

АПОСТЕРИОРНЫЕ АЛГОРИТМЫ В ЗАДАЧАХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Воскобойникова Г. М., Кельманов А.В., Хайретдинов М.С.
Институт вычислительной математики и математической геофизики
СОРАН, Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН

10-я Международная конференция «Интеллектуальная обработка
информации-2014»
о. Крит, 4-11 октября 2014 г

Геофизический мониторинг ставит своей целью регулярное слежение за геодинамическими процессами и событиями в зонах подготовки и развития разрушительных природных и техногенных катастроф. Развитие и совершенствование методов геофизического мониторинга относится к числу приоритетных современных проблем. С ними напрямую связаны методы повышения точности оценивания параметров сейсмических и акустических волновых форм.

Цель работы:

- разработка и исследование помехоустойчивых алгоритмов совместного обнаружения и выделения сейсмических волновых форм, основанных на методах дискретной оптимизации;
- оценивание применимости и эффективности созданных программно-алгоритмических средств для решения практических задач: - нефтепромыслового бурения; сейсмического мониторинга в периоды лунно-солнечных приливов.

Постановка задачи определения координат события

$$\hat{\eta} = \eta(\gamma, \chi) + \varepsilon$$

$\hat{\eta} = (\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N)^T$ – вектор времен пробега сейсмических волн,
 $\eta(\gamma, \chi)$ – N -мерный вектор вычисляемых времен пробега (теоретический
годограф); N – число датчиков.

$\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$ – вектор невязок,

$\chi = (x, y, z, v, t)^T$ – m -мерный вектор оцениваемых параметров,

$\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_N)$ – матрица координат датчиков,

Распределение ошибок $\varepsilon_i = \hat{\eta}(\gamma_i, \chi) - \eta(\gamma_i, \chi)$, $i=1, \dots, N$

где $\varepsilon_i \in \Phi_{0, \sigma_i^2}$ – взаимно независимые случайные величины,

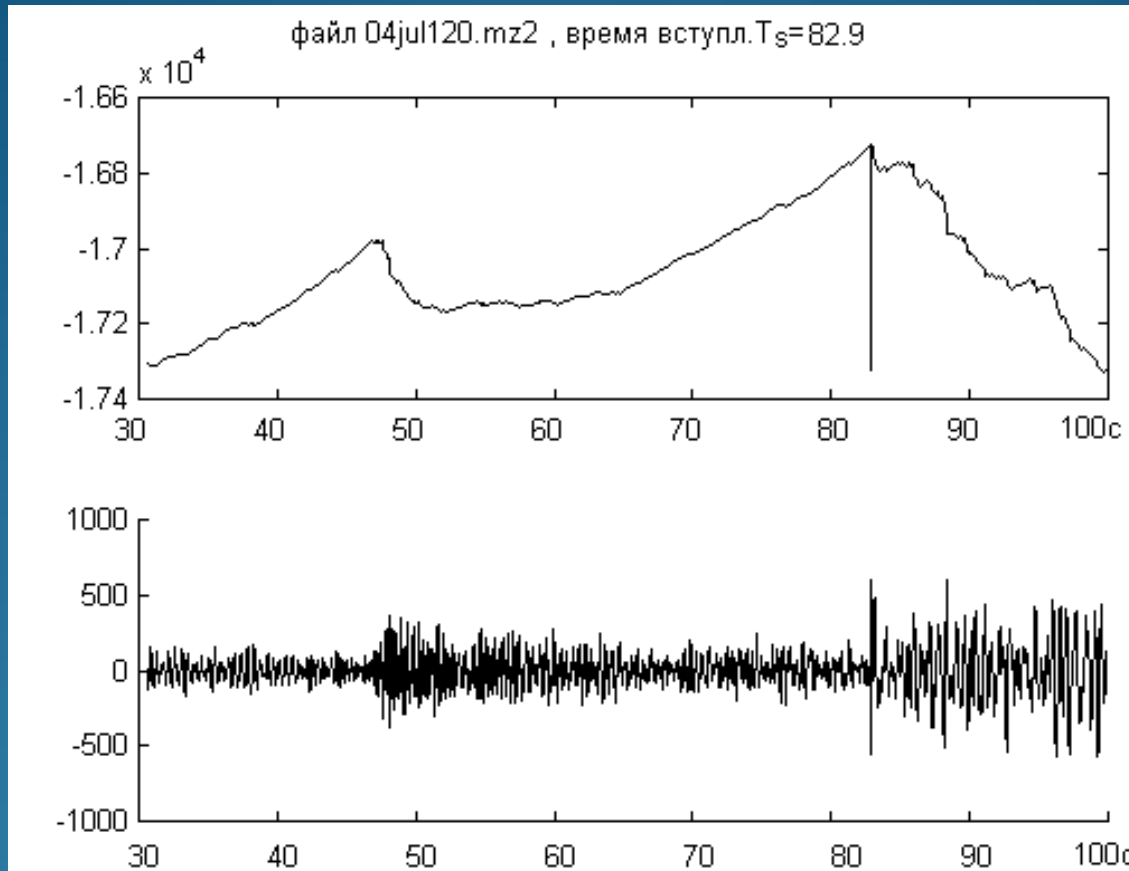
$E \varepsilon_i = 0$, $E \varepsilon_i \varepsilon_j = \sigma_i^2 \delta_{ij}$, $\sigma_i = \sigma(\bar{x}_i)$, δ_{ij} , $(i, j = \overline{1, N})$ – символ Кронекера

$\sigma_{AZ}^2 = \sigma_\eta^2 F_1(\eta, \gamma)$, $\sigma_R^2 = \sigma_\eta^2 F_2(\eta, \gamma)$ σ_η^2 – ошибка оценивания времен прихода,
 γ – вектор параметров, характеризующий
геометрию расстановки сейсмической группы.

Алгоритмы выделения и измерения параметров волновых форм

- Последовательный (on-line) подход ориентирован на отыскание решения задачи, оптимального лишь на текущий момент времени. (Малла С., Добеши И., Чуи К., Никифоров В.И., Рапопорт М.Б. и др.)
- Вейвлет-фильтрация сейсмических волн, позволяющая увеличивать соотношения энергий сигнала и шума. (С. Малла, И. Добеши и др.)
- Алгоритм авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС). (Никифоров В.И. и др.)
- Алгоритм обратной фильтрация Винера-Колмогорова (деконволюция), предназначенный для сжатия волнового импульса во времени путем приведения его к δ -образному импульсу.
- Апостериорный (off-line) подход помехоустойчивой обработки последовательностей волновых форм ориентирован на получение оптимального решения по всем накопленным данным. (Клигене Н.И., Дарховский Б.С., Кельманов А.В. и др.)

Алгоритм авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС)



Пример вычисления времен вступлений волн от двух последовательных взрывов: вверху – вид решающей функции, внизу – искомая запись шума и двух волновых импульсов на его фоне.

Апостериорные алгоритмы определения параметров волновых форм в шумах.

Постановка задачи.

$Y = (y_0, \dots, y_{N-1}) = X + \Xi$ – наблюдаемый вектор

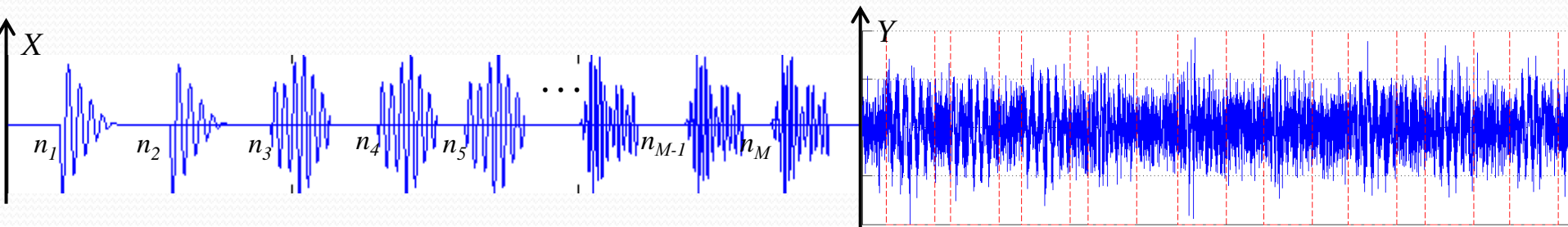
$X = (x_0, \dots, x_{N-1}) \in \mathfrak{R}^N$ – вектор с компонентами $x_n = \sum_{m=1}^M u_{n-n_m}(m)$, $n = 0, \dots, N-1$,

$\Xi = (\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_{N-1}) \in \Phi_{0, \sigma^2 I}$ – вектор шумовых компонент

$U_m = (u_0(m), \dots, u_{q-1}(m))$, $m = \overline{1, M}$ – волновая форма $0 < \sum_{j=0}^{q-1} u_j^2(m) < \infty$,

Условие квазипериодичности для моментов времени вступления волн n_1, \dots, n_M

$$q \leq T_{\min} \leq n_i - n_{i-1} \leq T_{\max} < \infty, i = 2, \dots, M$$



Необходимо:

по наблюдаемому вектору Y найти набор времен вступлений n_1, \dots, n_M

Дискретные экстремальные задачи в геофизическом мониторинге

Задача 1: Дано: числовая последовательность $Y=(y_0, \dots, y_{N-1})$ натуральные числа q, M, T_{\min} и T_{\max} . Найти: набор $(n_1, \dots, n_M) \in \Omega_M$ такой, что

$$G(n_1, \dots, n_M) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{q-1} y_{n_m+k}^2 \rightarrow \max$$

Рассмотрим случай, когда $U_m = U = (u_0, \dots, u_{q-1})$ для каждого $m=1, \dots, M$.

Задача 2: Дано: числовая последовательность $Y=(y_0, \dots, y_{N-1})$ натуральные числа q, M, T_{\min} и T_{\max} . Найти: набор $(n_1, \dots, n_M) \in \Omega_M$ такой, что

$$S(n_1, \dots, n_M) = \sum_{i=1}^M \sum_{k=0}^{q-1} u_k (u_k - 2y_{n_i+k}) \rightarrow \min.$$

Обе задачи 1 и 2 решаются методом динамического программирования, но с использованием различных рекуррентных формул. Задача 1 решается за время $O(MN)$, а задача 2 – за время $O(N^2)$.

Задача 3: Дано: числовая последовательность $Y=(y_0, \dots, y_{N-1})$ натуральные числа q, M, T_{\min} и T_{\max} . Найти: набор $(n_1, \dots, n_M) \in \Omega_M$ такой, что

$$G(n_1, \dots, n_M) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{q-1} y_{n_m+k} y_{n_j+k} \rightarrow \max$$

Идея алгоритма состоит в следующем. Сначала находится решение задачи 1 при $M=1$ для начального участка последовательности Y , содержащего $T_{\max} - q + 1$ элементов. Далее, используя этот набор, решаем задачу 2, положив $U = (y_{\hat{n}_1}, \dots, y_{\hat{n}_1+q-1})$

Задача 1. Случай разных волновых форм

Логарифмическая функция максимального правдоподобия:

$$L(U, n_1, \dots, n_M | Y, \sigma^2) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} \left(y_n - \sum_{i=1}^M u_{n-n_i} \right)^2,$$

Экстремальная задача максимизации функции

$$G(n_1, \dots, n_M) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{q-1} y_{n_m+k}^2 \rightarrow \max_{\Psi_M}$$

Начальные
ограничения

$$\Psi_M = \{(n_1, \dots, n_M) : a \leq n_1 \leq a^+;$$

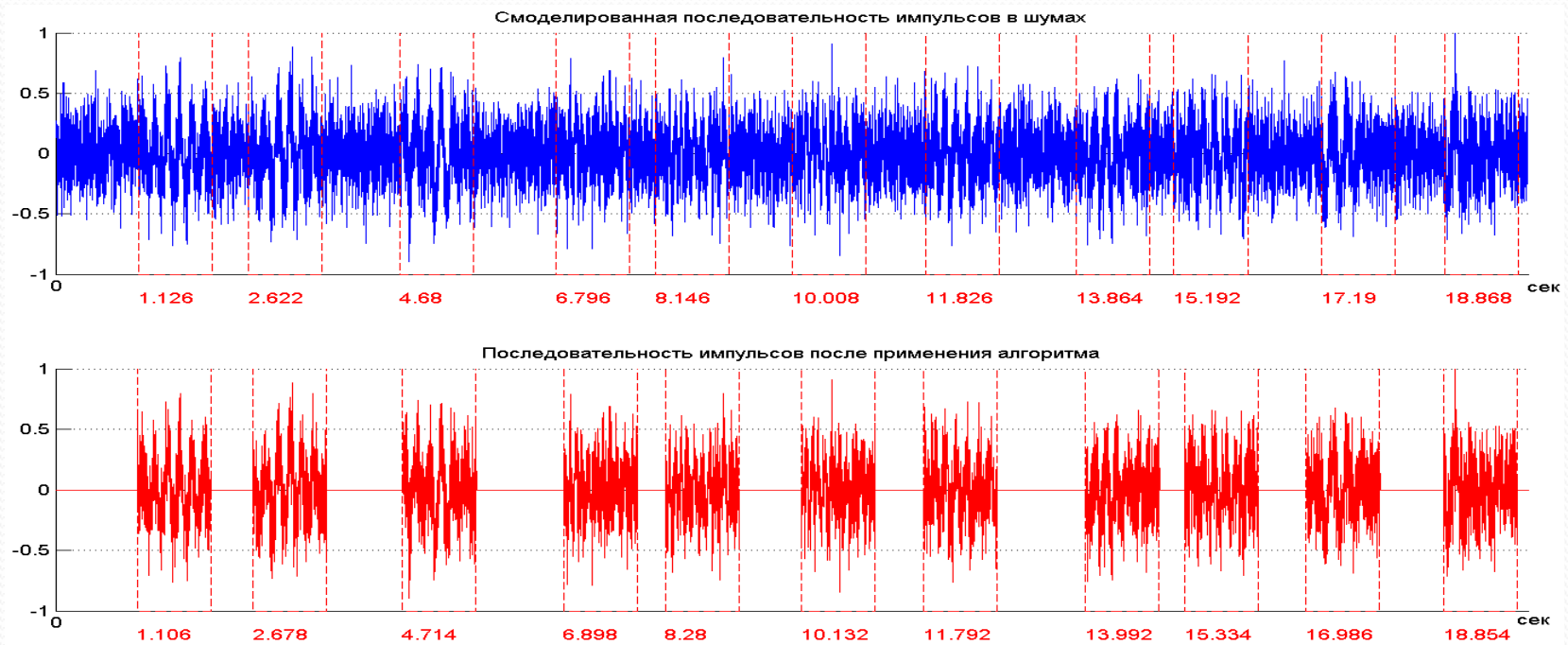
$$T_{\min} \leq n_m - n_{m-1} \leq T_{\max} < \infty, m = 2, \dots, M; a^+ \in [a, b], b^- \in [a, b]\},$$

где a, a^+, b^-, b – целые, а T_{\min} и T_{\max} – натуральные числа.

Оптимальный набор моментов времени вступления волновых форм находится по правилу:

$$\hat{\eta} = (\hat{n}_1, \dots, \hat{n}_M) = \underset{\eta}{\text{Arg max}} \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{q-1} y_{n_m+k}^2,$$

Результаты численного моделирования апостериорного алгоритма для разных волновых форм ($\sigma=0.7$)



Среднеквадратическая погрешность = $9.2 \cdot 10^{-3}$

Задача 2. Случай одинаковых волновых форм

Логарифмическая функция максимального правдоподобия:

$$L(U, n_1, \dots, n_M | Y, \sigma^2) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} \left(y_n - \sum_{i=1}^M u_{n-n_i} \right)^2,$$

$$\frac{\partial L}{\partial u_k} = 0, k = 0, \dots, q-1 \Rightarrow \hat{u}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_{n_i+k}, k = 0, \dots, q-1$$

- Оценка максимального правдоподобия для компонент волновой формы U

Целевая функция: $S = \sum_{i=1}^M \sum_{k=0}^{q-1} \tilde{u}_k (\tilde{u}_k - 2y_{n_i+k}) \rightarrow \min_{\Omega_M}$.

Начальные ограничения $\Omega_M = \{(n_1, \dots, n_M) \mid 0 \leq n_1 \leq T_{\max} - q - 1, N - T_{\max} - q \leq n_M \leq N - q - 1, q \leq T_{\min} \leq n_i - n_{i-1} \leq T_{\max}, i = \overline{2, M}\}$

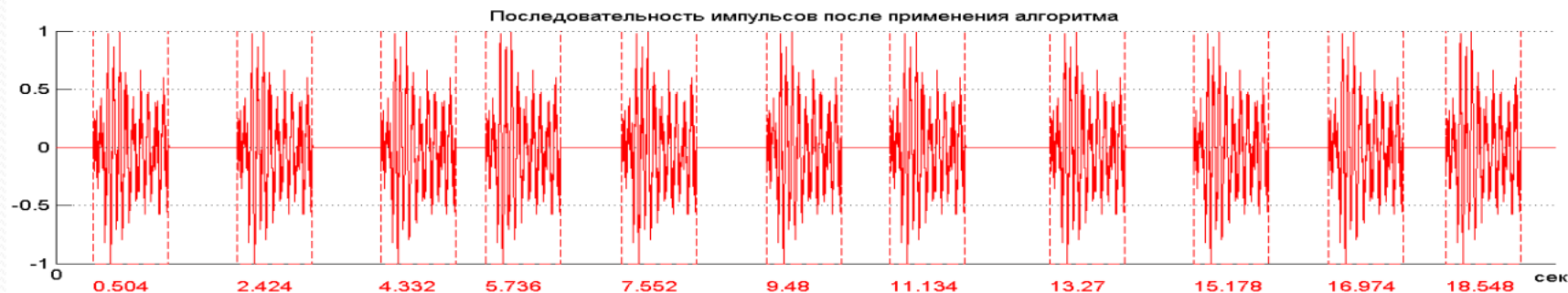
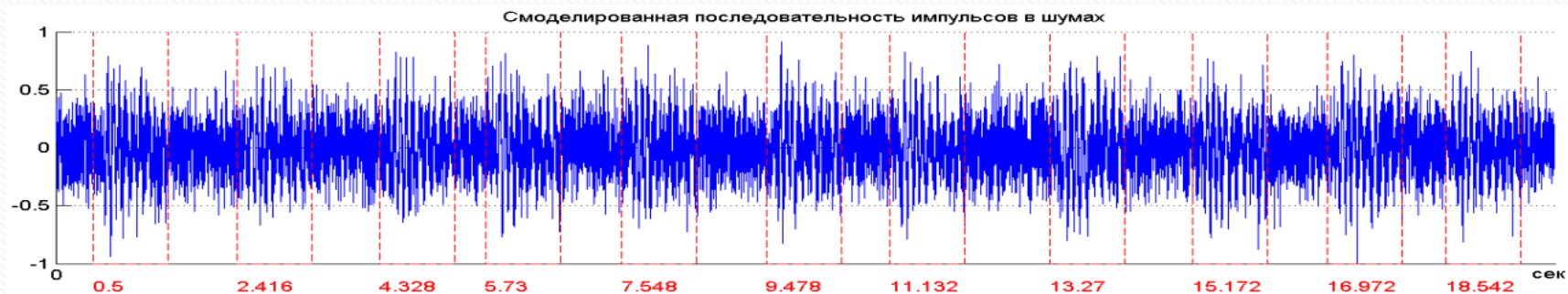
Времена вступления волн и их число в последовательности :

$$\begin{cases} \tilde{n}_0 = \underset{N-q \leq n \leq N-q+T_{\min}-1}{\text{Arg min}} (S(n) + G(n)) \\ \tilde{n}_i = \text{Ind}(\tilde{n}_{i-1}), i = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

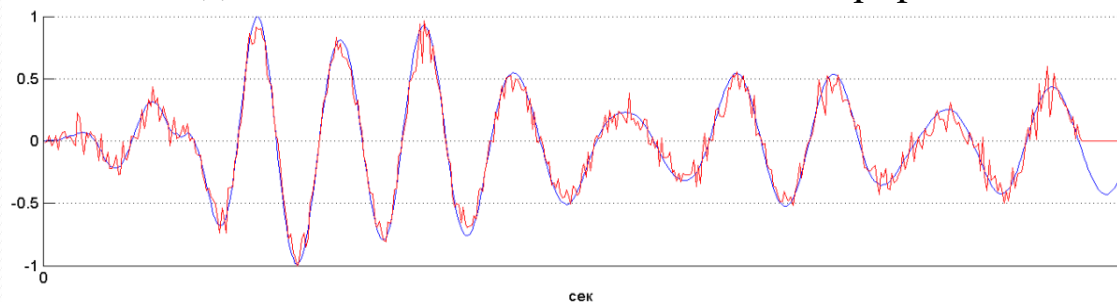
Оптимальный набор моментов времени вступления волновых форм находится по правилу:

$$(\tilde{n}_1, \dots, \tilde{n}_{\tilde{M}}, \tilde{M}) = \underset{\Omega}{\text{Arg min}} \tilde{S}_1(n_1, \dots, n_M) \Rightarrow \hat{u}_k = \frac{1}{\tilde{M}} \sum_{i=1}^{\tilde{M}} y_{\tilde{n}_i+k}, k = \overline{0, q-1}$$

Результаты численного моделирования апостериорного алгоритма для одинаковых волновых форм ($\sigma=0.7$)



Заданная и вычисленная волновые формы



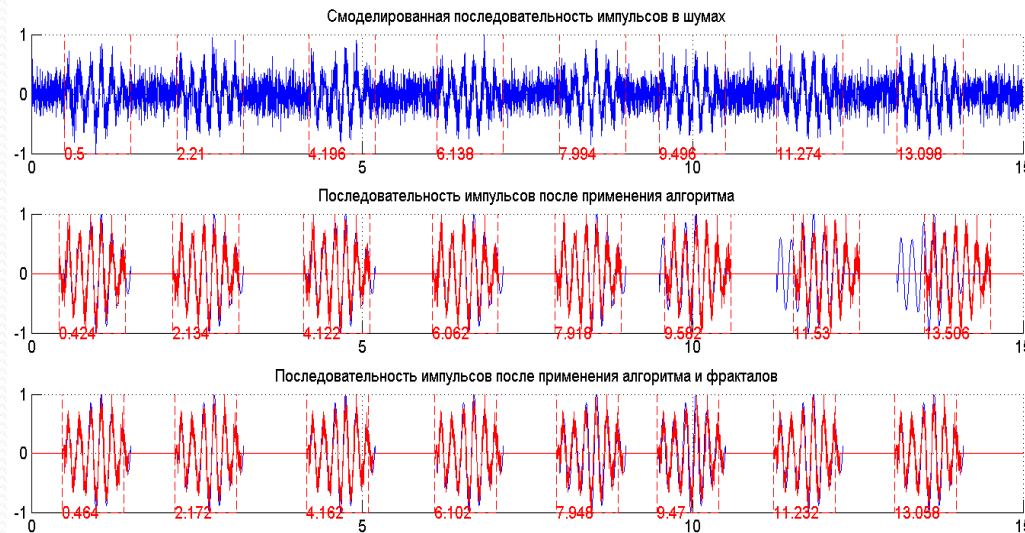
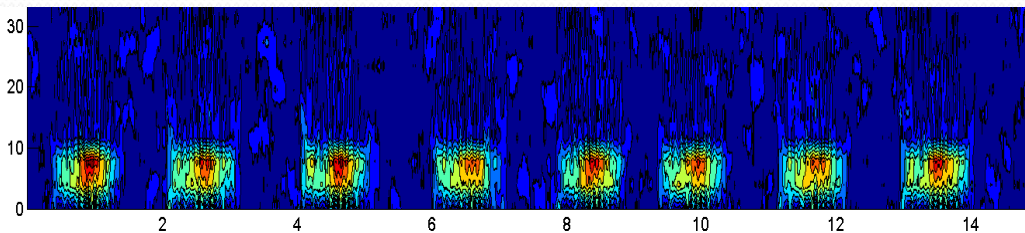
Среднеквадратическая погрешность = $1.5 \cdot 10^{-3}$

Среднеквадратическое уклонение = $1.5 \cdot 10^{-2}$

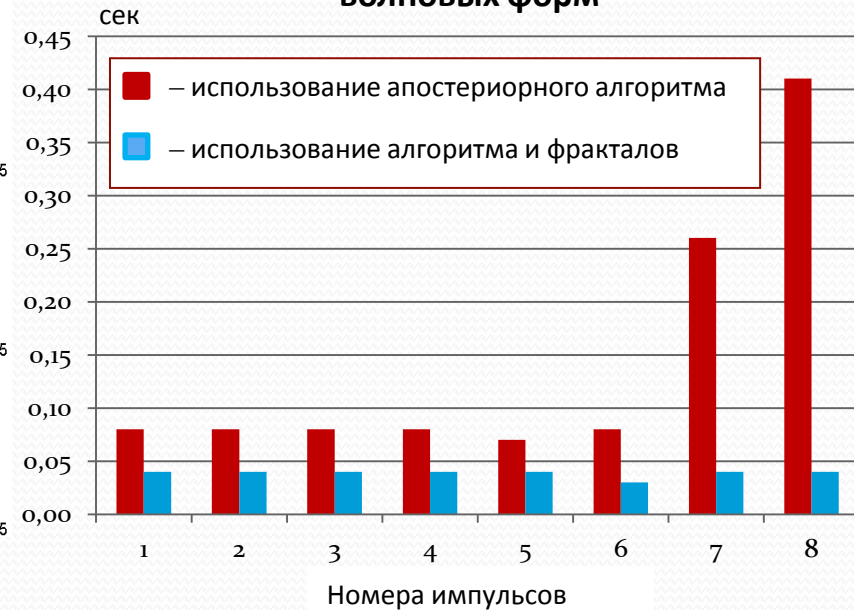
Фрактальный подход для выделения волновых форм

Фрактальное представление волновых форм, связано с представлением их в виде двумерного изображения на плоскости "частота-время" с применением двумерного преобразования Фурье.

$$F(k_1, k_2) = \frac{1}{\sqrt{N_1 N_2}} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} x(n_1, n_2) e^{-j \frac{2\pi k_1 n_1}{N_1}} \cdot e^{-j \frac{2\pi k_2 n_2}{N_2}}$$

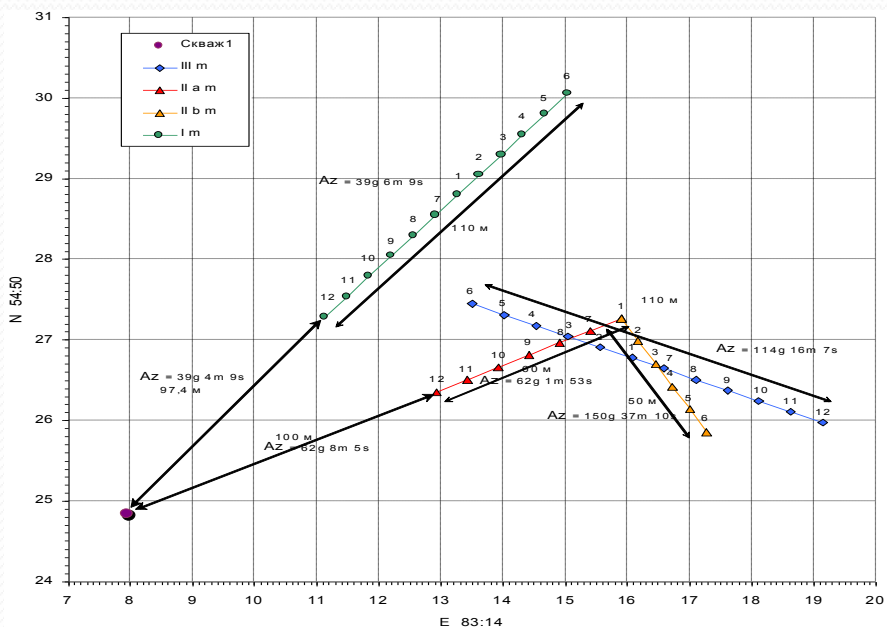
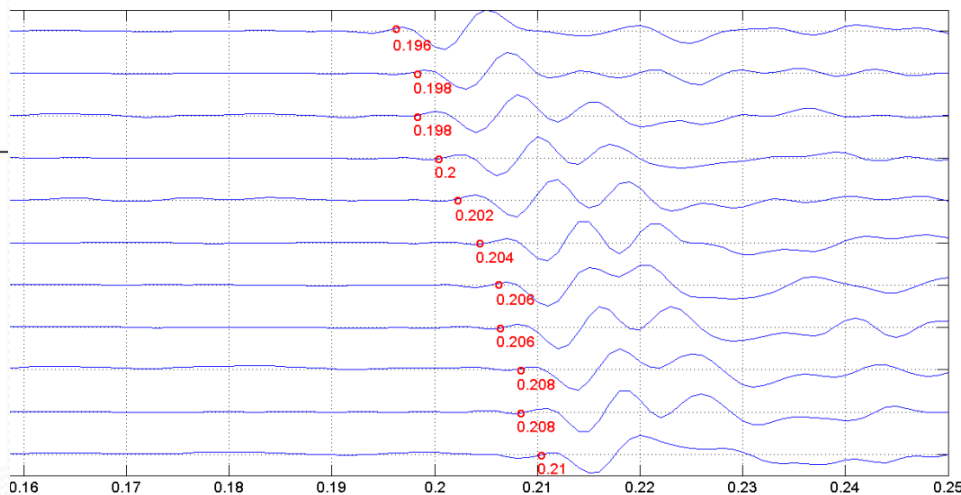
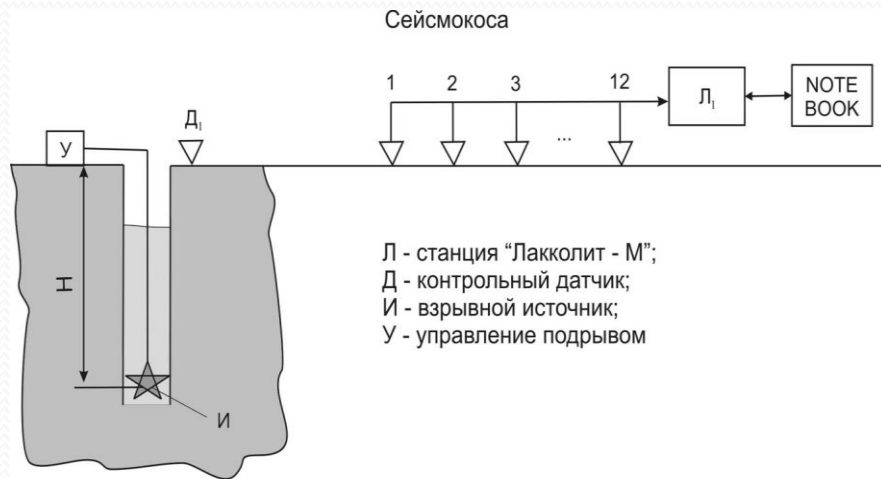


Погрешность вычисления времен вступлений волновых форм



Задачи геофизического мониторинга

1. Мониторинг положения перемещающегося источника в скважине



№ ПОЛОЖ. ИСТ.	Координаты источника (м)			Скорости сейсмических волн V (м/с)
	x	y	z	
br1	-0.02	0.49	1.47	1597
br5	0.52	-1.75	8.116	1600
br10	-0.71	1.12	13.783	1754
br25	-0.4	0.08	23.22	2032
br100	0.34	3.18	101.54	3220
br120	1.577	2.163	121.01	3343

Решение обратной задачи

$$\hat{\eta} = \eta(\gamma, \chi) + \varepsilon.$$

Исходными параметрами для решения системы является вектор времен вступлений волн $\hat{\eta} = (\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N)^T$ на сейсмоприемниках. Задача оценивания параметров вектора $\chi = (x, y, z, v, t)^T$ является частью регрессионного анализа, а ее решением служат оценки метода наименьших квадратов

$$\chi = \arg \min Q(\chi), \quad Q(\chi) = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} (\hat{\eta}_i - \eta(\gamma_i, \chi))^2$$

Для отыскания минимума функционала $Q(\chi)$ применяют итерационный метод Гаусса-Ньютона или его модификации, основанные на линейной аппроксимации функции регрессии в окрестности точки χ^k :

$$J(\gamma, \chi^k) \Delta \chi^k + \hat{\eta}(\gamma, \chi^k) - \eta + \varepsilon = 0,$$

где

$$J(\gamma, \chi) = \left(\frac{\partial \eta(\gamma_i, \chi)}{\partial \chi_1}, \frac{\partial \eta(\gamma_i, \chi)}{\partial \chi_2}, \dots, \frac{\partial \eta(\gamma_i, \chi)}{\partial \chi_m} \right), \quad i = 1, \dots, n$$

Решение обратной задачи восстановления источника

Вычислительная схема сингулярного разложения (*SVD*-разложении) состоит в разложении матрицы (4) на каждом шаге итерационного процесса в произведение трех матриц $J(X, \vec{\theta}^k) = U_k \Sigma_k V_k^T$, где U_k – ортогональная $n \times n$ матрица, V_k – ортогональная $m \times m$ матрица, Σ_k – диагональная $n \times m$ матрица, имеющая структуру $\Sigma_k = \begin{pmatrix} S_k \\ 0 \end{pmatrix}$, где $S_k = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)$ – диагональная матрица сингулярных чисел, упорядоченных по невозрастанию $\rho_i \geq \rho_{i+1}$. Метод предусматривает также проведение сингулярного анализа, состоящего в исключении нулевых сингулярных чисел и соответствующих им столбцов матриц U и V . Итерационный процесс в этом случае имеет вид:

$$\vec{\theta}^{k+1} = \vec{\theta}^k + V_k S_k^{-1} \vec{d}^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где \vec{d}^k – вектор, состоящий из первых m компонент вектора $U_k^T \vec{y}(X, \vec{\theta}^k)$.

Взрывные сейсмограммы

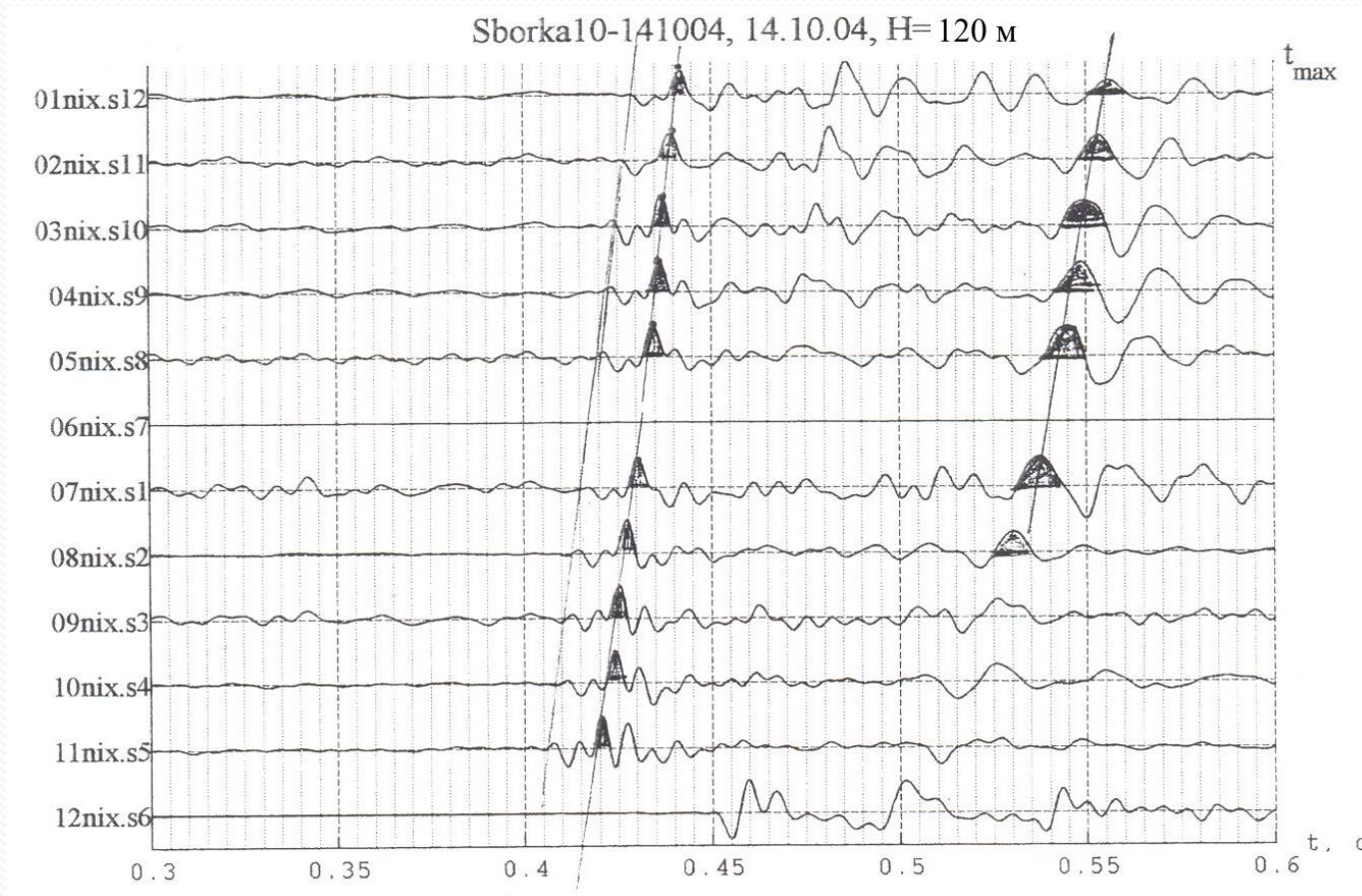
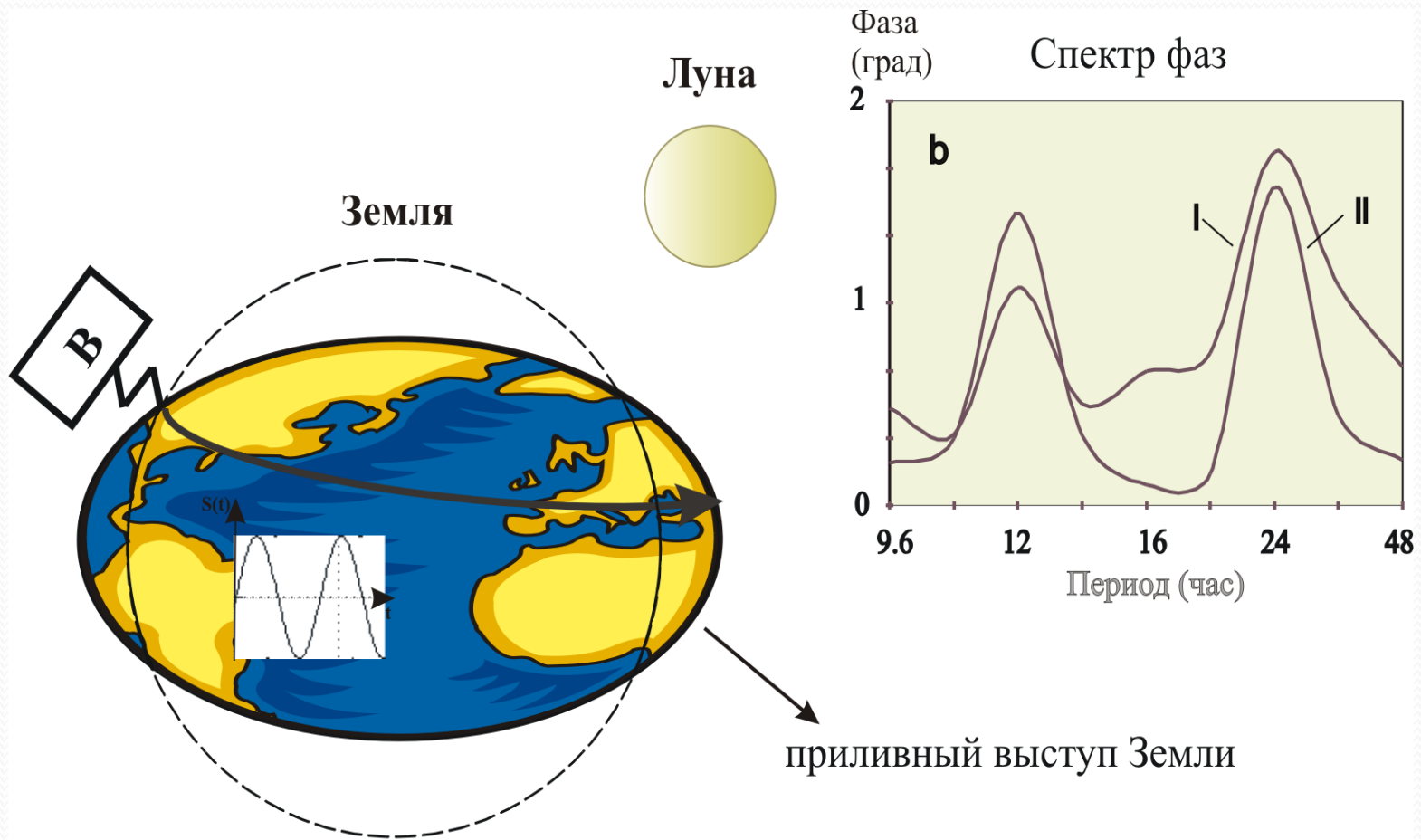


Рис.15. Запись взрыва на глубине 120 м., расстановка III

Взаимодействие Гравитационных и сейсмических волновых полей-Выделение лунно-солнечных приливов методом ВПЗ



Схематически представлена методика выделения 24-х и 12-ти часовых периодичностей лунно солнечных приливов на основе вычисления спектра фаз сейсмического волнового поля (график I), порождаемого мощным низкочастотным вибратором ЦВ-100 (В) в гармоническом

Мощные сейсмические виброисточники



Стационарный виброисточник ЦВ-100

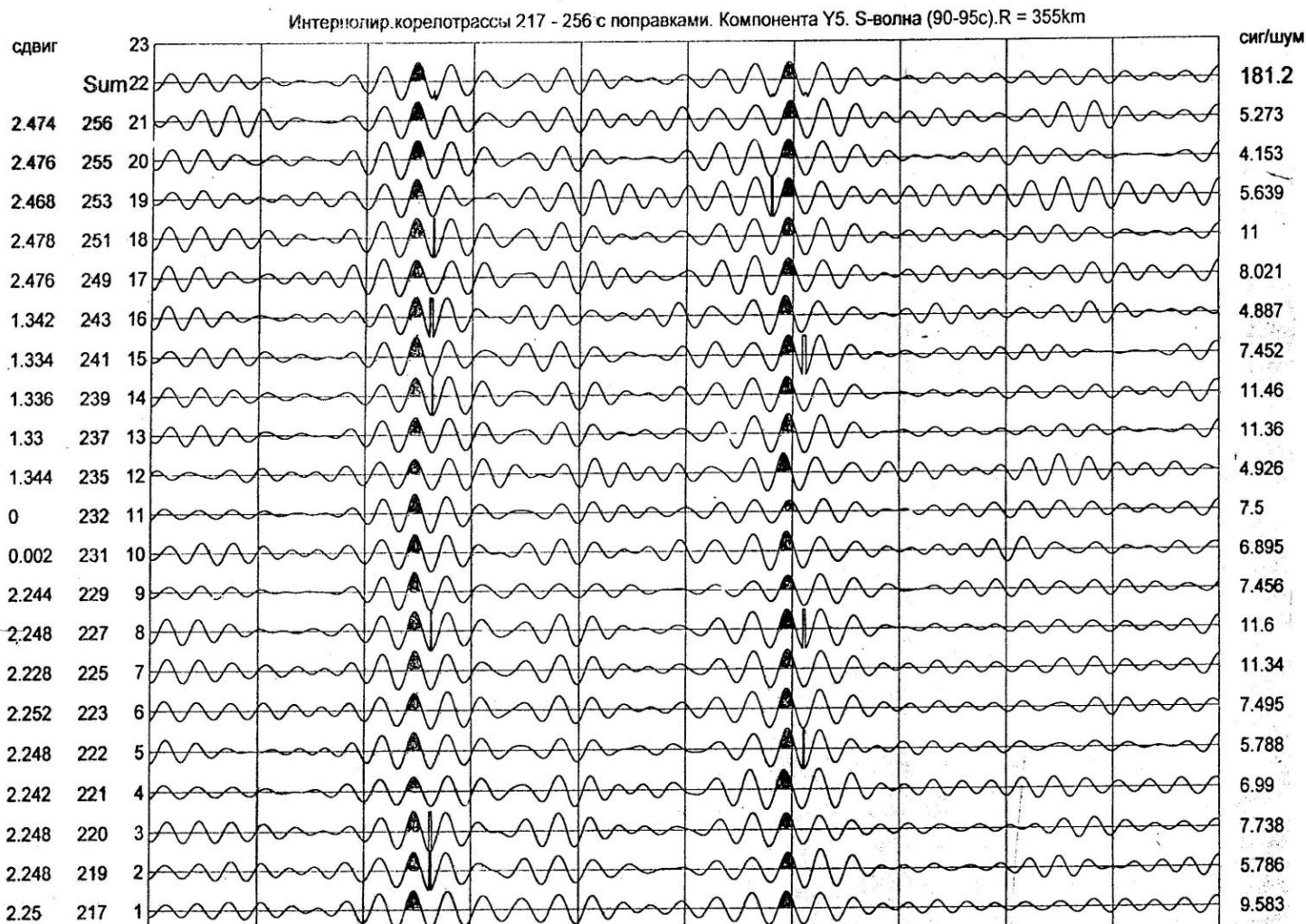
Центробежный виброисточник ЦВ-100 дебалансного типа создает возмущающую силу амплитудой 100 тонн. Эффективный диапазон частот 5.5-8.5 Гц.



Передвижной виброисточник ЦВ-40

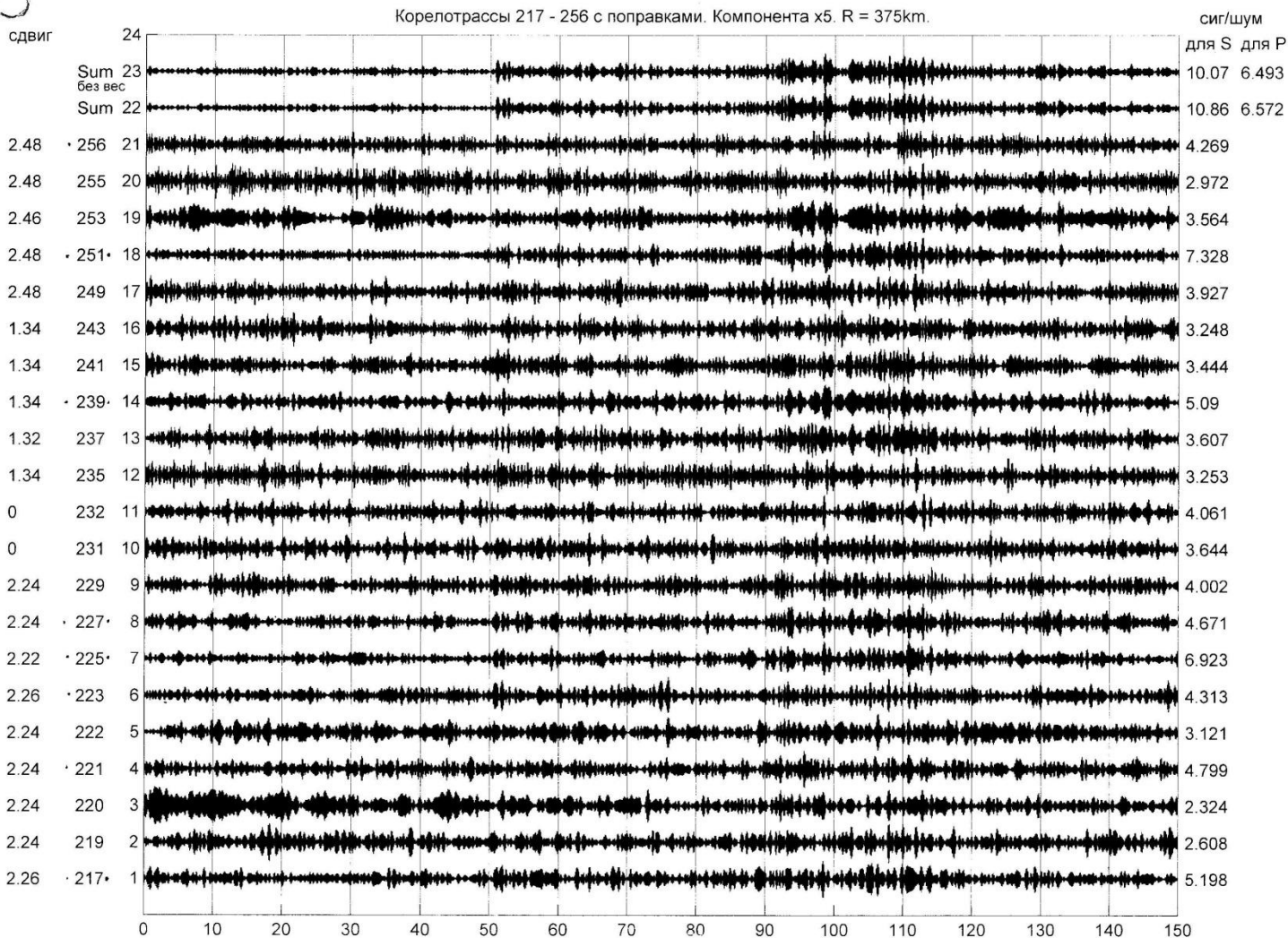
Передвижной центробежный виброисточник с амплитудой возмущающей силы 40 тонн, диапазон частот 6.25-11.23 Гц

Мониторинговые кореллотрассы и невязки времен вступлений сейсмических волн. Дальность 356 км.

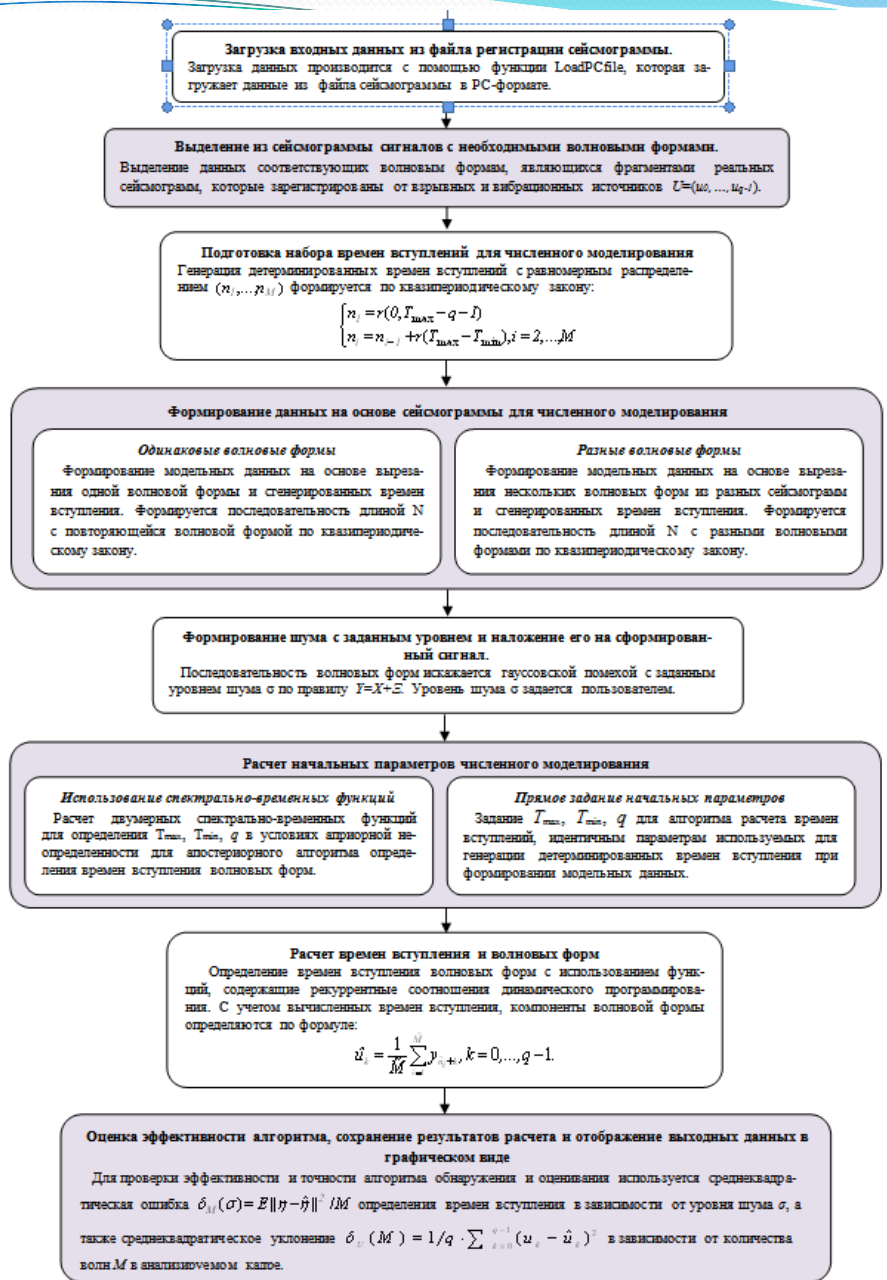


Мониторинг лунно-солнечных приливов- кореллотрассы. R=355 км

x5



Блок-схема основных этапов функционирования апостериорных алгоритмов.



Заключение. Основные результаты работы

1. Предложены и исследованы более точные по сравнению с известными апостериорные алгоритмы, основанные на методах дискретной оптимизации и фрактальном подходе, для совместного помехоустойчивого обнаружения и оценивания моментов времен вступления квазипериодических волновых форм в задачах геофизического мониторинга.
2. Разработана и внедрена новая методика решения актуальных проблем геофизического мониторинга с применением предложенных алгоритмов, включая задачи локации скважинного источника при нефтеразведочном бурении, оценивания геоэкологических рисков для окружающей социальной среды от массовых мощных взрывов с учетом воздействия метеофакторов.
3. Получены закономерности направленного распространения акустических колебаний инфранизкого диапазона частот в зависимости от метеоусловий, расстояния "источник-приемник" с помощью численного моделирования и анализа данных экспериментальных исследований.
4. Создано программное обеспечение для проведения численного моделирования и обработки экспериментальных данных.



Спасибо за внимание!

Параметры расстановки и результаты вычислений

СКВАЖИНА N= 100

УСТЬЕ: X= .00 Y= .00

ЗАБОЙ: X= -.34 Y= 3.18 Z= 101.54 V= 3.220 FM= .190

EX= 1.047 EY= 1.821 EZ= 1.649 EV= .0000 3 СИГМЫ= .46

УДАЛЕНИЕ ЗАБОЯ = 3.20 ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ АЗИМУТ = 96.02 ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ= 5

I	ТОЧКА	I	X	I	Y	I	ВРЕМЯ	I	РАССТ	I	АЗИМУТ	I	НЕВЯЗКА	I
I	11		97.404		51.507		46.0390		148.995		27.87		-.231	I
I	10		106.237		56.200		48.3860		156.461		27.88		-.202	I
I	9		115.069		60.892		51.0800		164.195		27.89		.090	I
I	8		123.901		65.585		53.3690		172.163		27.89		-.095	I
I	7		132.733		70.278		56.0570		180.334		27.90		.055	I
I	1		141.566		74.978		58.4550		188.685		27.91		-.140	I
I	2		146.477		66.254		58.9040		189.323		24.34		.111	I
I	3		151.388		57.531		59.0420		190.487		20.81		-.113	I
I	4		156.299		48.807		59.7800		192.165		17.34		.104	I
I	5		161.210		40.084		60.4080		194.345		13.96		.055	I
I	6		166.122		31.361		61.0480		197.011		10.69		-.133	I

Автоматизированная локация сейсмического источника

Аннотация. Предложена автоматизированная технология локации разного типа сейсмических источников - промышленных взрывов, вибраторов и др. — на фоне сейсмических шумов. Эффективность предложенного подхода иллюстрируется на ряде примеров.

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_N &= (\mathbf{g}_{N-1} + \Delta \mathbf{g})^+, \\ \mathbf{g}_0 &= \mathbf{0}; \\ \Delta \mathbf{g}_N &= \mathbf{F}(\Phi_1, \dots, \Phi_p; \sigma_\varepsilon^2) \left[\frac{\left(1 - \sum_{i=1}^p \Phi_i\right)}{\sigma_\varepsilon^2} \left(1 - \sum_{i=1}^q \phi_i\right) \right] \cdot \bar{\varepsilon}_N(\mathbf{m}_0), \\ \mathbf{x}_t &= \Phi_1^{(i)} \mathbf{x}_{t-1} + \dots + \Phi_p^{(i)} \mathbf{x}_{t-p} + \varepsilon_t \end{aligned}$$

Здесь: $(\mathbf{g})^+ = \max(\mathbf{0}, \mathbf{g})$;

Φ_1, \dots, Φ_p – коэффициенты авторегрессии порядка p ;

ϕ_1, \dots, ϕ_q – коэффициенты скользящего среднего;

ε_N – независимая гауссовская случайная последовательность;

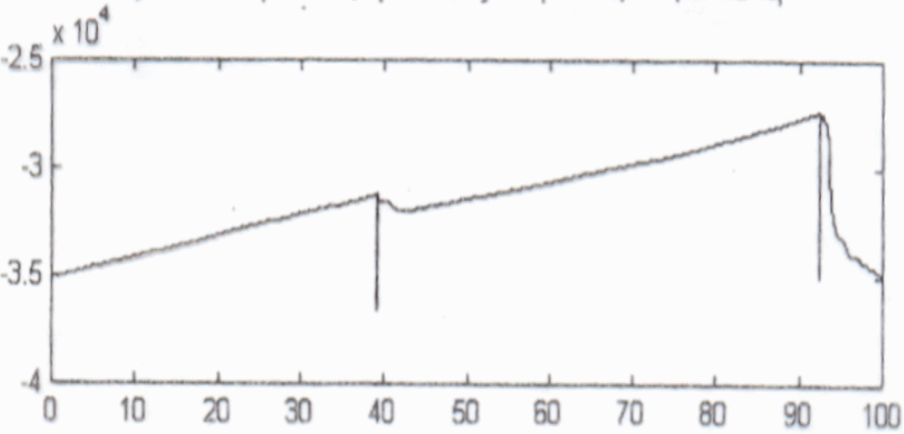
σ_ε^2 – дисперсия случайных значений ряда \mathbf{x}_i ;

При этом правило подачи сигнала о разрядке:

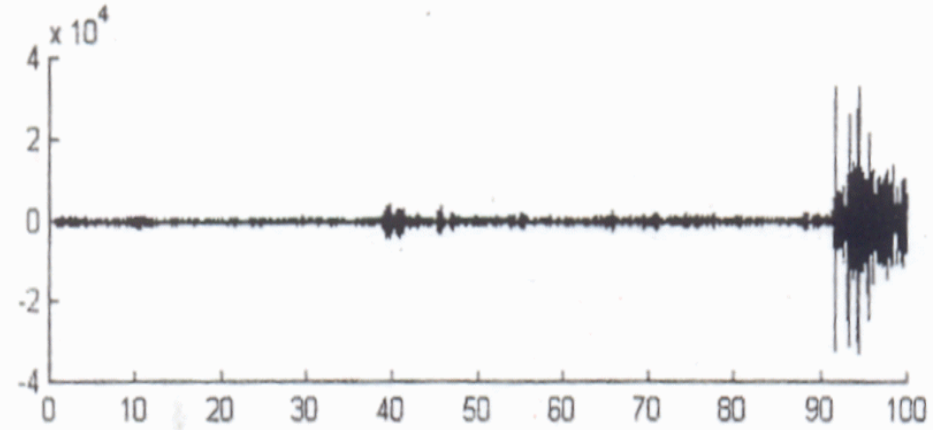
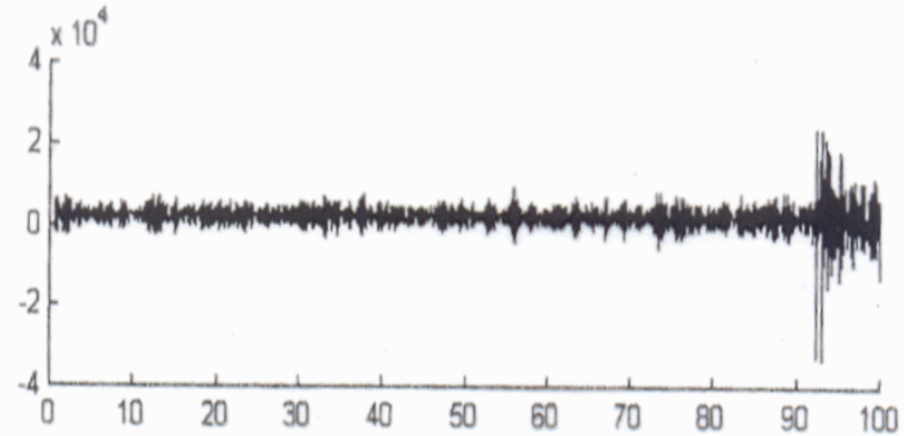
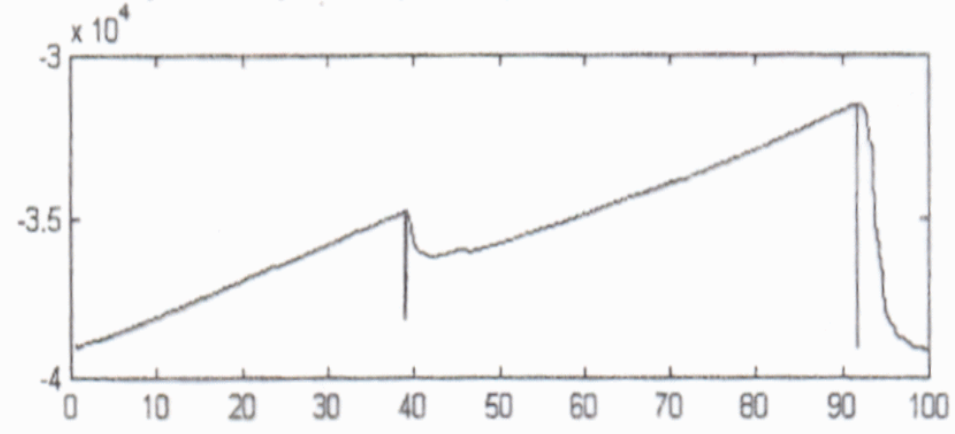
$$\mathbf{t}_p = \inf \{t : \mathbf{g}_N > \mathbf{h}\}, \quad \text{где } \mathbf{h} \text{ – пороговый уровень.}$$

Измерение времен вступлений волн алгоритмом АРПСС

файл s14sep12 rz2 , время вступл. $T_p=92.3$, $f_l=7$, $f_h=10$ гц



файл s14sep12 rz3 , время вступл. $T_p=91.74$, $f_l=7$, $f_h=10$ гц



Сравнительный анализ вычисления времен вступления волн с помощью апостериорного алгоритма и алгоритма вейвлет-фильтрации

Сигнал / шум	Среднеквадратическая погрешность времен вступления $\delta_M(\sigma)$ (сек)	
	Апостериорный алгоритм	Алгоритм вейвлет-фильтрации с пороговым обнаружителем.
10	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
5	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
3	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$
2.5	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$
2	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$
1.7	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$
1.4	$9.2 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$
1.25	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$
1.1	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^{-2}$
1	$5.2 \cdot 10^{-2}$	$5.3 \cdot 10^{-2}$

Решение обратной задачи

$$\hat{\eta} = \eta(\gamma, \chi) + \varepsilon.$$

Исходными параметрами для решения системы является вектор времен вступлений волн $\hat{\eta} = (\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N)^T$ на сейсмоприемниках. Задача оценивания параметров вектора $\chi = (x, y, z, v, t)^T$ является частью регрессионного анализа, а ее решением служат оценки метода наименьших квадратов

$$\chi = \arg \min Q(\chi), \quad Q(\chi) = \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} (\hat{\eta}_i - \eta(\gamma_i, \chi))^2$$

Для отыскания минимума функционала $Q(\chi)$ применяют итерационный метод Гаусса-Ньютона или его модификации, основанные на линейной аппроксимации функции регрессии в окрестности точки χ^k :

$$J(\gamma, \chi^k) \Delta \chi^k + \hat{\eta}(\gamma, \chi^k) - \eta + \varepsilon = 0,$$

где

$$J(\gamma, \chi) = \left(\frac{\partial \eta(\gamma_i, \chi)}{\partial \chi_1}, \frac{\partial \eta(\gamma_i, \chi)}{\partial \chi_2}, \dots, \frac{\partial \eta(\gamma_i, \chi)}{\partial \chi_m} \right), \quad i = 1, \dots, n$$

Метод Качмажа

$$\theta_j^{(k+1)} = \theta_j^k + a_{ij} \frac{(\sigma_{\theta_j}^2)^k}{\sigma_{\omega_i}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} a_{ij}^2 (\sigma_{\theta_j}^2)^k} \Delta t_i^k, \quad a_{ij} = \frac{\partial \eta_i(\vec{\theta}, v, X)}{\partial \theta_j}$$

$$\Delta t_i^k = t_i - \eta_i(\vec{\theta}^k, v, X)$$

$(\sigma_{\theta_j}^2)^k$ - дисперсия оценки неизвестного параметра θ_j на шаге k

σ_{ω}^2 - дисперсия оценок известных параметров (t)

$$(\sigma_{\theta_j}^2)^{(k+1)} = (\sigma_{\theta_j}^2)^k \left(1 - \frac{(\sigma_{\theta_j}^2)^k}{\sigma_{\omega_i}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} a_{ij}^2 (\sigma_{\theta_j}^2)^k} \right)$$

Расстановка IIa-IIb

СКВАЖИНА N= 100 УСТЬЕ: X= .00 Y= .00

ЗАБОЙ: X=-.34, Y=3.18, Z=101.54, V=3.22, FM=.190, EX=1.047,
EY=1.821 EZ = 1.649 EV =.0000 геодезический азимут = 96.02

число итераций = 5

Точка	X (град)	Y (град)	Время (мсек)	Расстояние (м)	Азимут (град)	Невязка (мсек)
11	97.404	51.507	46.039	148.995	27.87	0.231
10	106.237	56.200	48.386	156.461	27.88	0.202
9	115.069	60.892	51.080	164.195	27.89	0.090
8	123.901	65.585	53.369	172.163	27.89	0.095
7	132.733	70.278	56.057	180.334	27.90	0.055
1	141.566	74.978	58.455	188.685	27.91	0.140
2	146.477	66.254	58.904	189.323	24.34	0.111
3	151.388	57.531	59.042	190.487	20.81	0.113
4	156.299	48.807	59.780	192.165	17.34	0.104
5	161.210	40.084	60.408	194.345	13.96	0.055
6	166.122	31.361	61.048	197.011	10.69	0.133

Фрактальная размерность

Понятие фрактальной размерности (ФР) выведено из результатов эмпирических исследований Ричардсона,

$$L(\delta) = \delta^D, \text{ или } D = \log \delta / \log L(\delta)$$

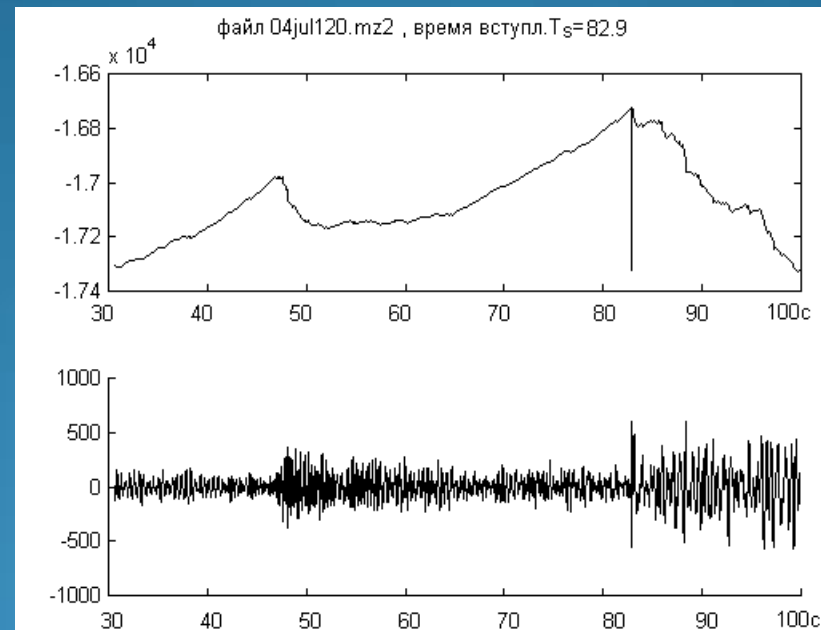
где

L – геометрическая длина

δ – масштаб измерения (детальность объекта)

D – фрактальная размерность.

Алгоритм авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС)



Пример вычисления времен вступлений волн от двух последовательных взрывов:
вверху – вид решающей функции, внизу – искомая запись шума и двух волновых импульсов на его фоне.

Сейсмоакустические эффекты землетрясения в Кузбассе 19.06.2013 г.

Запись землетрясения в г. Белово, Кемеровская обл.

Точка регистрации: пос. Ключи, г. Новосибирск.

Дата регистрации: 19.06.2013, время GMT.

