в):

$$y_i(\tau) = \delta(\tau - \Delta(i-1)/M) \cdot \tilde{g}_i^f(\tau), \quad (7)$$

$$Y = \{y_i(\tau_j), i=1, \dots, M, j=1, \dots, N\}, \quad (8)$$

где δ — символ Кронекера, i — индекс текущего приемника, N — количество временных отсчетов в спектральной области и M — количество приемников.

7. Применение сингулярного разложения к сдвинутой матрице Y и выбор максимального сингулярного числа. Затем с помощью собственных векторов и максимального сингулярного числа рассчитывается отфильтрованная спрямленная псевдосейсмограмма (рис. 2, а). Предполагается, что максимальное сингулярное число соответствует поверхностной волне на данной частоте, так как поверхностные волны составляют основную часть сейсмического сигнала на заданной частоте.

8. Ввод статических поправок с обратным знаком и обратная нормализация (см. рис. 2, б). Таким образом рассчитывается псевдосейсмограмма поверхностной волны для каждой частоты — $g_{gr}^f(x, \tau)$.

9. Применение обратного S -преобразования (2) к набору псевдосейсмограмм поверхностной волны $g(x, \tau, f)_{gr}$ для восстановления сейсмограммы поверхностной волны (см. рис. 2, в):

$$g(x, t)_{gr} = \check{S} \left[g(x, \tau, f)_{gr} \right]. \quad (9)$$

10. Вычитание рассчитанной сейсмограммы поверхностной волны (см. рис. 2, в) из исходной сейсмограммы.

Полученная после последнего шага разностная сейсмограмма снова подается на вход второго шага алгоритма для повторного подавления поверхностной волны. На рисунке 3, а—г изображены отфильтрованные сейсмограммы после 1-, 3-, 5- и 7-й итерации соответственно. Видно, что основное подавление происходит на первых 3—4 итерациях. Критерием остановки итераций является малое, меньше 1 %, уменьшение энергии сейсмограммы между соседними итерациями. Энергия рассчитывается как квадрат суммарной амплитуды в пределах окна $W(x, t)$. На рисунке 3, д приведен график приращения энергии между итерациями.

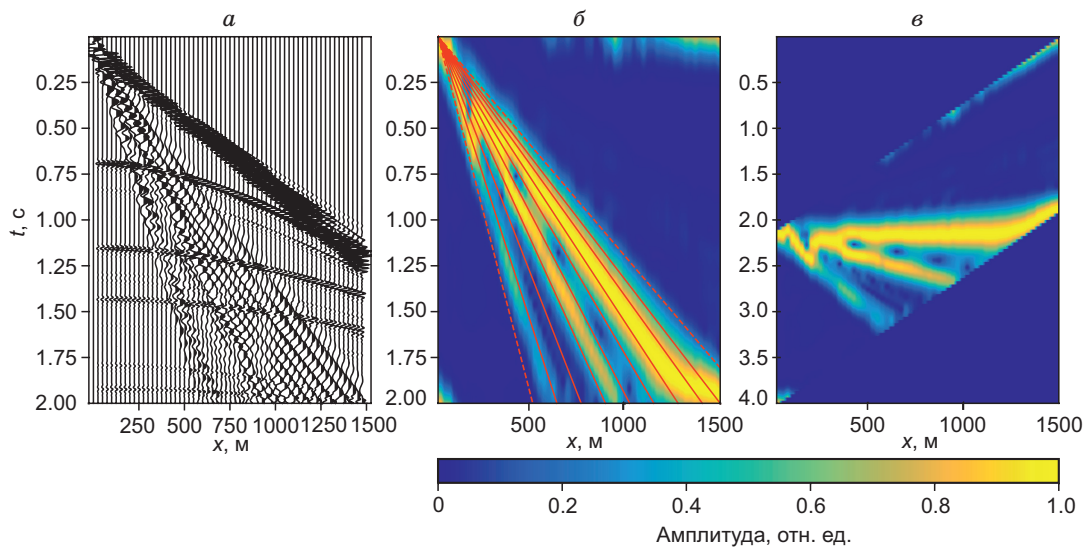


Рис. 1. Демонстрация работы этапов 1—6 алгоритма SKL:

а — исходная синтетическая сейсмограмма, б — ее псевдосейсмограмма на частоте 10 Гц и наклоны суммирования модулей амплитуд, в — спрямленная псевдосейсмограмма.

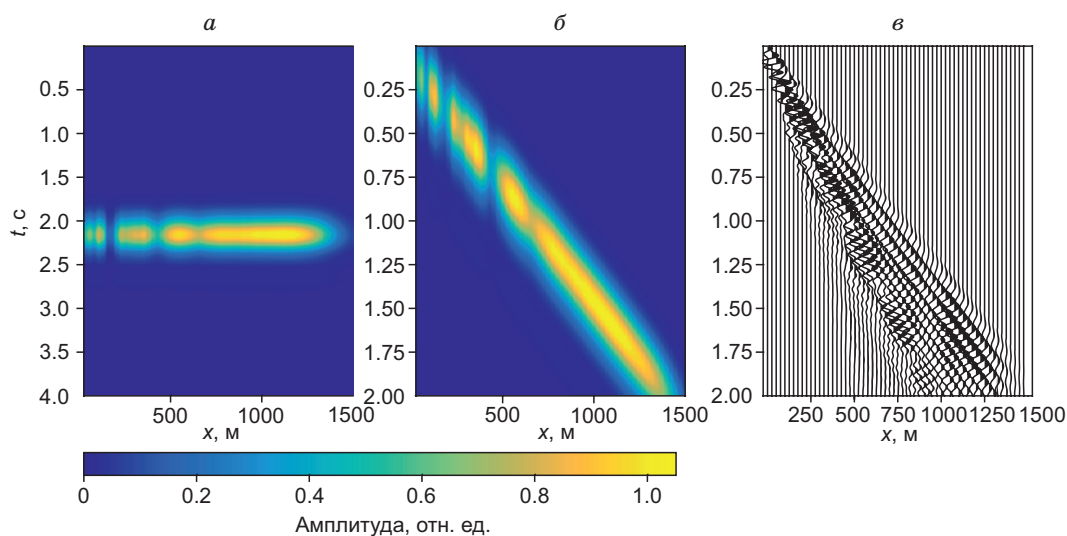


Рис. 2. Демонстрация работы этапов 7—9 алгоритма SKL:

a — спрямленная псевдосейсмограмма после фильтрации методом главных компонент, *б* — псевдосейсмограмма после ввода статических поправок с обратным знаком, *в* — сейсмограмма поверхностной волны.

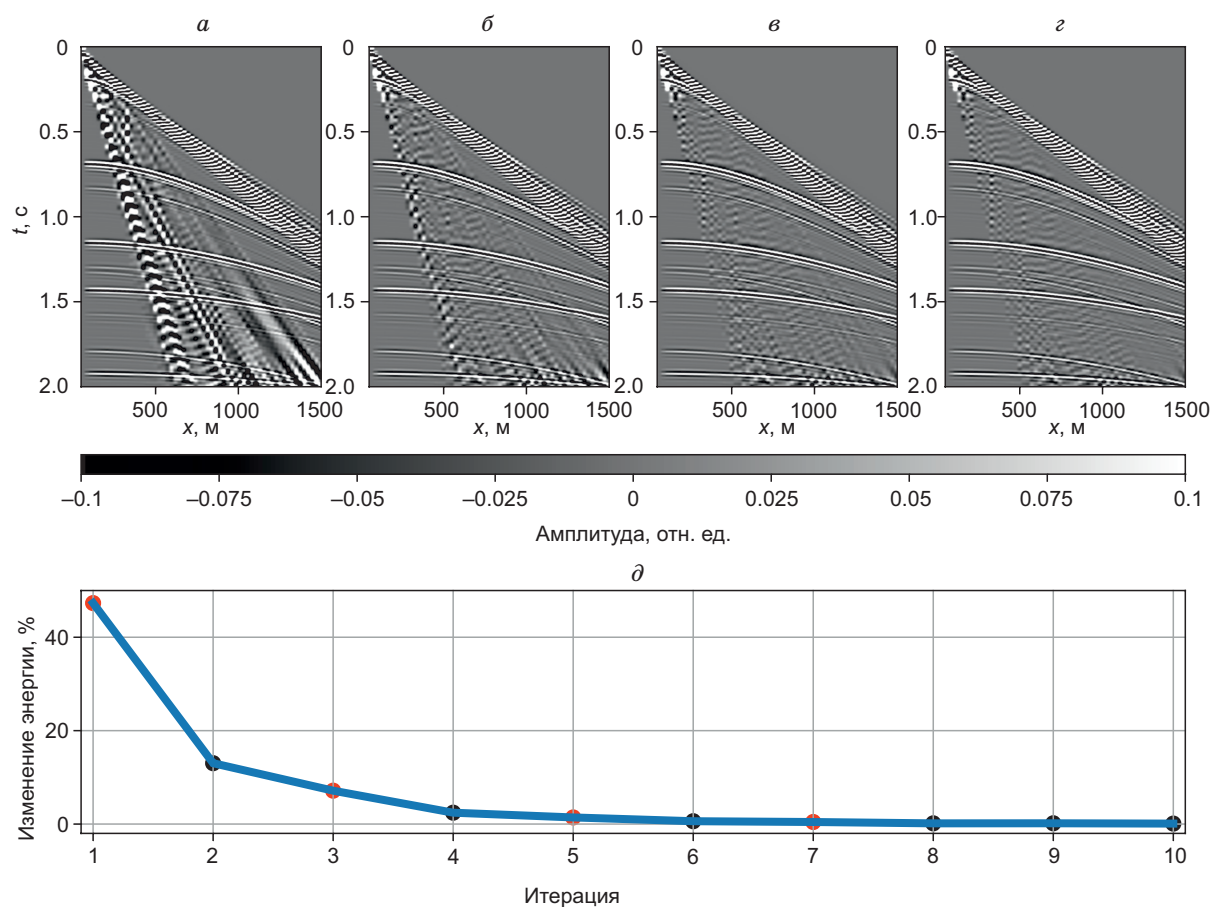


Рис. 3. Демонстрация фильтрации сейсмограммы по итерациям:

отфильтрованная сейсмограмма после: *a* — первой, *б* — третьей, *в* — пятой, *г* — седьмой итерации; *д* — график изменения энергии между итерациями в окне фильтрации.

Время выполнения одной итерации алгоритма

До распараллеливания, с	После распараллеливания, с
1.25	0.55

Выполнение операций на этапах с 5-го по 8-й выполняется независимо на каждой фиксированной частоте и ускоряется путем распараллеливания вычислений на логические ядра процессора (CPU). Время расчета одной итерации алгоритма зависит от количества CPU, количества сейсмических трасс, временных отсчетов и значения

f_{\max} . В таблице представлено время работы алгоритма до и после ускорения методом распараллеливания с использованием процессора Intel Core i7-10700 (количество логических ядер 16).

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для верификации разработанного алгоритма SKL выполняется обработка синтетической сейсмограммы, для которой объемные и поверхностные волны рассчитывались независимо. Такой подход позволяет точно оценить качество результатов за счет сопоставления сейсмограмм отдельных типов волн после фильтрации. Сейсмограмма объемных волн рассчитывалась для поверхностной линейной системы наблюдений путем решения двумерного уравнения акустики методом конечных разностей, реализованного в открытом программном пакете «IFOS2D» [Bohlen, 2002]. Форма в источнике — импульс Рикера с доминантой частотой 30 Гц. Расчет выполнялся для скоростной модели, изображенной на рис. 4, а. Плотность (ρ) задавалась постоянной (2000 кг/м³).

Сейсмограмма поверхностной волны строилась на основе расчета дисперсионных кривых методом матричных пропагаторов, реализованного в открытой библиотеке «disba» языка программирования Python. Для построения дисперсионных кривых задаются параметры такой же скоростной модели (см. рис. 4, а): количество и толщина слоев, скорости продольной (v_p) и поперечной $v_s = v_p/2$ волн, постоянная плотность $\rho = 2000$ кг/м³, диапазон частот (0—50 Гц), количество мод равно трем. Дисперсионная кривая поверхностной волны описывает зависимость между фазовой скоростью и частотой ($v_{ph}(f)$) и может быть использована для определения волновых форм. Согласно алгоритму [Gaždová, Vilhelm, 2011], волновые формы поверхностной волны $S(t, x)$ рассчитываются как сумма затухающих плоских волн, сдвинутых во времени в соответствии с функцией $v_{ph}(f)$ для задаваемого расстояния x между источником и приемником:

$$S(t, x) = \sum_{i=1}^n a_0 e^{-\beta \left(t + \frac{x}{V_{ph}(f_i)} \right)} \sin \left(2\pi f_i \left(t + \frac{x}{V_{ph}(f_i)} \right) \right), \quad (10)$$

где a_0 — начальная амплитуда, β — коэффициент затухания. Суммирование выполняется по числу частотных отсчетов дисперсионной кривой (n). Коэффициент затухания β представляет собой уменьшение амплитуды отдельной частотной составляющей от времени. Волновые формы $S(t, x)$ для каждой моды поверхностной волны рассчитываются отдельно, затем суммируются во временной области ($g^{true gr}$).

Полная синтетическая сейсмограмма (см. рис. 4, б) вычисляется как сумма сейсмограмм объемных и поверхностных волн. Расчет выполнялся для типичного в наземной 2D сейсморазведке шага между приемниками — 25 м, вследствие которого на fk -спектре (см. рис. 4, в) наблюдается алиасинговая волна Рэлея, пересекающая область распространения объемных волн в диапазоне частот 15—25 Гц.

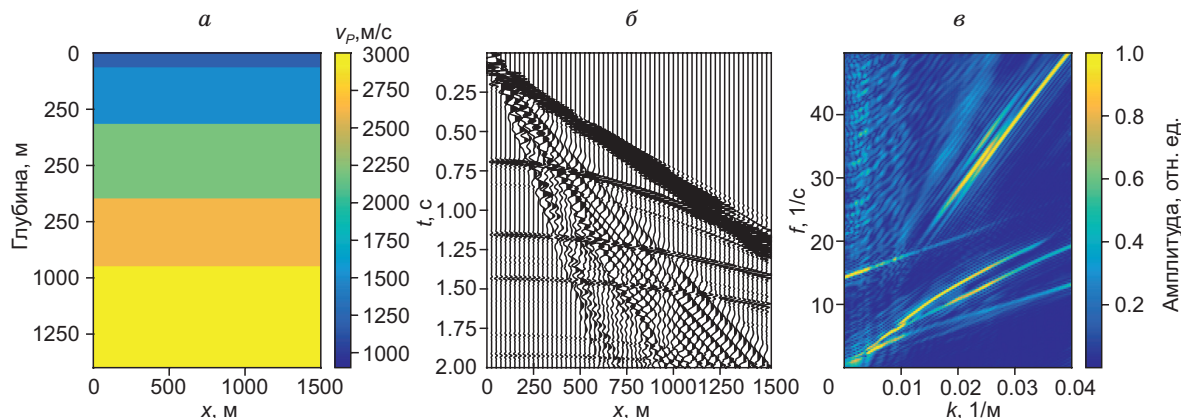


Рис. 4. Синтетические данные:

а — скоростная модель v_p для расчета, б — исходная рассчитанная сейсмограмма, в — ее fk -спектр.

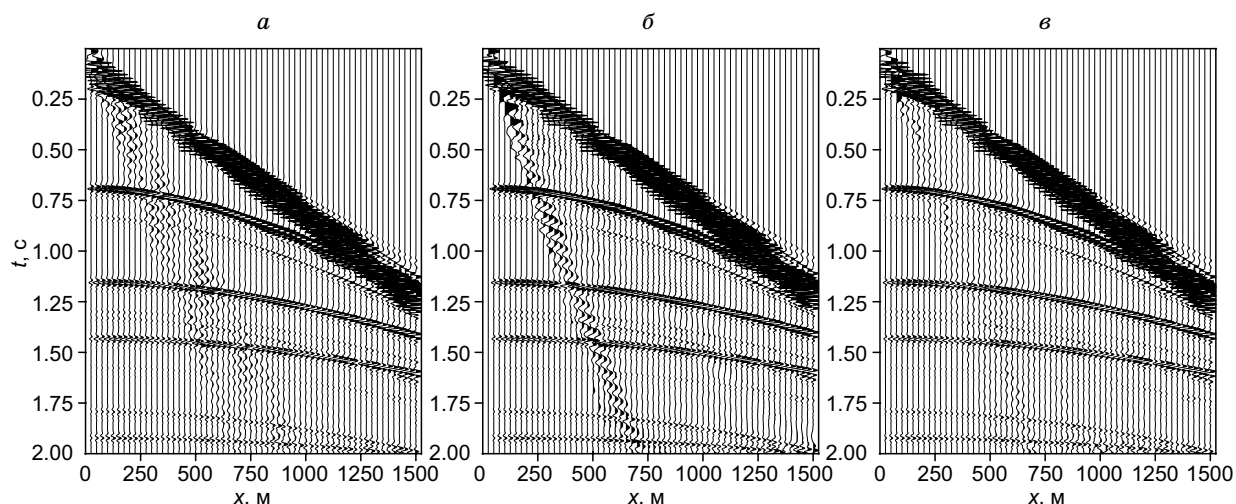


Рис. 5. Сопоставление результатов фильтрации синтетической сейсмограммы различными способами:

а — ФВЧ, *б* — *FK*-фильтрация, *в* — SKL.

В ходе тестирования SKL на синтетических данных описанная выше техника предпроцессинга не применялась, а оценивалась эффективность только основных этапов алгоритма. Для сопоставления результатов подавления поверхностной волны помимо SKL (рис. 5, *в*) также использовались стандартные подходы: фильтр высоких частот — ФВЧ (см. рис. 5, *а*) и *FK*-фильтрация (см. рис. 5, *б*). По качеству подавления поверхностной волны алгоритм ФВЧ сопоставим с алгоритмом SKL. Но разработанный алгоритм больше подавляет поверхностную волну и меньше изменяет целевой сигнал по сравнению с ФВЧ. При подавлении поверхностной волны алгоритмом *FK*-фильтрации невозможно подавление алиасинговых поверхностных волн без изменения амплитуд отраженных волн.

На рисунке 6 приведены *FK*-спектры отфильтрованных сейсмограмм. Алгоритм ФВЧ подавляет все типы волн до заданной граничной частоты 20 Гц, значительно изменяя полезный сигнал (см. рис. 6, *а*). На спектре после *FK*-фильтрации (см. рис. 6, *б*) наблюдается область наложения частот поверхностной и отраженных волн (область алиасинга). Алгоритм SKL (см. рис. 6, *в*) эффективно подавляет сигнал поверхностной волны пока ее амплитуда доминирует на фиксированной частоте. После того

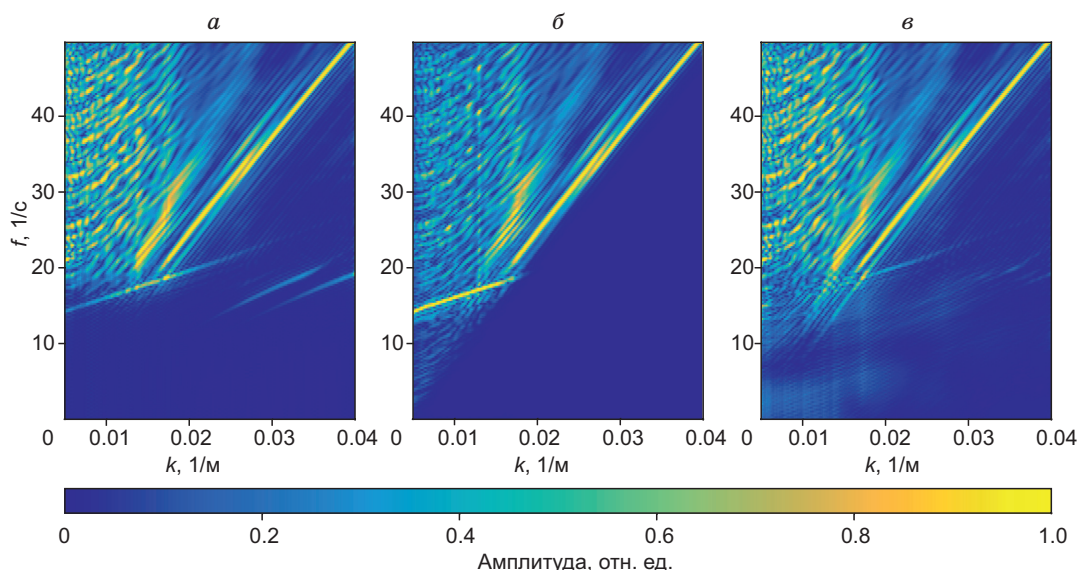


Рис. 6. Сопоставление результатов фильтрации синтетических данных в *fk*-области различными способами:**

а — ФВЧ, *б* — *FK*-фильтрация, *в* — SKL.

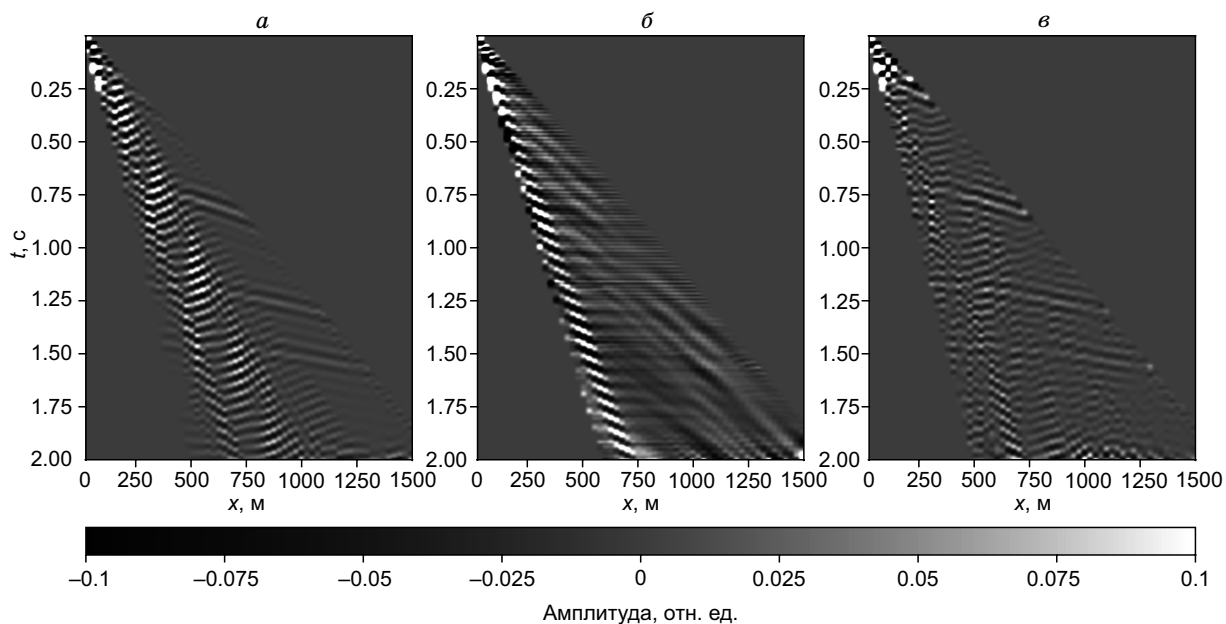


Рис. 7. Сопоставление разностных сейсмограмм между истинной и отфильтрованной поверхностной волной различными способами:

а — ФВЧ, *б* — *FK*-фильтрация, *в* — SKL.

как сигнал перестал быть доминантным, подавляется волна с наибольшей амплитудой и с линейным годографом на псевдосейсмограмме, вследствие чего могут отфильтровываться не только поверхностная волна, но и сигнал отраженной волны.

Для анализа качества подавления поверхностной волны и изменения сигнала отраженной волны рассчитываются разностные сейсмограммы между истинной поверхностной волной — $g^{true\ gr}$ и извлеченной — $g^{estimate\ gr}$ (вычисляется как разница между исходной и отфильтрованной) в результате фильтрации (рис. 7). В идеальном примере такая разностная сейсмограмма не должна содержать поверхностную и отраженную волну и состоять целиком из нулевых трасс, т. е. $g^{true\ gr} - g^{estimate\ gr} = 0$. Для

количественной оценки рассматривается средняя абсолютная ошибка: $MAE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |g_{ij}^{true\ gr} - g_{ij}^{estimate\ gr}|$.

Для разностной сейсмограммы после ФВЧ MAE имеет значение 0.008, после *FK*-фильтрации — 0.01, после SKL — 0.007. Наибольший вклад в MAE вносит сигнал неотфильтрованной поверхностной волны. Количество отраженных волн на данном этапе тестирования оценивается качественно.

Результат подавления поверхностной волны алгоритмом SKL на синтетических данных превосходит результаты, полученные с помощью ФВЧ и *FK*-фильтрации. Алгоритмы ФВЧ обладают высоким качеством подавления поверхностной волны, но при этом сильно изменяют целевой сигнал, поэтому для фильтрации не используются. Стандартным подходом к фильтрации поверхностной волны является *FK*-фильтрация. Данный алгоритм не изменяет отраженных волн при должном конструировании маски фильтра, но при этом не способен подавить поверхностные волны в области алиасинга. Однако алгоритм SKL также частично изменяет сигнал отраженной волны, что может быть нивелировано этапами предпроцессинга и постпроцессинга.

ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ

Для апробации алгоритма используются данные 2D сейсморазведки, зарегистрированные по методу общей глубинной точки (ОГТ) в сейсмогеологических условиях, характерных для южной части района Ханты-Мансийского автономного округа. Для возбуждения упругих колебаний применялись взрывы в скважинах с массой заряда ~ 1 кг. Шаг по приемникам составляет 25 м, шаг по источникам — 50 м, шаг дискретизации по времени — 2 мс.

На рисунке 8 представлен граф обработки данных линейного профиля длиной около 36 км для алгоритмов SWANA и SKL. Все процедуры графа, кроме основных этапов алгоритма SKL, реализовыва-

лись с помощью инструментов ПО «Geovation 2.0». После загрузки полевых данных в ПО и присвоения геометрии вводятся статические поправки, которые определялись обработкой волн первых вступлений.

Этап предпроцессинга включает ввод кинематических поправок для спрямления отраженных волн, мьютинг по закону годографа первых вступлений и удаление энергии плоских волн с помощью процедуры «gmflat» из модуля «denoise3d». Согласно описанию «gmflat», плоская энергия вычисляется с помощью медианного фильтра и вычитается из входного сигнала.

На основном этапе подавления к предобработанным данным независимо применяются алгоритмы SWANA и SKL для расчета сейсмограмм поверхностной волны. Для повышения качества фильтрации поверхностной волны в ближней зоне источника перед алгоритмами вводятся АРУ и сохраняются коэффициенты усиления. После работы алгоритмов выполняется возвращение к исходным амплитудам делением на матрицу коэффициентов усиления. Алгоритмы SKL и SWANA применялись от первого отсчета по частоте и до частоты 20 Гц, окно фильтрации задавалось двумя значениями скоростей — 1 и 350 м/с. Процедура SWANA запускалась последовательно в двух режимах — «al» (подавление алиасинговых поверхностных волн) и «gw» (каналовых поверхностных волн). Отфильтрованные сейсмограммы вычисляются как разность исходных данных и рассчитанной поверхностной волны. Для подавления низкочастотных шумов фильтрации применяется полосовая фильтрация от 4 до 120 Гц. Сигнал ниже 4 Гц фильтруется, так как на таких частотах, как правило, присутствует только шум и искаженный сигнал.

На заключительном этапе производится регулирование амплитуд сейсмограмм с целью восстановления «истинной» интенсивности записи (ввод сферического расхождения), сортировка сейсмограмм и их суммирование по ОГТ для получения временного разреза.

Для наглядной демонстрации результата обработки была выбрана одна из сейсмограмм с наиболее прослеживаемыми осями синфазности отраженных волн (рис. 9, а). Сейсмограммы после фильтрации с использованием изложенного выше графа для алгоритмов SWANA и SKL представлены на рис. 9, б, в. Для количественной оценки результата подавления рассчитываются отношения SNR. Красное окно соответствует целевому сигналу (отраженной волне), синее — шуму (поверхностной волне). Значение SNR на исходной сейсмограмме — 0.2, после SWANA — 0.5 и после SKL — 0.4. Как видно из результатов фильтрации, эффективность подавления с помощью алгоритма SKL сопоставима с процедурой SWANA, хотя сейсмограмма после SKL более зашумлена на поздних временах.

На рисунке 10 представлены амплитудные спектры в f -области для исходной сейсмограммы и после подавления. На f -спектре после SKL видно, что алгоритм эффективно удаляет алиасинговые волны, основную моду и большую часть высших мод поверхностной волны.

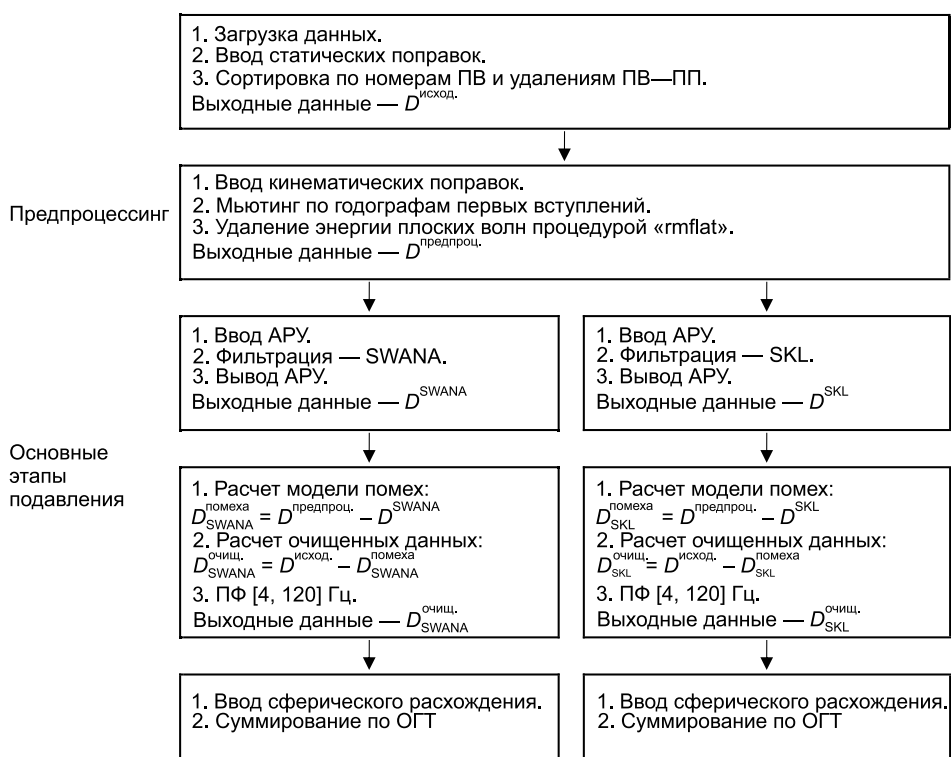


Рис. 8. Граф обработки полевых данных для алгоритмов SWANA и SKL с использованием ПО «Geovation 2.0».

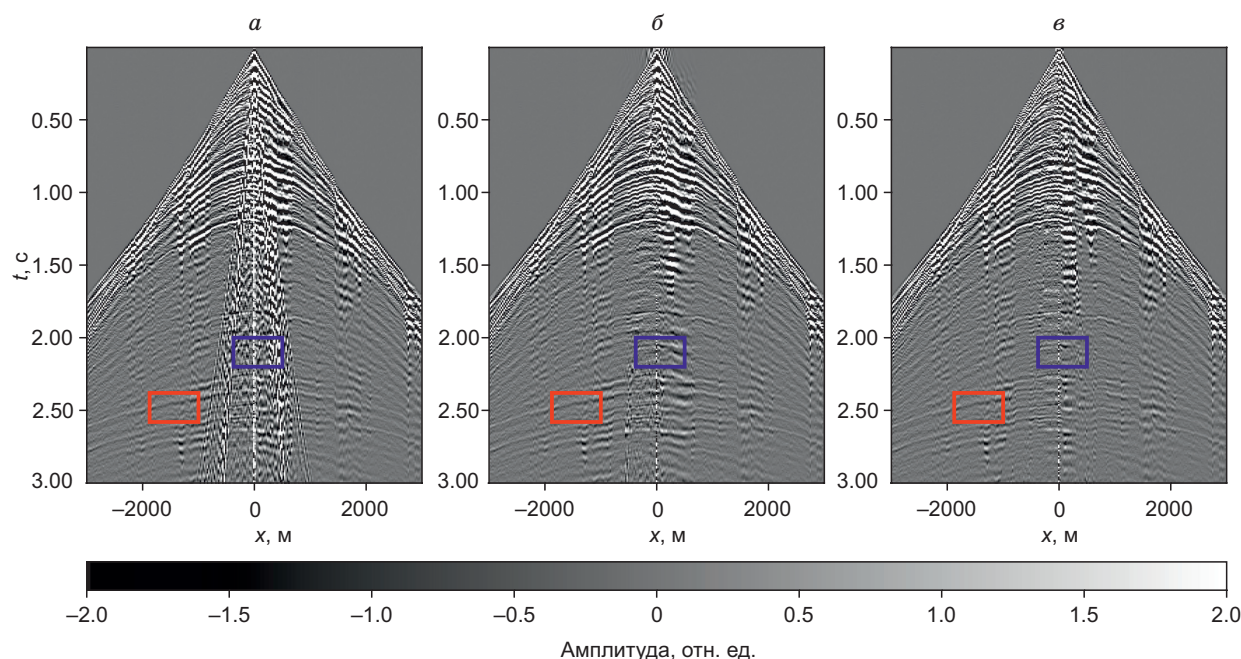


Рис. 9. Пример полевой сейсмограммы общей точки возбуждения (ОТВ):

исходная (а), отфильтрованная алгоритмом SWANA (б) и SKL (в). Красное окно соответствует целевому сигналу (отраженной волне), синее — шуму (поверхностной волне).

Общий недостаток существующих методов подавления поверхностной волны — искажение энергии однократно отраженных волн в зоне интерференции с волной-помехой в случае нахождения волн-помех в области пространственного алиасинга. Ослабление энергии полезного сигнала в определенном диапазоне удалений неизбежно приведет к искажению одной из ключевых характеристик сейсмической записи, а именно AVO/AVA-распределения (амплитуда в зависимости от удаления и амплитуда в зависимости от азимута), что накладывает существенные риски на успешность решения геологических задач, которые были поставлены перед сейсмическим методом на участке исследования.

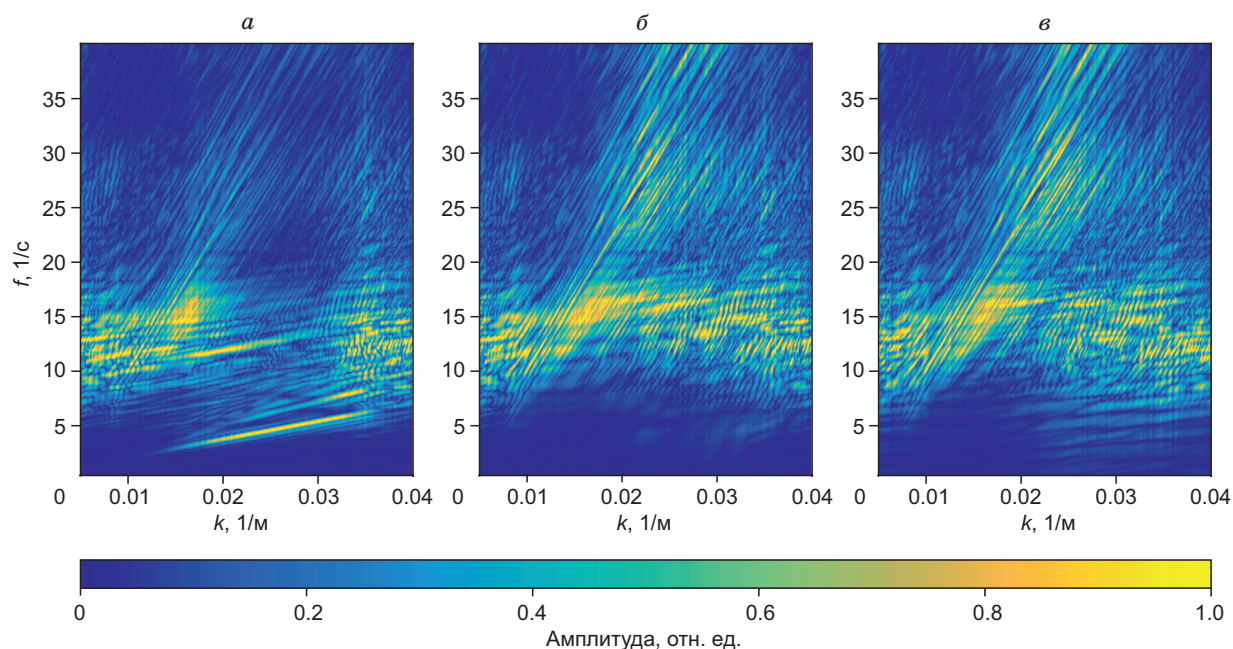


Рис. 10. Спектры в f k -пространстве сейсмограммы до подавления (а), после подавления с помощью SWANA (б) и SKL (в).

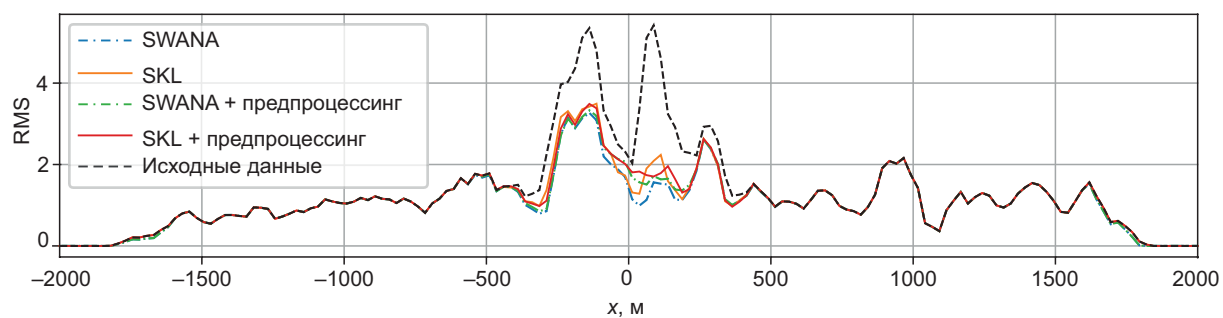


Рис. 11. Графики среднеквадратичной амплитуды каждой трассы в зависимости от удаления (AVO) после различных процедур в окне [1.15; 1.25] с.

Расчет AVO выполнялся после ввода кинематических поправок и мытинга по годографам первых вступлений.

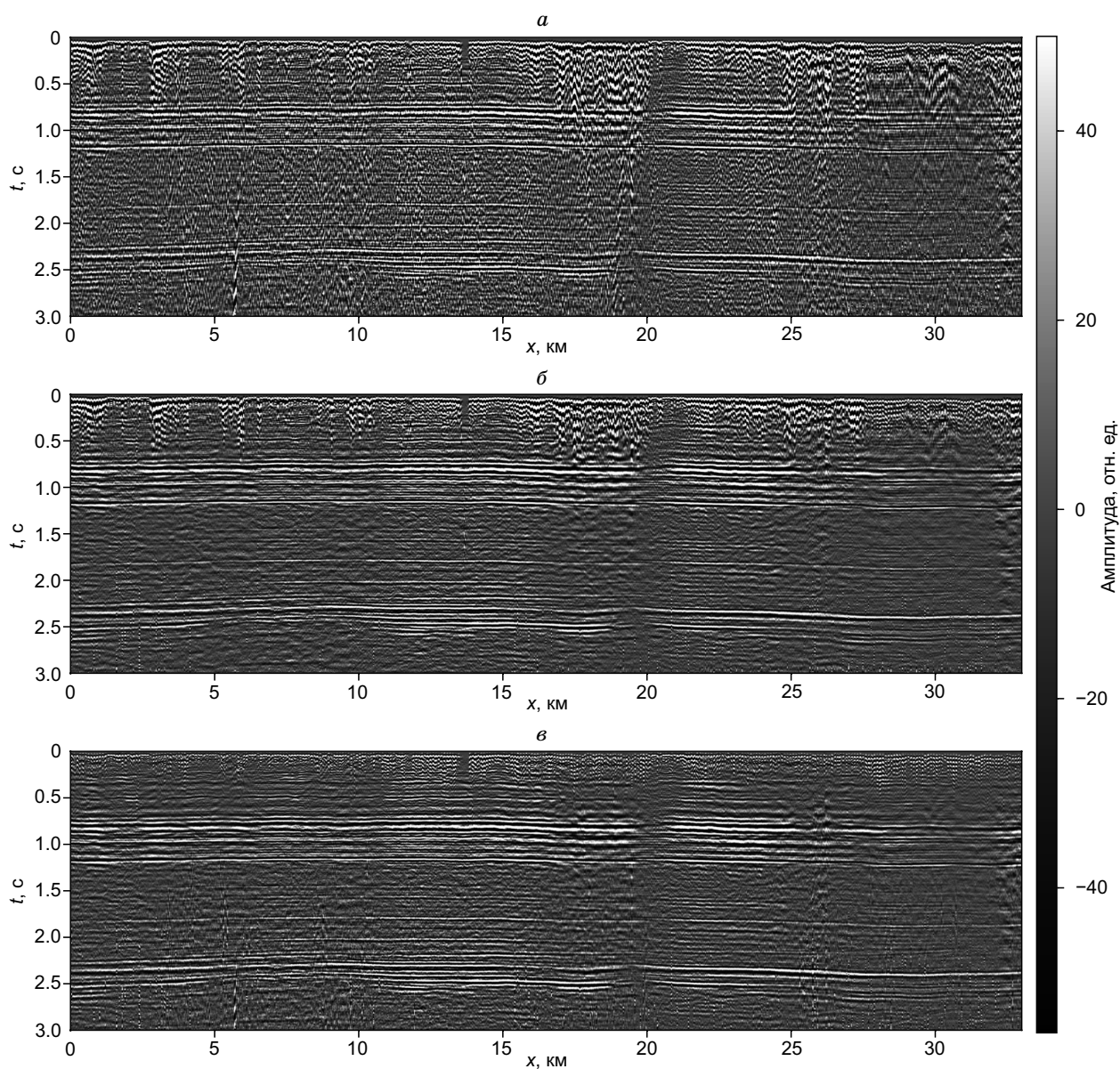


Рис. 12. Временной разрез вдоль сейсмического профиля для исходных данных (а), после подавления поверхностной волны процедурой SWANA (б) и алгоритмом SKL (в).

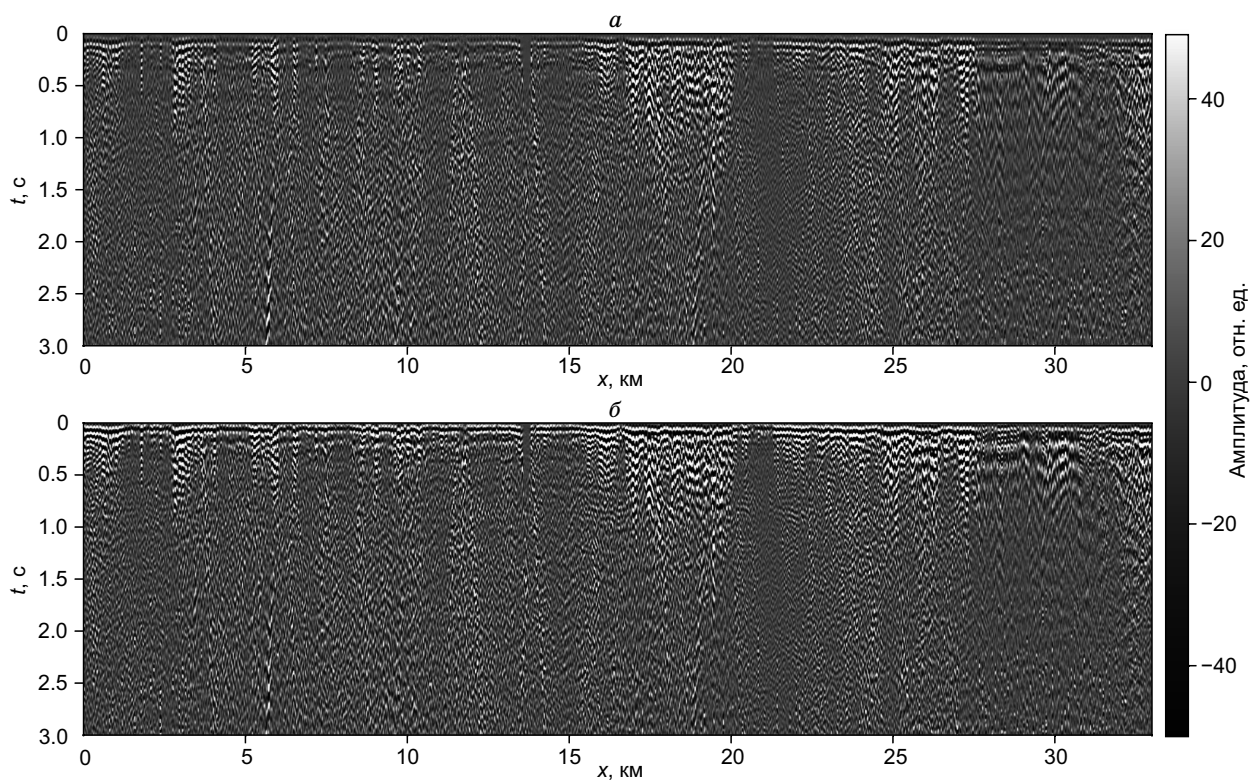


Рис. 13. Разность временных разрезов между исходными данными и данными после подавления поверхностной волны процедурой SWANA (a) и алгоритмом SKL (б).

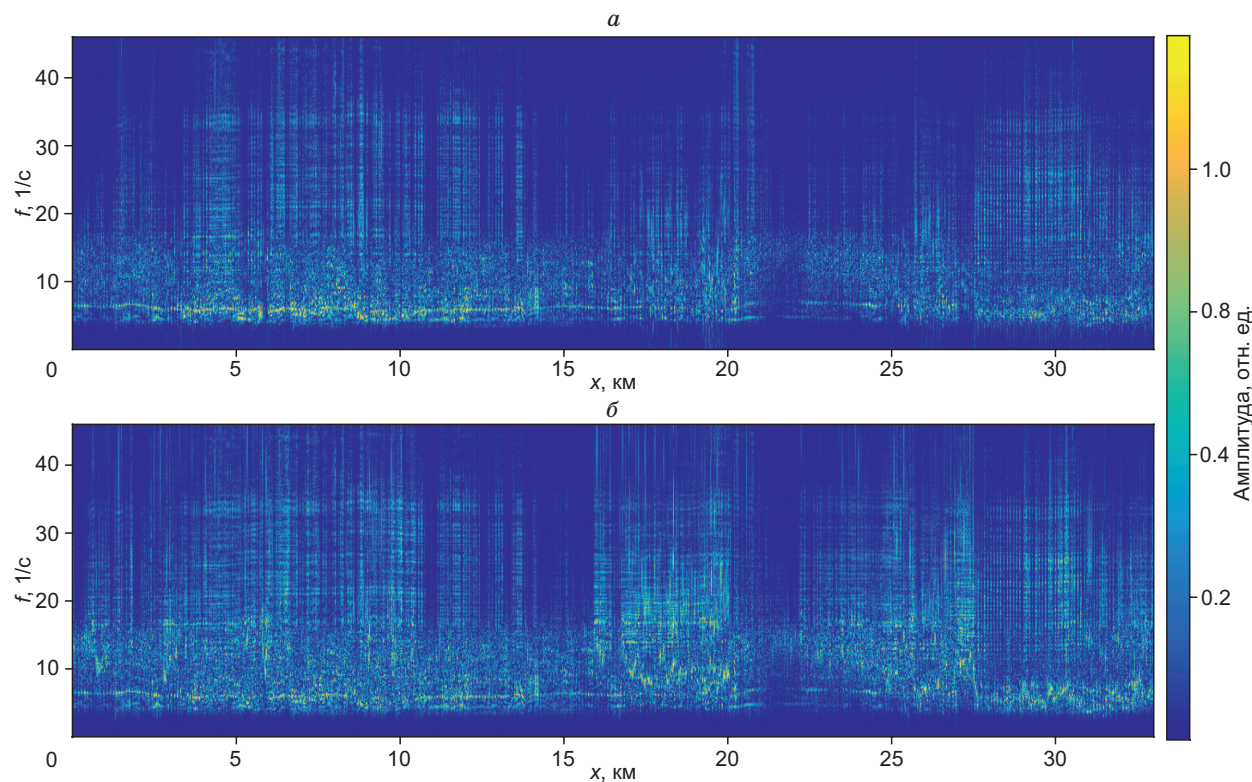


Рис. 14. f_x -спектры разностей временных разрезов между исходными данными и данными после подавления поверхностной волны процедурой SWANA (a) и алгоритмом SKL (б).

В качестве меры контроля искажения амплитуды полезного сигнала выполняется сопоставительный анализ относительного искажения AVO-распределения амплитуд вдоль годографа отраженной волны. Для этого в сейсмограммы вводятся кинематические поправки, спрямляющие сигнал отраженных волн, и мьютинг по годографам первых вступлений. Затем для каждой трассы сейсмограмм рассчитывается среднеквадратическое (RMS) значение амплитуд в окне [1.15; 1.25] с. Таким образом строятся графики AVO (зависимость RMS амплитуды в окне отраженной волны от удаления ПВ-ПП) для исходной сейсмограммы, сейсмограммы после фильтрации с использованием предпроцессинга и без него (рис. 11). Как видно из графиков, наибольшее изменение амплитуд происходит на удалениях до 500 м, поверхностная и отраженная волна пересекаются. Но для обеих процедур подавления (SWANA и SKL) заметно повышение RMS амплитуд после ввода предпроцессинга перед основным этапом подавления.

На рисунке 12 изображены временные разрезы для исходных данных и после обработки в соответствии с вышеизложенным графом. Из анализа временных разрезов следует, что обе процедуры (SWANA и SKL) позволяют добиться приемлемого качества шумоподавления исходных данных. Но при этом очевидны некоторые различия в результатах процедур. Так, SKL (см. рис. 12, в) сильнее подавляет волны-помехи на ранних временах, тогда как на поздних временах присутствует высокочастотный рассеянный шум. При этом SWANA (см. рис. 12, б) менее эффективна на ранних временах, но в основной части разрез «чище».

Для оценки качества подавления поверхностной волны и анализа изменения полезного сигнала были построены разрезы разности между исходным разрезом без шумоподавления и разрезами после применения SKL, SWANA (рис. 13). На разностных разрезах после обеих процедур почти не прослеживается сигнал отраженной волны, что говорит о незначительном изменении полезного сигнала. На рисунке 14 изображены f_x -спектры разностных разрезов, которые также дают возможность оценить уровень удаленного сигнала в частотной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании программно реализован и оптимизирован алгоритм подавления сейсмических поверхностных волн на основе применения метода главных компонент в частотно-временной области — SKL. Модификация алгоритма SKL заключается в разработке нового способа определения статических поправок для спрямления поверхностной волны на фиксированных частотах и в применении набора процедур предпроцессинга, на котором предварительно удаляется сигнал отраженных волн. Этап выбора статических поправок для спрямления поверхностной волны в частотно-временной области оптимизирован за счет перебора групповых скоростей и поиска максимума суммарной амплитуды вдоль наклонов. При этом в процессе разработки нового алгоритма был отмечен рост качества подавления поверхностной волны по сравнению с исходной версией алгоритма. Повышения качества удалось добиться за счет более мелкого шага перебора групповой скорости. Кроме того, исходный алгоритм SKL ускорен путем распараллеливания вычислений на логические ядра процессора, что в 2 раза уменьшает время работы алгоритма в сравнении с последовательной версией (по результатам тестирования на 16 CPU). Эти и другие модификации обеспечили ускорение вычислений и повышение качества подавления поверхностной волны.

В работе показано существенное преимущество разработанного алгоритма по сравнению с базовыми методами фильтрации (ФВЧ и FK -фильтрация) при обработке синтетических данных, рассчитанных численным моделированием. Апробация на полевых данных выполнялась с сопоставлением результатов процедуры SWANA из программного пакета «Geovation 2.0». Сопоставление выполнялось на уровне сейсмограмм, f_k -спектров, AVO-характеристики отраженной волны и временных разрезов. Предложен эффективный граф шумоподавления наземных 2D данных, который помимо основных процедур подавления включает этап предпроцессинга с вводом кинематических поправок и удаления сигнала отраженных волн. Алгоритм SKL показывает качественно сопоставимый результат подавления при меньших временных затратах на подбор оптимальных параметров. Алгоритм SKL имеет только 3 управляемых параметра (граничная частота, минимальная и максимальная скорость) по сравнению с 20 параметрами, отвечающими за моделирование и подавление поверхностной волны процедуры SWANA.

Дальнейшее развитие алгоритма SKL направлено на его адаптацию для обработки 3D данных сейсморазведки.

Исследование выполнено при поддержке совместного гранта Российского научного фонда и правительства Новосибирской области № 23-27-10042, <https://rscf.ru/project/23-27-10042/>.

ЛИТЕРАТУРА

Al-Heety A.J.R., Thabit H.A. Random and coherent noise attenuation for 2D land seismic reflection line acquired in Iraq//NRIAGJ. Astron. Geophys., 2022, v. 11 (1), p. 337—354, doi: 10.1080/20909977.2022.2118982.

- Ali K.K., Ibraheem R.K., Thabit H.A.** Coherent noise attenuation using AGORA filter on 2D seismic data in East Diwaniya, South Eastern Iraq // *Iraqi J. Sci.*, 2019, v. 60 (5), p. 1049—1054, doi: 10.24996/ijss.2019.60.5.14.
- Arablouei R., Doğançay K.** Affine projection algorithm with variable projection order // 2012 IEEE Int. Conf. Commun. (ICC). IEEE, 2012, p. 3681—3685, doi: 10.1109/ICC.2012.6363637.
- Askari R., Siahkoobi H.R.** Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms // *Geophys. Prospect.*, 2008, v. 56 (1), p. 105—114, doi: 10.1111/j.1365-2478.2007.00659.x.
- Bai J., Yilmaz O.** Model-based surface wave analysis and attenuation // 80th EAGE Conf. and Exhibition 2018. EAGE Publ. BV, 2018, v. 2018 (1), p. 1—5, doi: 10.3997/2214-4609.201801414.
- Bohlen T.** Parallel 3-D viscoelastic finite difference seismic modelling // *Comput. Geosci.*, 2002, v. 28 (8), p. 887—899, doi: 10.1016/S0098-3004(02)00006-7.
- Cejnek M., Vrba J.** Padasip: An open-source Python toolbox for adaptive filtering // *J. Comput. Sci.*, 2022, v. 65, p. 101887, doi: 10.1016/j.jocs.2022.101887.
- Gaždová R., Vilhelm J.** DISECA—A Matlab code for dispersive waveform calculations // *Comput. Geotech.*, 2011, v. 38 (4), p. 526—531, doi: 10.1016/j.compgeo.2011.03.001.
- Jiao S., Chen Y., Bai M., Yang W., Wang E., Gan S.** Ground roll attenuation using non-stationary matching filtering // *J. Geophys. Eng.*, 2015, v. 12 (6), p. 922—933, doi: 10.1088/1742-2132/12/6/922.
- Liu Z., Chen Y., Ma J.** Ground roll attenuation by synchrosqueezed curvelet transform // *J. Appl. Geophys.*, 2018, v. 151, p. 246—262, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.02.016.
- Naghizadeh M., Sacchi M.** Ground-roll attenuation using curvelet downscaling // *Geophysics*, 2018, v. 83 (3), p. V185—V195, doi: 10.1190/geo2017-0562.1.
- Serdyukov A.S.** Ground-roll extraction using the Karhunen-Loeve transform in the time-frequency domain // *Geophysics*, 2022, v. 87 (2), p. A19—A24, doi: 10.1190/geo2021-0453.1.
- Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D.** Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*, 2019, v. 84 (1), p. A19—A24, doi: 10.1190/geo2018-0430.1.
- Strobbia C., Zarkhidze A., May R., Quigley J., Bilsby P.** Attenuation of aliased coherent noise: model-based attenuation for complex dispersive waves // *First Break*, 2011, v. 29 (8), p. 93—100, doi: 10.3997/1365-2397.29.8.52130.
- Verma S., Guo S., Ha T., Marfurt K.J.** Highly aliased ground-roll suppression using a 3D multiwindow Karhunen-Loève filter: Application to a legacy Mississippi Lime survey // *Geophysics*, 2016, v. 81 (1), p. V79—V88, doi: 10.1190/geo2014-0442.1.
- Yuan Y., Si X., Zheng Y.** Ground-roll attenuation using generative adversarial networks // *Geophysics*, 2020, v. 85 (4), p. WA255—WA267, doi: 10.1190/geo2019-0414.1.