

**Разработка модуля для определения
параметров поглощения сейсмических волн по
данным вертикального сейсмического
профилирования**

Царапкин Михаил Евгеньевич

Научный руководитель:
зав. лаб. 556 ИНГГ СО РАН
Сергей Борисович Горшкалёв

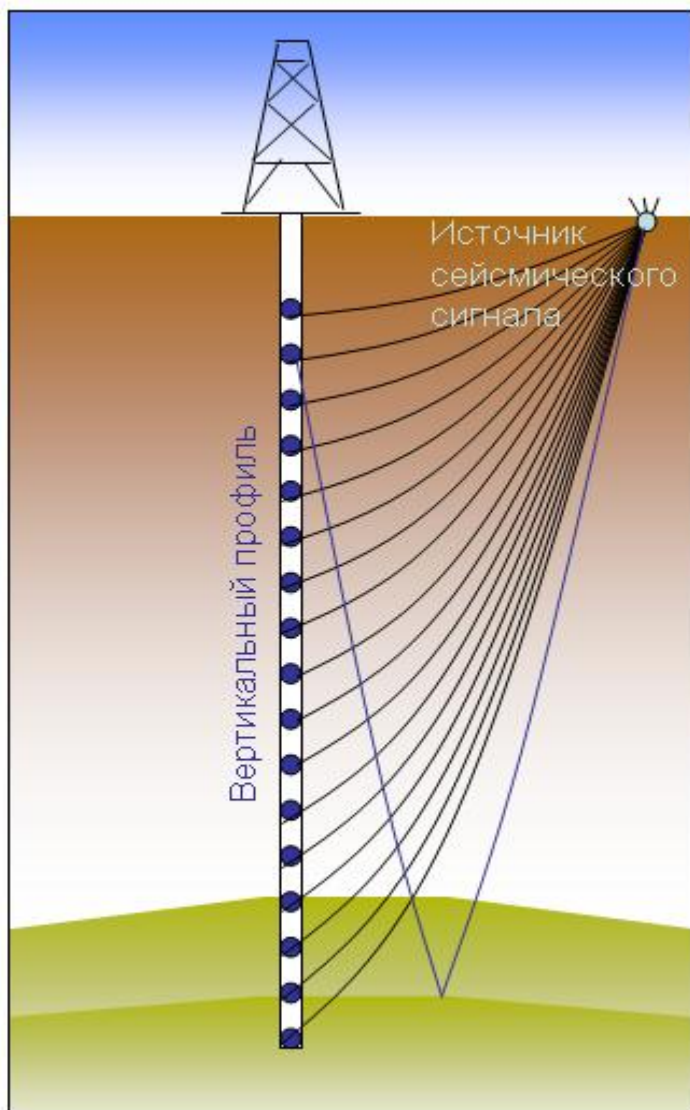
Цель работы

Проектирование и реализация программного средства, позволяющего определять параметр поглощения сейсмических волн по данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП), имеющего вид встраиваемого модуля для системы VSPLab.

Требования к программному средству:

- 1) Программное средство должен предоставлять пользователю возможность анализировать распределение параметра поглощения вдоль ствола скважины и получать его оценки в выделенных слоях.
- 2) Должна быть соблюдена неизменяемость и целостность входных данных. В ходе своей работы процедуры не должны изменять исходные данные ВСП. Регистрация данных ВСП трудоемка, поэтому пользователь не должен иметь возможности вносить изменения в исходные данные.

Метод вертикального сейсмического профилирования



Достоинство метода:

Волны регистрируются непосредственно в среде распространения.

Типичная схема наблюдений ВСП на суше включает в себя ближний пункт возбуждения (ПВ) с горизонтальным выносом от устья скважины около 100м, и несколько выносных ПВ с горизонтальным удалением до одной трети глубины скважины, вынесенных в различных направлениях. Пункты приёма (ПП) расположены в скважине с определённым шагом по глубине, обычно 10м.

Модель поглощающей среды

Решением волнового уравнения для упругой среды являются плоские монохроматические волны следующего вида:

$$U(z, t, \omega) = U_0(\omega)e^{i[\omega t - k(\omega)z]} \quad (1)$$

где $U(z, t, \omega)$ — смещение, создаваемое плоской волной с угловой частотой ω и волновым числом $k(\omega)$, и регистрируемое на глубине z в момент времени t , $U_0(\omega)$ — амплитуда в источнике.

В поглощающей среде вследствие рассеивания энергии амплитуда волны убывает по мере ее распространения, и, согласно экспериментальным данным уменьшение амплитуды с расстоянием z происходит по экспоненте: $e^{-\alpha z}$, где α — это коэффициент поглощения.

Выражение (1) с учетом поглощения:

$$U(z, t, \omega) = U_0(\omega) \cdot e^{-\alpha(\omega)z} \cdot e^{i[\omega t - k(\omega)z]} \quad (2)$$

Параметры поглощения

1) **Коэффициент поглощения** α показывает уменьшение амплитуды плоской волны, распространяющейся вдоль оси z с увеличением глубины:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{u(z_0)}{u(z)}\right)}{z - z_0}$$

$u(z)$ — амплитуда волны на глубине z
 z_0 - глубина источника

2) **Добротность** связана с потерей энергии волны:

$$Q = \frac{2\pi \cdot W_{max}}{\Delta W} \approx \frac{\pi}{\alpha\lambda} = \frac{\pi f}{\alpha c} = \frac{\omega}{2\alpha c}$$

где W_{max} — максимальная энергия, переносимая волной в цикле колебаний, ΔW — плотность энергии рассеянная в цикле колебания. Чем меньше поглощение среды, тем больше добротность.

где f — частота колебаний, $c(\omega)$ — скорость волны.

Метод спектральных отношений

При наблюдении методом ВСП амплитудный спектр падающей волны может быть представлен выражением вида:

$$A(z, f) = A_0(f)G(z)e^{-\alpha(f)z} = A_0(f)G(z)e^{-\frac{\pi fz}{Q(f)c(f)}} \quad (3)$$

где $A_0(f)$ амплитудный спектр исходного сигнала, а $G(z)$ описывает все частотно-независимые изменения спектра.

Сделаем предположение, что добротность и скорость слабо зависят от частоты, тогда логарифм отношения амплитудных спектров $R(z_1, z_2, f)$ сигналов на двух глубинах z_1 и z_2 может быть аппроксимирован прямой:

$$R(z_1, z_2, f) = \ln \left(\frac{A(z_2, f)}{A(z_1, f)} \right) \approx \ln \left(\frac{G(z_2)}{G(z_1)} \right) - f \cdot \frac{\pi(z_2 - z_1)}{cQ} = h(z_1, z_2) - f \cdot k(z_1, z_2) \quad (4)$$

$$Q(z_1, z_2) = \frac{\pi(z_2 - z_1)}{-k(z_1, z_2)c} = \frac{\pi(t_2 - t_1)}{-k(z_1, z_2)} \quad (5)$$

t_1 и t_2 — времена первых вступлений падающей волны на глубинах z_1 и z_2 , соответственно.

Модифицированный метод спектральных отношений

Найдем k из выражения (4) при помощи метода наименьших квадратов:

$$L = \sum_i [R(z_1, z_2, f_i) - h(z_1, z_2) + k(z_1, z_2 \cdot f_i)]^2 \rightarrow \min_{k, h} \quad (6)$$

$$\begin{cases} -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial k} = \sum_i (R(z_1, z_2, f) - h(z_1, z_2) + k(z_1, z_2 \cdot f_i)) \cdot f_i = 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial h} = \sum_i (R(z_1, z_2, f) - h(z_1, z_2) + k(z_1, z_2 \cdot f_i)) = 0 \end{cases}$$

$$k(z_1, z_2) = \frac{\sum_i f_i \cdot \sum_i R(z_1, z_2, f_i) - m \cdot \sum_i R(z_1, z_2, f_i) \cdot f_i}{m \cdot \sum_i f_i - (\sum_i f_i)^2} \quad (7)$$

С другой стороны, $R(z_1, z_2, f) = \ln(A(z_2, f)) - \ln(A(z_1, f))$. Введём обозначение:

$$R(z, f) = \ln(A(z, f))$$

$$\bar{k}(z) = \frac{m \cdot \sum_i R(z, f_i) \cdot f_i - \sum_i f_i \cdot \sum_i R(z, f_i)}{m \cdot \sum_i f_i - (\sum_i f_i)^2}, \quad (8)$$

тогда справедливо равенство:

$$k(z_1, z_2) = \bar{k}(z_1) - \bar{k}(z_2) \quad (9)$$

Модифицированный метод спектральных отношений

$\bar{k}(z)$ — накопленное изменение спектра в результате поглощения.

$k(z_1, z_2)$ — интервальное изменение спектра в результате поглощения.

$$Q(z_1, z_2) = \frac{\pi(t_2 - t_1)}{\bar{k}(z_2) - \bar{k}(z_1)} \quad (10)$$

Соответственно, выделяя на графике $\bar{k}(z)$ линейные участки, можно разбить изучаемый интервал на слои с постоянной добротностью $Q = \pi \frac{\Delta t}{\Delta \bar{k}}$, определяемой скоростью изменения параметра $\bar{k}(z)$, где Δt средняя разность времен прихода волны на смежных глубинах по всем их парам из рассматриваемого интервала.

Учитывая, что $\bar{k}(z)$ линейно зависит от z линейно в пределах слоя с постоянной добротностью, выражение (6) примет вид:

$$Q = \pi \frac{\Delta t}{a \cdot \Delta z} \quad (11)$$

если $k(z)$ аппроксимировано линейным трендом $a \cdot z + b$.

Система VSPLab

Для обработки и визуализации данных ВСП в лаборатории многоволновой сейсморазведки ИНГГ СО РАН разработана система VSPLab.

The screenshot displays the VSPLab software interface. The main window shows a seismic data processing window with a plot of seismic data. The plot has a vertical axis labeled 'ZGP' with values from 2370 to 2690 and a horizontal axis with values 800, 850, 900, and 950. A blue waveform is visible, and a red line indicates a specific processing step.

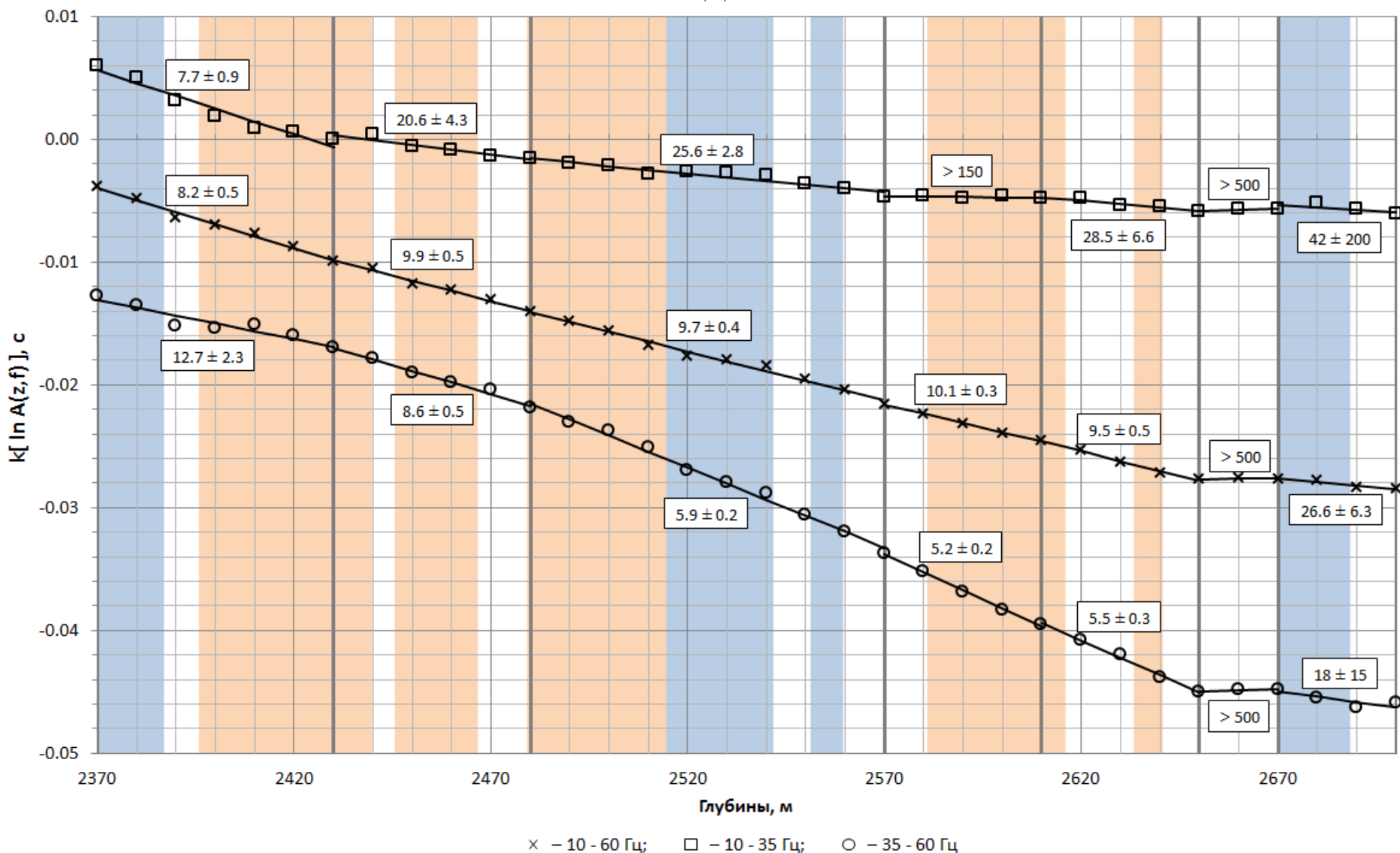
Overlaid on the main window is a dialog box titled "SR Modified Absorption". The dialog box contains the following fields and options:

- Описание: Расчёт коэффициента поглощения
- Параметры:
 - Сейсмограмма: IZ-g-r-n70-w5u-2370-2700.sgr
 - Годограф падающей волны: IZn-fbs-mode
 - Длина окна (мс.): 140
 - Нижняя граница спектра (Гц.): 10
 - Верхняя граница спектра (Гц.): 60
 - Сглаживание: Окно Барлет
 - Длина окна сглаживания (мс.): 5
 - Скоростная модель: velocitymodel
 - Глубина для эталонного спектра: 2370

At the bottom of the dialog box are "OK" and "Cancel" buttons.

The background interface includes a menu bar (Проект, Сейсмограмма, Годограф, Модель, Таблицы, Обработка, Система), a toolbar, and a project manager on the left. The project manager shows a tree view with folders like "Сейсмограммы", "Годографы", "Таблицы усиления", "Таблицы статики", "Таблицы углов", "Таблицы векторов", "Модели", "Операторы", and "Пользовательские таблицы". The status bar at the bottom left shows the date and time: "13 апреля 2013 г. 19:53" and the path "E:_VSPLab0.4\Project\MNSK\velocitymodel".

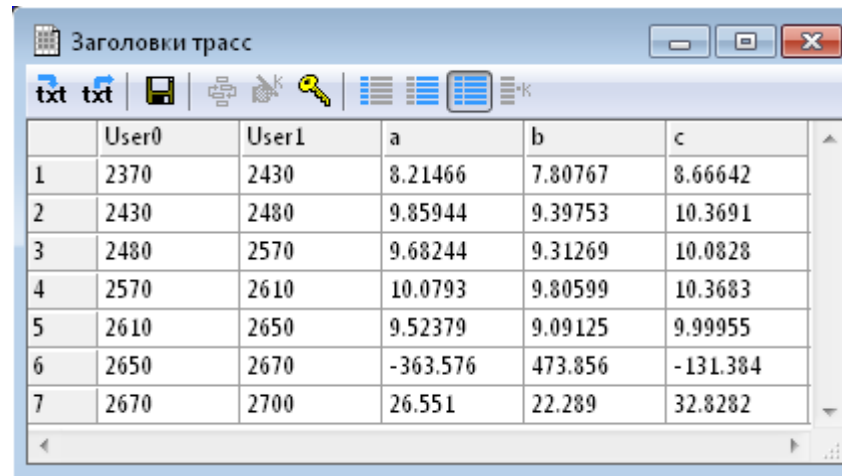
Значения параметра $\bar{k}(z)$, определенные в различных частотных диапазонах



Коричневым цветом выделены газонасыщенные слои, голубым – водонасыщение. Подписаны найденные значения добротности.

Результат работы процедуры

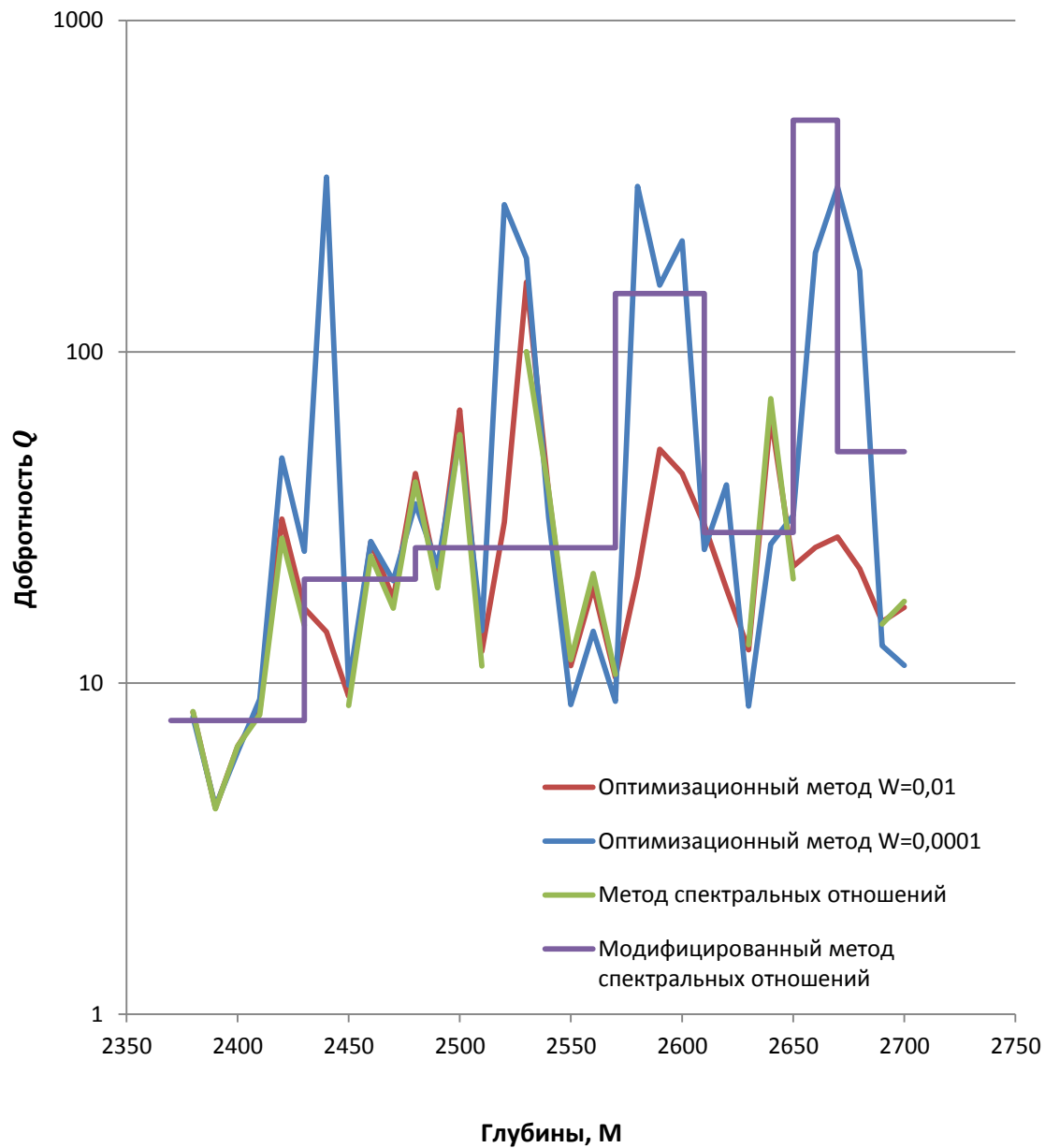
№ слоя	Верхняя граница слоя (м)	Нижняя граница слоя (м)	Q	Q_{min}	Q_{max}
--------	--------------------------	-------------------------	-----	-----------	-----------



Заголовки трасс

	User0	User1	a	b	c
1	2370	2430	8.21466	7.80767	8.66642
2	2430	2480	9.85944	9.39753	10.3691
3	2480	2570	9.68244	9.31269	10.0828
4	2570	2610	10.0793	9.80599	10.3683
5	2610	2650	9.52379	9.09125	9.99955
6	2650	2670	-363.576	473.856	-131.384
7	2670	2700	26.551	22.289	32.8282

Сравнение различных методов определения поглощения



Заключение

Разработан модуль определения поглощения для системы VSPLab, реализующий:

- оптимизационный метод определения поглощения,
- модифицированный метод спектральных отношений.

Сравнительный анализ результатов применения методов определения поглощения показал преимущество модифицированного метода спектральных отношений.

Разработанный модуль используется в Лаборатории многоволновой сейсморазведки ИНГГ СО РАН при обработке данных ВСП.

Определение поглощения позволяет:

- получить дополнительный параметр, характеризующий физические свойства геологических объектов в околоскважинном пространстве.
- более корректно проводить компенсацию поглощения при обработке наземных данных, что даёт возможность повысить разрешённость сейсмических разрезов.

Дальнейшая работа

Графический интерфейс процедур будет доработан по результатам апробации. Обнаруженная зависимость добротности от частоты требует проведения дополнительных исследований и усложнения методов анализа поглощения.

Спасибо за внимание!
Вопросы?

Оптимизационный метод

Логарифмический декремент ϑ показывает уменьшение амплитуды волны на расстоянии равном длине волны λ :

$$\vartheta = \frac{\ln(u(z))}{\ln(u(z + \lambda))} = \alpha\lambda$$

1) Для всех z_k и $z_m > z_k$ определяется кумулятивный логарифмический декремент $\vartheta_{k,m}$, представляющий минимум функции

$$G(\vartheta, \beta(\vartheta)) = \sum_{f=F_1}^{F_2} [A(z_m, f) - \beta \cdot A(z_k, f) \cdot e^{-\vartheta(t_1-t_2) \cdot f}]^2$$

2) Для всех интервалов между соседними приемниками вычисляется интервальный логарифмический декремент ϑ_j .

Минимизируется функционал, содержащий одновременно:

- невязку выражения кумулятивных декрементов через интервальные,
- отклонение решения от начального приближения.

Минимизация выполняется итеративно, пока все ϑ_j не станут лежать в заранее заданном диапазоне. Это обеспечивается последовательным увеличением веса слагаемого, описывающего отклонение решения от начального приближения.

Оптимизационный метод

Bias Absorption [X]

Описание
Расчёт коэффициента поглощения оптимизационным методом

Параметры

Сейсмограмма: 1Z-g-r-n70-w5u-2370-2700.sgr

Годограф падающей волны: 1Zn-fbs-mode ▾

Длина окна (мс.): 140

Нижняя граница спектра (Гц.): 10

Верхняя граница спектра (Гц.): 60

Сглаживание: Окно Барлет ▾

Длина окна сглаживания (мс.): 5

Мин. значение Q: 1

Макс. значение Q: 400

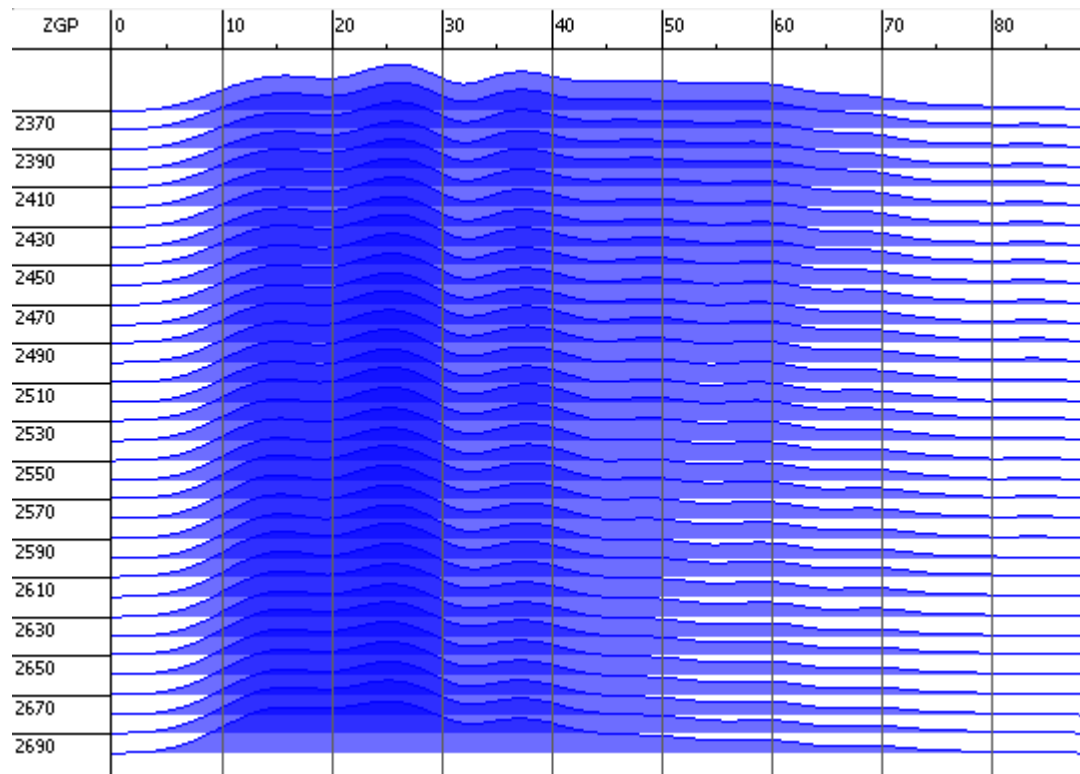
Начальный вес W: 0.01

Глубина для эталонного спектра: 2520

OK Cancel

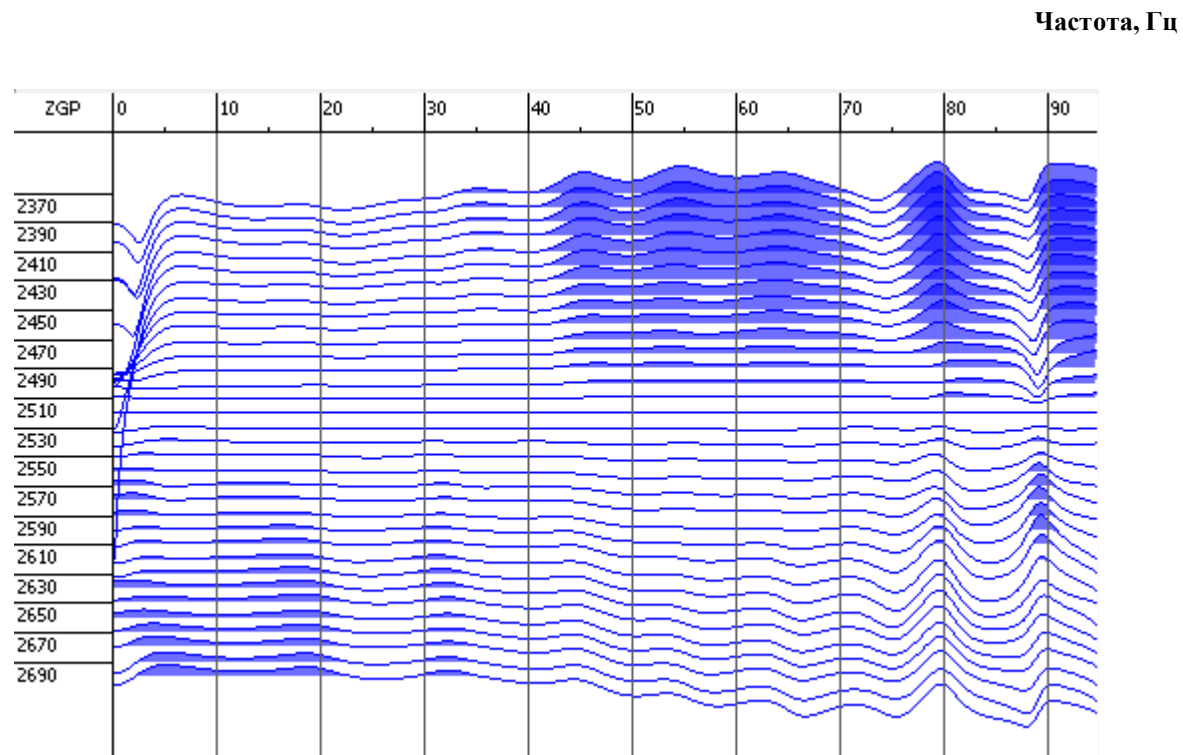
Амплитудные спектры

Частота, Гц



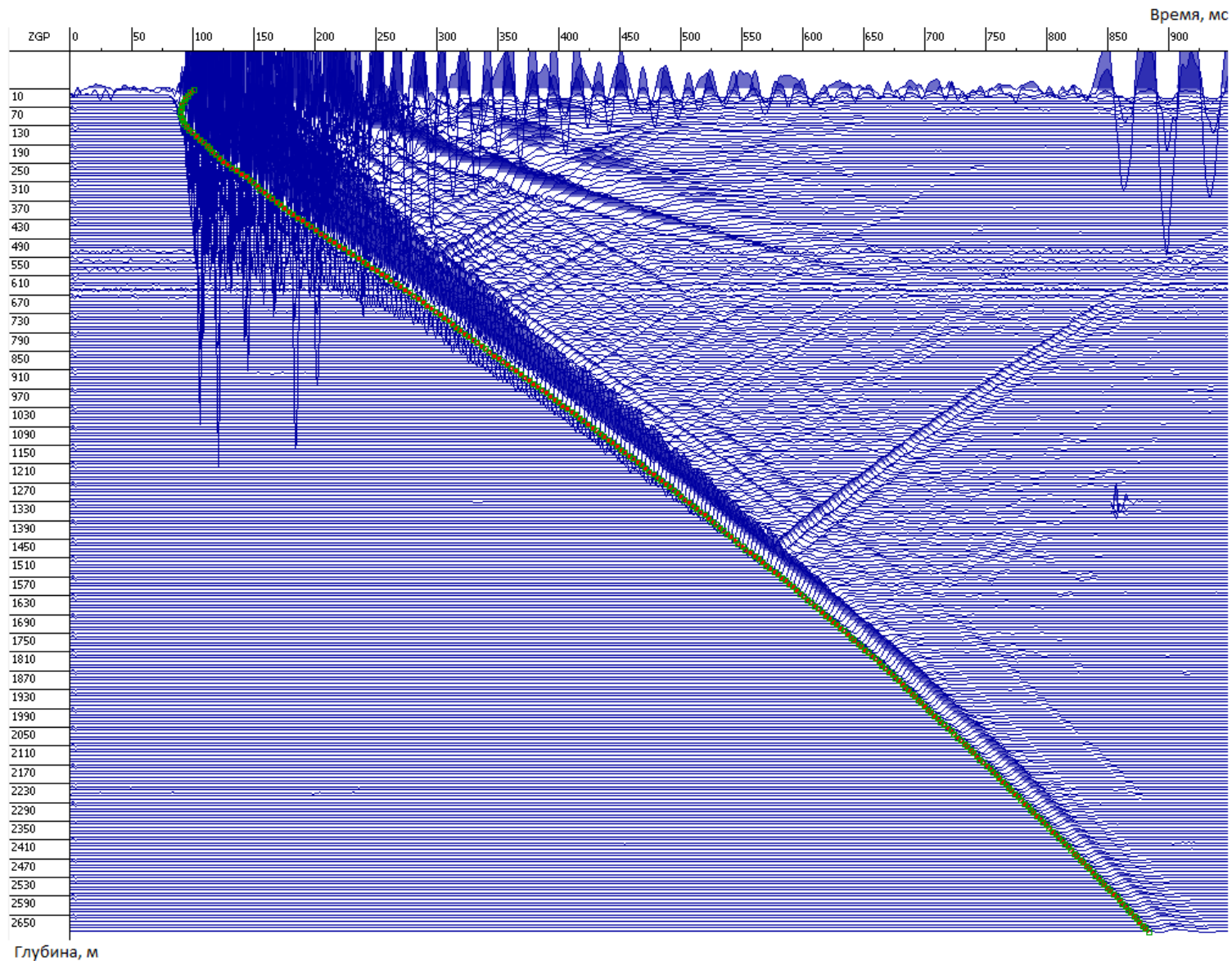
Глубина, м

Разности логарифмов спектров

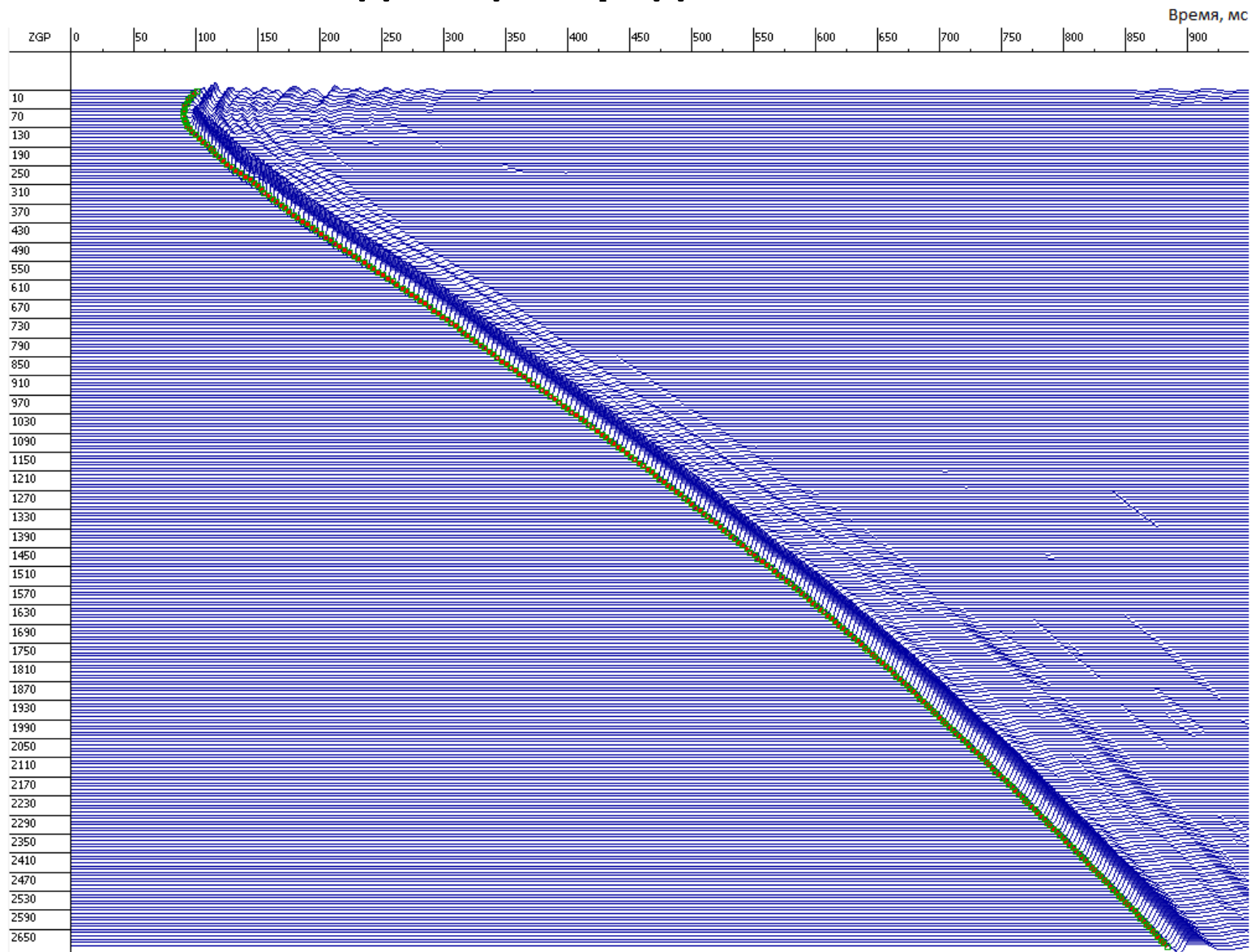


Глубина, м

Плт-830, ПВ1, z-компонента, исходная сейсмограмма



Сейсмограмма после нормировки и выделения поля падающих продольных волн



Глубина, м