

ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДОЛЖЕНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА В МЕТОДЕ ВСП

А.А. Табаков, А.В. Баев, И.Е. Солтан, В.Н. Ференци,
А.В. Беленова, А.В. Копчиков, Л.В. Севастьянов

SOME FEATURES OF ANALYTICAL EXTENSION FOR EXPANDING OF USEFUL PART OF SPECTRA IN VSP

А.А. Tabakov, A.V. Baev, I.E. Soltan, V.N. Ferency,
A.V. Belenova, A.V. Kopchikov, L.V. Sevastyanov

Введение

Introduction

Восстановление высоких и низких частот – важный вопрос для различных прикладных задач ВСП, таких как предсказание акустического импеданса ниже забоя ствола скважины и экстраполяция каротажных данных вдали от скважины. Предлагается итеративный алгоритм для восстановления спектра импульсной сейсмограммы ВСП, являющийся численным методом аналитического продолжения. Рассматриваются численные результаты для модельных и реальных данных ВСП. Кроме того, исследуется сходимость метода.

Основания для построения и практического применения предлагаемого метода:

- полная форма сигнала доступна из падающих волн;
- высокое отношение сигнала к шуму получается благодаря отсутствию поверхностных волн;
- высокие частоты не поглощаются низкоскоростными пластами (зоной малых скоростей);
- спектр трассы ВСП в отсутствие шумов является аналитической функцией, поскольку во временной области трасса ограничена слева точкой первого вступления, а справа быстро затухает;
- точные априорные ограничения могут быть взяты из модели, полученной для каротажных данных скважины и примененной к исходной записи ВСП.

Restoration of high and low frequencies is an important problem to be solved for VSP data in many applications such as prediction of acoustic impedance beneath the bottom of hole and extrapolation of log data away from the well. An iterative algorithm is proposed for estimation of full spectrum of VSP pulse seismogram. The method is based on an analytical extension of spectrum. The computing results for simulated and real VSP data are discussed. Besides, the method convergence is investigated.

The reasons for applying of proposal method are:

- the full wave form of signal is available from downgoing waves.
- high signal to noise ration is due to absence of surface waves.
- high frequencies are not absorbed by weathering layer.
- spectrum of VSP trace is close to analytic function, because in time domain the trace is limited from the left by the first break point and quickly attenuates to the right.
- strong a priori limitations may be available from model produced from log data in the well and applied to starting part of the VSP record.

Метод аналитического продолжения для расширения полезной части спектра в методе ВСП

Method of analytical extension for expanding of useful part of spectra in VSP

Метод итеративной регуляризации [3] разработан для минимизации выпуклого функционала при ряде ограничений. Важной особенностью метода является его устойчивость к помехам.

Его применение к решению интегрального уравнения свертки $Az = f$ приводит к алгоритму

$$z_{n+1} = \frac{1}{1+\varepsilon_n} P_G z_n - \beta A^*(A z_n - f) \quad (1)$$

z_n – приближенное решение на n -ом шаге (approximate solution on n -th step),
 A – оператор свертки (convolution operator), f – известная реализация процесса свертки (known realization of convolution process), P_G – оператор проектирования на ограниченную область G (operator of projecting to area of constraints),
 $\beta > 0$, $\varepsilon_n > 0$ – параметры алгоритма (parameters of algorithm).

В данной задаче для получения идеальной импульсной сейсмограммы из записей ВСП выражение (1) можно записать следующим образом

(In the discussed problem of estimation the ideal pulse seismogram from VSP records expression (1) may be written as follows):

$$G_{n+1} \stackrel{\omega}{=} \frac{1}{1 + \varepsilon_n} P_M \left[1 - \beta_{S_d} \stackrel{\omega}{G_n} \right] \stackrel{\omega}{G_n} + \beta_{S_u} \stackrel{\omega}{G_n}$$

- $S_d \stackrel{\omega}{\omega}$ – падающая волна после деконволюции (deconvolved downgoing wave),
- $S_u \stackrel{\omega}{\omega}$ – сейсмограмма после деконволюции (deconvolved seismogram),
- $G_n \stackrel{\omega}{\omega}$ – полученный полный спектр на n -ой итерации (estimated full spectrum on n -th iteration),
- P_M – оператор проектирования на ограниченную область M (operator of projecting to area of constraints M),
- β – весовой параметр исходного спектра (weight of original spectrum),
- ε_n – параметр регуляризации (regularization parameter).

Реальная процедура включает в себя наложение ограничения на амплитуды во временной области. Например, это может быть обнуление значений сейсмограммы (после деконволюции) до первых пиков в трассах ВСП или априорные ограничения по модели. В частотной области это изменит каждую частотную компоненту. Следующее приближение импульсной сейсмограммы получается путем обратного преобразования Фурье взвешенной суммы исходного спектра и спектра, к которому применено ограничение проектирования. Итеративная процедура повторяется до тех пор, пока сейсмограмма не будет соответствовать всем ограничениям.

Real procedure includes application of restrictions to amplitudes in time domain. For example it may be zero values of deconvolved seismogram before first spike of deconvolved VSP trace. In frequency domain this will change every frequency component. The next estimate of pulse seismogram is obtained by inverse Fourier transform of weighted sum of original spectrum and spectrum of seismogram with projection constraints applied. The iterative procedure is repeated until seismogram corresponds to all constraints.

Экспериментальные результаты. Computing results

Модельные данные

Model data

Для этой модели было получено волновое поле с доминирующей частотой 40 Гц, к трассам которого добавлен белый шум порядка 2.5% от энергии трасс.

Обработка данных включает в себя разделение волн в исходном поле, оптимальную деконволюцию (параметр регуляризации – 0.001), а также аналитическое продолжение спектра с априорными ограничениями, полученными согласно модели.

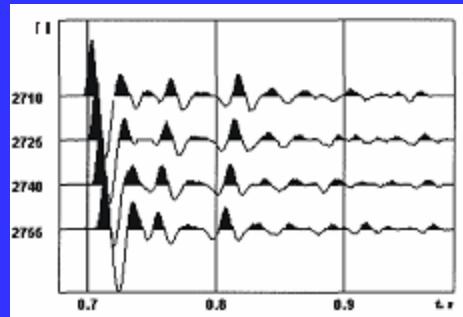


Рис.1 Модельные данные + 2.5% шума (Model data + 2.5% white noise)

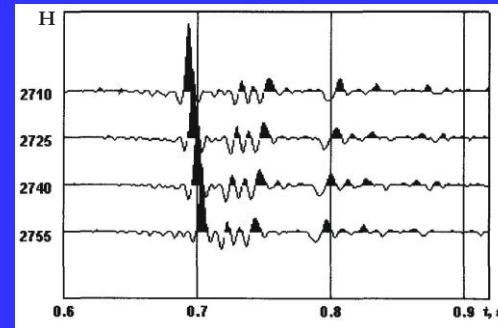


Рис.2 Трассы после деконволюции (deconvolved tracks)

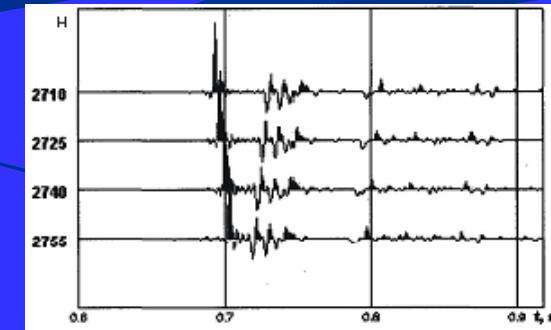


Рис.3 Трассы после продолжения спектра (analytically extension tracks)

Аналитическое продолжение спектров

Analytical extension for expanding of useful part of spectra

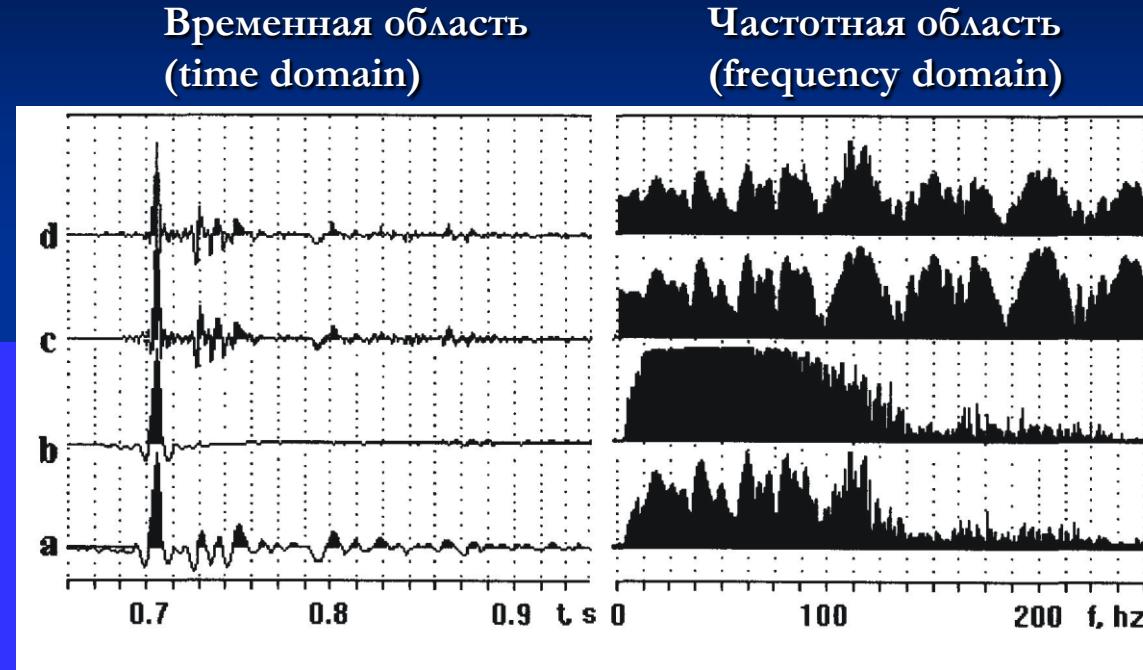


Рис. 4 Аналитическое продолжение спектра для одной модельной трассы во временной и частотной областях (а – модельная трасса после деконволюции, б – падающая волна после деконволюции, с – трасса после аналитического продолжения спектра, д – модельная импульсная сейсмограмма: 0-250 Гц)

Analytical continuation of spectrum for one simulated trace in time and frequency domains. (a- Simulated trace after deconvolution , b - downgoing wave after deconvolution, c - trace after continuation, d - simulated pulse seismogram (0-250 hz).

Реальные данные

Real data

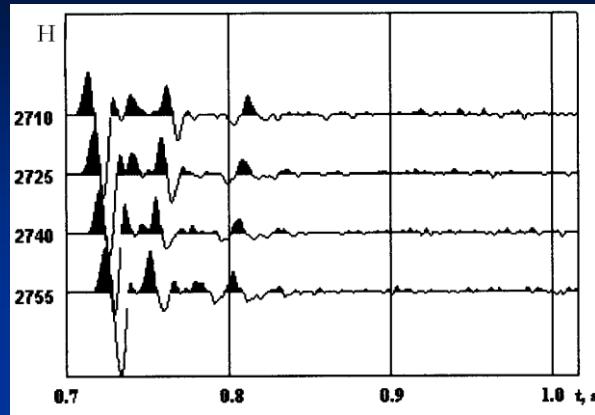


Рис.5 Реальные данные
(Real data)

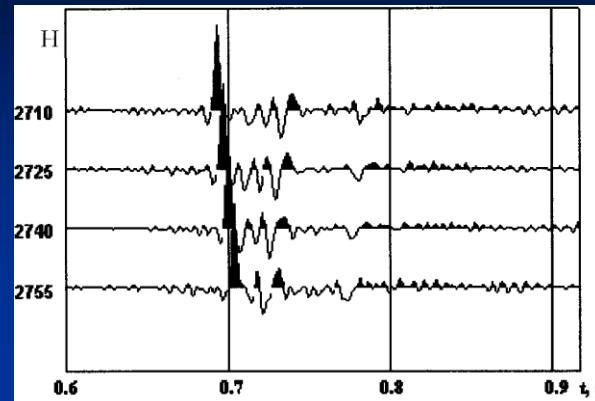


Рис.6 Реальные данные после
деконволюции
(deconvolved real data)

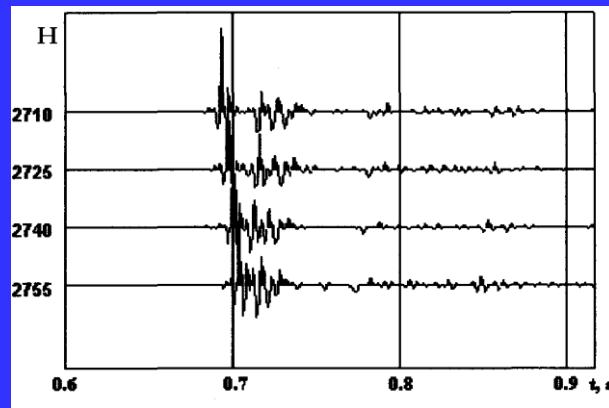


Рис.7 Реальные данные после продолжения
спектров (Real VSP seismogram after extension
of spectra)

Аналитическое продолжение спектров

Analytical extension of spectra

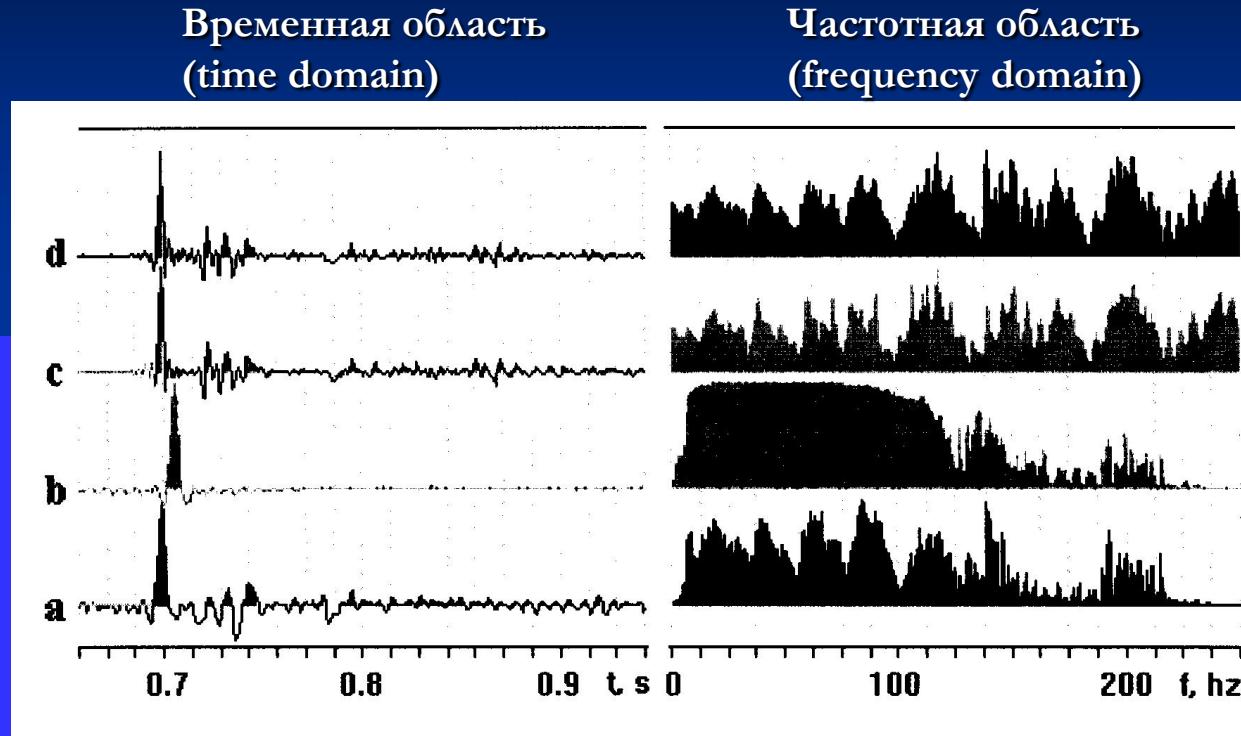
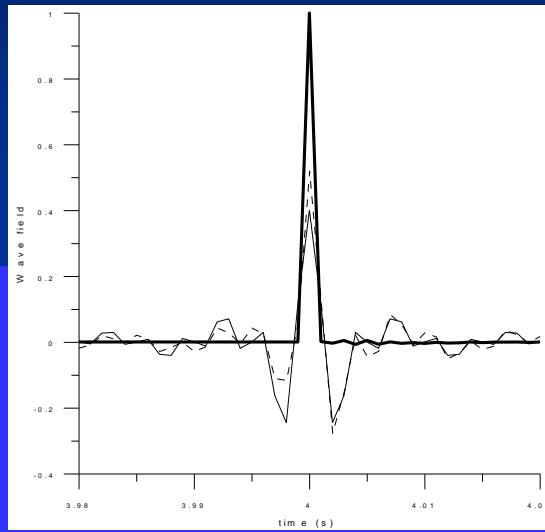


Рис. 8 Аналитическое продолжение спектра для одной реальной трассы во временной и частотной областях (а – реальная трасса после деконволюции, б – падающая волна после деконволюции, с – трасса после аналитического продолжения спектра, д – реальная импульсная сейсмограмма: 0-250 Гц)

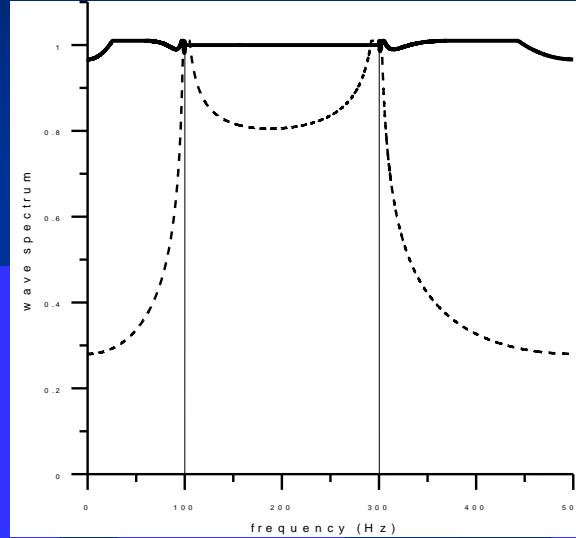
Analytical continuation for one real trace in time and frequency domains. a - real trace after deconvolution, b - downgoing wave after deconvolution, c - trace after continuation, d - simulated pulse seismogram (0-250 hz).

Исследование метода аналитического продолжения спектра для одного импульса

Investigation of method of analytical extension of spectrum for one impulse.



a

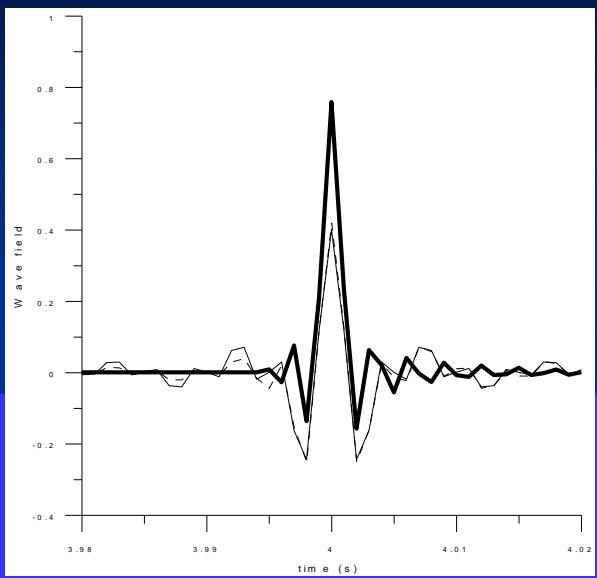


b

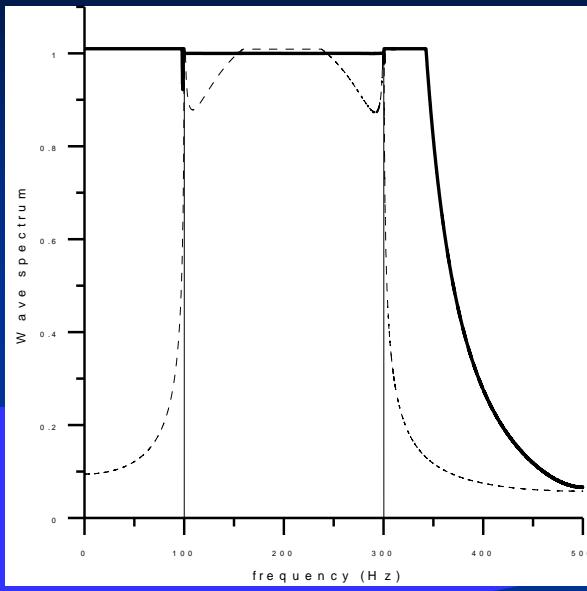
— — — — — È ñòðíàëíà ï íåéå / à ñòðíðíû è ïíåéëðð
initial wave field / frequency spectrum
— — — — — Ä îëíàïà ï íåéå / à ñòðíðíû è ïíåéëðð ï íåéå 1-îé è ðåðàëëè
Wave field / frequency spectrum after 1-st iteration
— — — — — Ä îëíàïà ï íåéå / à ñòðíðíû è ïíåéëðð ï íåéå 1.000.000 è ðåðàëëè
Wave field / frequency spectrum after 1.000.000 iterations

Рис.9 Волновое поле (а) и его частотный спектр (б) для нулевой задержки по времени и при ограничении по амплитуде спектра 1.01.

Wave field (a) and its frequency spectrum (b) for zero time shift and spectrum restriction - 1.01.



a



b

—	È ñòíàéíà ëèá / ÷àñòíðíû è ñíåéðð
— — —	initial wave field / frequency spectrum
—	À íåéíàéíà ëèá / ÷àñòíðíû è ñíåéðð ëíñèá 1-í è ðåäðàöè
— — —	Wave field /frequency spectrum after 1-st iteration
—	À íåéíàéíà ëèá / ÷àñòíðíû è ñíåéðð ëíñèá 1.000.000 è ðåäðàöè
— — —	Wave field/frequency spectrum after 1.000.000 iterations

Рис.10 Волновое поле (а) и его частотный спектр (б) для задержки по времени 5 мс и при ограничении по амплитуде спектра 1.01.

Wave field (a) and its frequency spectrum (b) for 5ms time shift and spectrum restriction - 1.01.

Коэффициенты корреляции

Correlation coefficients

Задержка	Номер итерации	Коэффициент корреляции
0 мс	0	0.632571
	1	0.770474
	100	0.992654
	10.000	0.999747
	1.000.000	0.999878
5 мс	0	0.632764
	1	0.655513
	100	0.699955
	10.000	0.838285
	1.000.000	0.885353
10 мс	0	0.632764
	1	0.644535
	100	0.678644
	10.000	0.717156
	1.000.000	0.766574
20 мс	0	0.632764
	1	0.638657
	100	0.659555
	10.000	0.677834
	1.000.000	0.704128
40 мс	0	0.632764
	1	0.635675
	100	0.646311
	10.000	0.659359
	1.000.000	0.668884

Восстановление обнуленной
части спектра

100%

69%

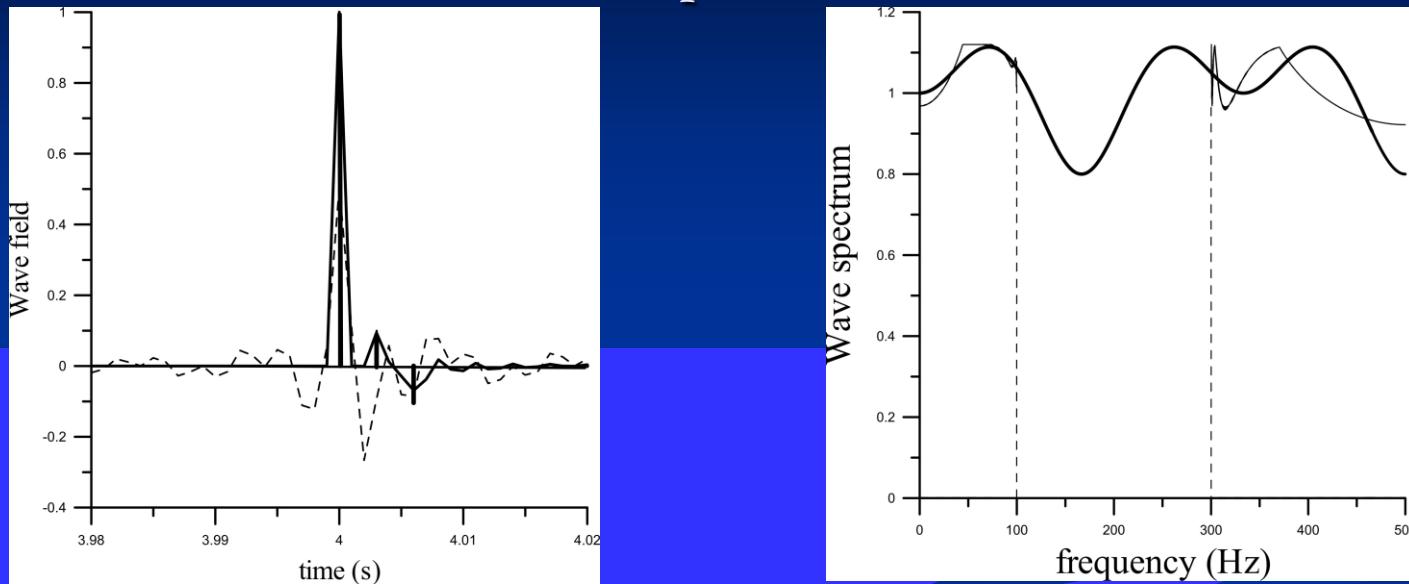
36%

19%

10%

Исследование метода аналитического продолжения спектра для трех импульсов

Investigation of method of analytical extension of spectrum for three impulses.



a

b

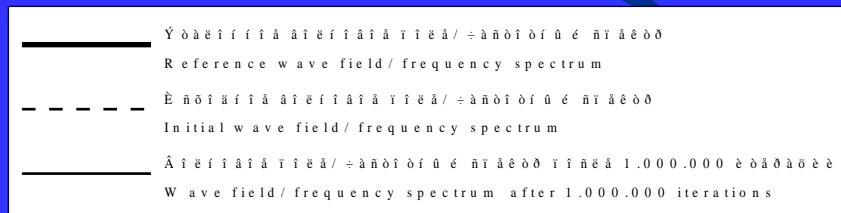


Рис.11 Волновое поле (а) и его частотный спектр (б) для нулевой задержки по времени и при ограничении по амплитуде спектра 1.01 для 3-х импульсов .

Wave field (a) and its frequency spectrum (b) for zero time shift and spectrum restriction 1.01 for three impulses.

Выводы Conclusions

- Приведенные результаты подтверждают возможность расширения спектра одиночной трассы ВСП с помощью аналитического продолжения спектра до 250 Гц при наличии априорных ограничений, полученных по данным ГИС и при уровне шумов 2.5%. Этот результат конкурирует с результатами оптимальной деконволюции и накапливания при плотностях наблюдений 6 трасс/метр без использования априорных ограничений по данным ГИС.

Reduced results confirm an opportunity for spectrum expansion of one track VSP with help of analytical spectrum extension up to 250 Hz in the presence of a priori restrictions from LOG and 2.5% noise level. These results compete with optimal deconvolution results and accruals with observation's densities about 6 tracks per meter without using an a priori restrictions from LOG .
- При отсутствии априорных ограничений по данным ГИС использованный итеративный алгоритм аналитического продолжения спектра позволяет с интервала 100-300 Гц восстановить до 70% энергии в неизвестной части спектра шириной 0-500 Гц на удалениях до 10 мс, что дает возможность оценивать близкие отражения в зоне, обычно закрытой побочными экстремумами падающей волны после деконволюции.

Without a priori restrictions from LOG iterative algorithm of analytical spectrum extension used allows us to restore about 70 % energy of unknown part of spectrum from frequency interval 100-300 Hz up to 0-500 Hz on the distance up to 10ms. It gives us a chance to evaluate close reflections in area usually overlap by secondary extremum of deconvolved downgoing wave.
- Низкие частоты (до нуля) восстанавливаются лучше, чем высокие.

Low frequencies (before zero) are restored better than high frequency.

Литература

1. Е.И. Гальперин. Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты. 199 Galperin E.I. Vertical seismic profiling: experience and results. 1994.
2. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. 1984. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya., Methods of solution of incorrect problems. 1984.
3. А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. 1989. Bakushinsky A.B. and Goncharsky A.V. Incorrect problems. Numerical methods and applications. 1989