

ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТНЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД
ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВСТУПЛЕНИЙ P И S-ВОЛН

А.А.Любушин

Институт физики Земли РАН, Москва

e-mail: lyubushin@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Предлагается новый метод для обнаружения вступлений P и S-волн в задаче пассивного сейсмического мониторинга. Метод основан на вейвлет-пакетном разложении 3-компонентных сейсмических трасс, автоматическом контроле их качества и вычислении главных компонент трасс в перекрывающихся пакетных частотных полосах и в масштабно-зависимых скользящих временных окнах. Моменты вступлений волн оцениваются с помощью робастной итеративной процедуры подгонки гиперболических годографов к начальным оценкам моментов вступлений, определенным по максимальным значениям много-уровневой меры нестационарности поведения каждой трассы. Метод был разработан для применения в случаях большого числа сбойных однокомпонентных трасс и высокого уровня шума. В качестве примера применения обработан набор данных эксперимента Cotton Valley по сейсмическому мониторингу гидроразрывов трещиноватого газового коллектора.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения моментов вступлений P и S-волн и их годографов является одной из самых рутинных в практике анализа сейсмических данных [*Seismic signals analysis...*, 1982; *Hatton et al.*, 1986; *Pisarenko et al.*, 1987; *Гаушин, Кушнир, 1998; Кушнир, Хайкин, 2000*]. Большой объем сейсмических данных, особенно в задачах сейсмического мониторинга слабых событий и сейсморазведки, при наличии высокого уровня шума и большого числа сбойных трасс, делает весьма актуальной проблему автоматизации детектирования вступлений. В статье предлагается новый метод для решения этой задачи, основанный на использовании компактных ортогональных базисных функций (вейвлетов) [*Chui, 1992, Daubechies, 1992; Mallat, 1998; Press et al., 1996*] для разложения исходных сигналов и адаптивного анализа главных компонент для подавления шума. Преимущества вейвлет-анализа перед классическим разложением Фурье хорошо известны и вытекают из компактности базисных функций. Применение вейвлет-анализа к обработке сейсмических данных позволяет создавать новые методы для идентификации и классификации сигналов [*Любушин и др., 2004*]. Одним из недостатков использования ортогональных вейвлетов является слабая разрешающая способность по частоте, что является обратной стороной хорошей разрешающей способности по времени. Увеличение частотного разрешения вейвлет-анализа в статье достигается использованием т.н. вейвлет-пакетов. Следует заметить, что предложенный метод может быть реализован с использованием обычной полосовой Фурье-фильтрации, но результат при этом будет гораздо менее точным и устойчивым.

МЕТОД.

Метод будет изложен в виде последовательности пунктов с параллельной иллюстрацией каждой операции на примере обработки реальных данных. Такая форма изложения метода представляется более естественной в данном случае для понимания всех его элементов, нежели традиционная, когда сначала формально излагается метод, а потом – результаты его применения. Данные представляют собой сейсмограммы из базы данных по натурному эксперименту Cotton Valley, East Texas, по идентификации событий (гидроразрывов – раскрытия трещин под воздействием гидравлического давления), инициированных закачкой воды под давлением в газовый коллектор [*Maxwell et al., 1998, Zino et al., 1998; Maxwell et al., 2000*]. События регистрировались после завершения переходных процессов после закачки воды системой 3-компонентных (3С) геофонов, погруженных в скважину и расположенных на расстоянии 50 метров друг от друга. Частота опроса равна 1000 Гц, общее число геофонов – 45, число отсчетов в каждой скалярной (1С) трассе равно 400. Исходные данные представлены на рис.1 отдельно для X, Y и Z-компонент. Каждой 3С записи присвоен номер, увеличивающийся от 1 до 45 по мере углубления в скважину. Данные были предоставлены для тестирования метода доктором Дэвидом Лесли (David Leslie) из Исследовательского центра Шлюмберже в Кембридже (Schlumberger Cambridge Research).

Рис.1(а). X-компонента

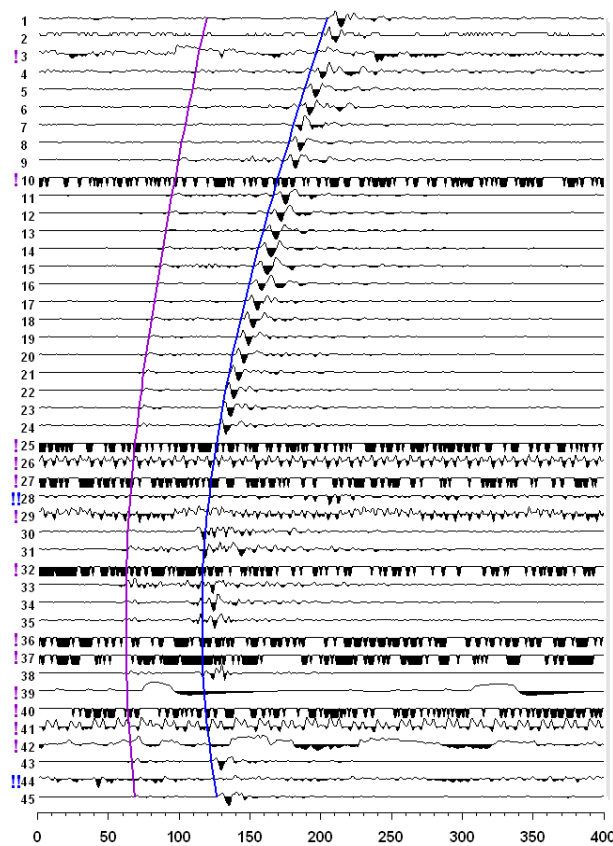


Рис.1(б). Y-компонента

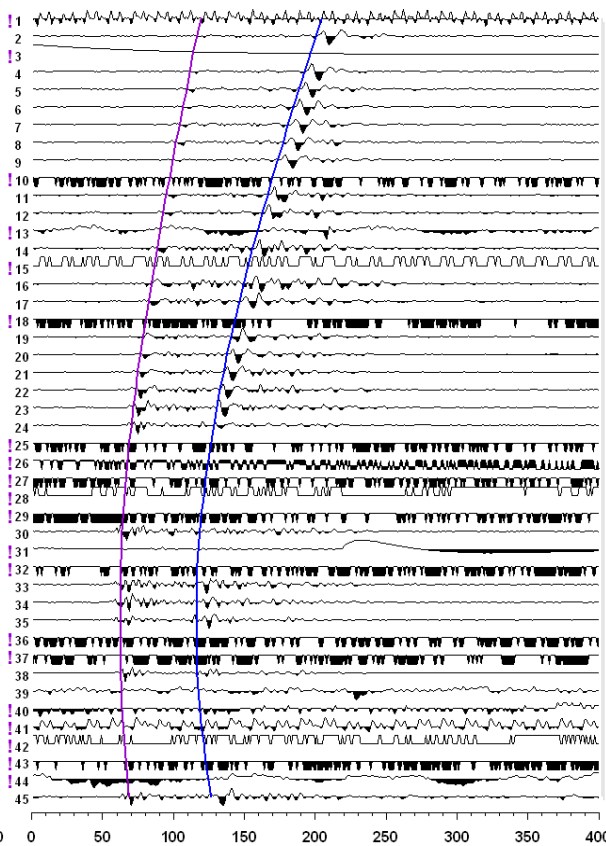


Рис.1(в). Z-компонента.

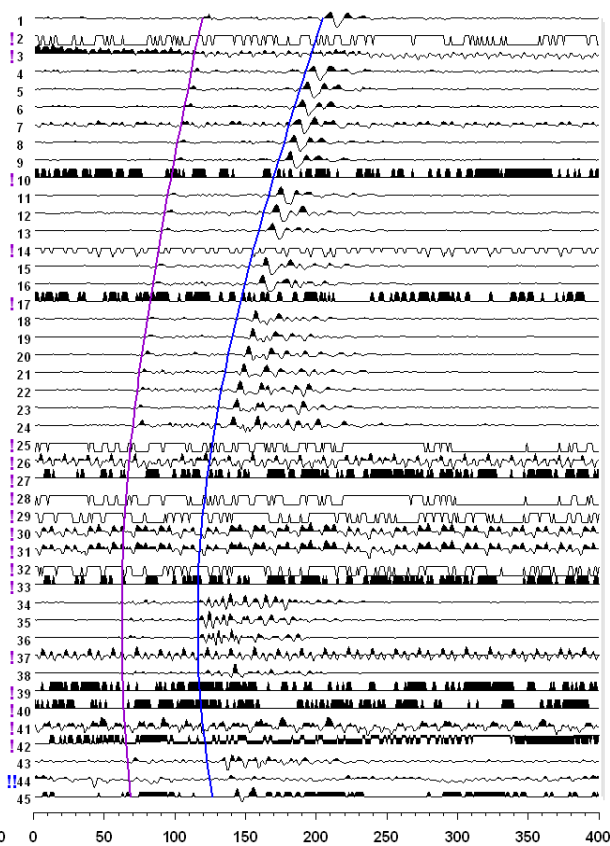


Рис.1. Исходные данные: (а, б, в) – соответственно X, Y и Z-компоненты. По оси абсцисс – номера временных отсчетов (частота опроса 1000 Гц), по оси ординат – номера трасс, соответствующие 3-компонентным сейсмическим датчикам, расположенным в скважине с шагом 50 метров в глубину. Одиночным восклицательным знаком помечены скалярные трасс, выделенные как сбойные на 1-ой стадии автоматического контроля качества, двойными восклицательными знаками – выделенные как сбойные на 2-ой стадии контроля. На каждом из графиков изображены линии гиперболических годографов моментов вступления – по времени сначала для P-волн, затем для S-волн.

Этот пример данных является типичным для эксперимента. Как нетрудно заметить, данные содержат большое число сбойных 1С трасс. В то же время, много таких 3С записей, в которых не все компоненты являются плохими. Таким образом, необходимо создать метод автоматической отбраковки плохих 1С трасс. Качественно 3С записи можно классифицировать на «полностью плохие» (все 3 скалярные трассы являются сбойными), «частично хорошие» (когда 1 или 2 скалярные трассы пригодны для последующего анализа) и «полностью хорошие». В дальнейшем для 1С трасс будут использованы обозначения типа “X-21”, “Z-02”, “Y-14” с очевидной мнемоникой – первая буква означает компоненту, а последующая цифра – номер 3С трассы на рис.1. Метод не должен отказываться от всей информации, содержащейся в 3С записи в том случае, если одна или даже 2 скалярные компоненты являются плохими – любая кондиционная 1С трасса должна быть использована. В случае, если 3С трасса является «полностью хорошей» или содержит 2 хорошие 1С трассы, возможно применение метода главных компонент для дополнительного подавления шума. Для 3С сейсмических записей метод главных компонент есть ничто иное, как поляризационный анализ [Kanasewich, 1981].

Метод представляет собой следующую последовательность операций:

1. Вейвлет-пакетное разложение всех 1С трасс.
2. Оценка вариаций много-уровневой меры нестационарности для всех 1С трасс.
3. Контроль качества 1С трасс с использованием много-уровневой меры из п.2, нормализованной энтропии распределения квадратов вейвлет-коэффициентов и критерия отношения энергии «высоких частот» к энергии «низких частот» – для автоматической маркировки плохих 1С трасс.
4. Вычисление адаптивных главных компонент для всех полностью или частично хороших 3С трасс в перекрывающихся вейвлет-пакетных частотных полосах и в масштабно-зависимых скользящих временных окнах.
5. Оценка вариаций много-уровневой меры нестационарности для всех масштабно-зависимых главных компонент.
6. Определение начальных оценок моментов времени вступления S-волн, используя максимальные значения мер нестационарности, вычисленных в п.5.
7. Корректировка начальных оценок моментов времени вступления S-волн и идентификация гиперболического годографа S-волн с помощью итеративной робастной процедуры подгонки его параметров.
8. Определение начальных оценок моментов времени вступления P-волн, используя максимальные значения мер нестационарности, вычисленных в п.5 для моментов времени строго до моментов вступления S-волн, определенных в п.7.
9. Корректировка начальных оценок моментов времени вступления P-волн и идентификация гиперболического годографа P-волн с помощью итеративной робастной процедуры подгонки его параметров.

Ниже каждый пункт этой последовательности будет описан детально. На рис.1 помимо исходных данных изображены также конечные оценки годографов P и S-волн. Все прочие рисунки (2-6) предназначены для иллюстрации деталей вышеперечисленной последовательности операций.

1. *Вейвлет-пакетное разложение.* Ортогональное вейвлет-разложение сигнала $x(t)$ с дискретным временным индексом $t = 1, \dots, N$ дает его представление в виде суммы

$$x(t) = \text{const} + \sum_{\beta=1}^m x^{(\beta)}(t) \quad (1)$$

где $x^{(\beta)}(t)$ – компонента сигнала, принадлежащая уровню детальности с номером β [Chui, 1992; Daubechies, 1992; Mallat, 1998; Press et al., 1996]. Общее число m уровней детальности зависит от длины N сигнала в числе отсчетов. Если $N = 2^n$ то $m = n$, число вейвлет-коэффициентов на 1-ом уровне равно $N/2$, на втором – $N/4$ и т.д. вплоть до уровня детальности с номером m , который имеет единственный коэффициент разложения. Если N не равно 2^m , то дополним сигнал $z(t)$ нулями

до длины, которая будет равна 2^m , где m – минимальное целое число, для которого $N \leq 2^m$. Компонента $x^{(\beta)}(t)$ для достаточно большого значения N частотно локализована в полосе:

$$[\Omega_{min}^{(\beta)}, \Omega_{max}^{(\beta)}] = [1 / (2^{(\beta+1)} \Delta t), 1 / (2^\beta \Delta t)] \quad (2)$$

где Δt – длина временного интервала дискретизации (10^{-3} сек в нашем случае). Связь значений коэффициентов вейвлет-разложений с исходной выборкой подробно описана в [Chui, 1992, Daubechies, 1992; Mallat, 1998; Press et al., 1996], см. также [Любушин, 2000, 2002].

Отметим, что специфика формулы (1) для вейвлет-разложения (поскольку такую же или подобную ей формулу можно записать и при использовании многополосной Фурье-фильтрации), состоит именно в использовании полного ортогонального базиса финитных функций. В этом случае влияние короткоживущих всплесков (как шумов, так и полезных сигналов) неминуемо ограничено по времени, тогда как использование базиса синусов-косинусов, в силу неограниченности их носителя, приводит к возникновению побочных эффектов фильтрации (особенно для сигналов с небольшим числом отсчетов), состоящих в «глобализации» влияния локальных всплесков на весь обрабатываемый временной интервал. В конечном итоге эти побочные эффекты приводят к расплыванию фронтов сейсмических волн после фильтрации и уменьшению точности определения моментов вступлений.

Хотя обычное вейвлет-разложение обладает полезными свойствами высокой точности локализации по времени нестационарных сигналов, обратной стороной этого свойства, в соответствии с принципом Гейзенберга, является слабое разрешение по частоте. Вейвлет-пакетное разложение позволяет частично устранить этот недостаток за счет некоторого ухудшения разрешения по времени. Реализация пакетного расщепления основана на иерархической схеме последовательных преобразований исходных коэффициентов (вейвлет-преобразований от последовательностей вейвлет-коэффициентов). Ортогональное вейвлет-пакетное разложение сигнала, аналогично формуле (1), может быть записано в виде суммы:

$$x(t) = \text{const} + \sum_{\beta=1}^{m_q} \sum_{\gamma=1}^q x^{(\beta,\gamma)}(t) + \sum_{\beta=m_q+1}^m x^{(\beta)}(t) \quad (3)$$

Величина q может быть равна 2, 4, 8, ..., то есть имеет вид $q = 2^r$, $r = 1, 2, 3, \dots$ и определяет число подуровней, на которое расщепляется обычный уровень детальности. Для заданного значения параметра q максимальный номер $m_q < m$ уровня детальности β , который может быть расщеплен, определяется из условия, что он должен содержать минимум q вейвлет-коэффициентов. Компоненты $x^{(\beta,\gamma)}(t)$ частотно-упорядочены, расщепляют частотную полосу (2), соответствующую уровню детальности β на q равных частей. Таким образом, сигнал $x^{(\beta,\gamma)}(t)$ частотно-локализован в полосе:

$$[\Omega_{min}^{(\beta,\gamma)}, \Omega_{max}^{(\beta,\gamma)}], \quad \Omega_{min}^{(\beta,\gamma)} = \Omega_{min}^{(\beta)} + (\gamma - 1) \cdot \Delta\Omega^{(\beta)}, \quad \gamma = 1, \dots, q; \quad (4)$$

$$\Omega_{max}^{(\beta,\gamma)} = \Omega_{min}^{(\beta,\gamma)} + \Delta\Omega^{(\beta)}, \quad \Delta\Omega^{(\beta)} = (\Omega_{max}^{(\beta)} - \Omega_{min}^{(\beta)}) / q$$

В дальнейшем будем использовать только значение $q = 8$. В этом случае компоненту $x^{(\beta,\gamma)}(t)$ назовем γ -ой октавой уровня детальности с номером β . Для вейвлет-пакетного разложения будет использоваться базисную функцию Добеши 8-го порядка, обнуляющую 4 первых момента, для которой фильтр дискретного времени (с его помощью вычисляются как коэффициенты разложения, так и компоненты в формулах (1) и (3)) содержит 8 ненулевых коэффициентов. Этот выбор является результатом большого числа экспериментов с вейвлетами других порядков, а также с автоматическим выбором вейвлета из критериев типа минимума энтропии [Mallat, 1998]. Значение 8 для порядка вейвлета оказалось наилучшим для анализа сейсмических данных: его базисная функция одновременно является и достаточно компактной (с ростом порядка его носитель расширяется) и достаточно гладкой (с уменьшением порядка в финитной базисной функции появляются точки разрыва производных).

Таблица 1. Значения минимальных и максимальных периодов первых 17 перекрывающихся вейвлет-пакетных частотных полос длиной 6 октав.

Номер α полосы	Период $T_{min}^{(\alpha)}$	Период $T_{max}^{(\alpha)}$	Номер α полосы	Период $T_{min}^{(\alpha)}$	Период $T_{max}^{(\alpha)}$
1	2.000	3.200	10	4.267	7.111
2	2.133	3.556	11	4.571	8.000
3	2.286	4.000	12	4.923	8.533
4	2.462	4.267	13	5.333	9.143
5	2.667	4.571	14	5.818	9.846
6	2.909	4.923	15	6.400	10.667
7	3.200	5.333	16	7.111	11.636
8	3.556	5.818	17	8.000	12.800
9	4.000	6.400			

Вейвлет-пакетное разложение позволяет выделить составляющие сигнала в пересекающихся частотных полосах, состоящих из заданного числа p примыкающих друг к другу октав, которые, в то же время, могут принадлежать разным уровням детальности. Эти вейвлет-пакетные частотные полосы смещены друг относительно друга на одну октаву и дают детальное частотно-временное разложение сигнала. Зададим число p примыкающих друг к другу октав. Тогда можно определить целочисленный индекс $\alpha = 1, \dots, \alpha_{max}$, нумерующий последовательно пересекающиеся вейвлет-пакетные частотные полосы длиной по p октав с постепенно увеличивающимися границами максимальных $T_{max}^{(\alpha)}$ и минимальных $T_{min}^{(\alpha)}$ периодов. Значения (p, α_{max}) являются параметрами метода и определяют частотное разрешение (параметр p) и частотный диапазон (параметр α_{max}) вейвлет-пакетного анализа. Для обработки примера данных в статье были выбраны значения $p = 6, \alpha_{max} = 17$. В Таблице 1 приведены соответствия между минимальными и максимальными периодами частотных полос для выбранных значений параметров (p, α_{max}) , измеренных в единицах длины интервала дискретизации Δt .

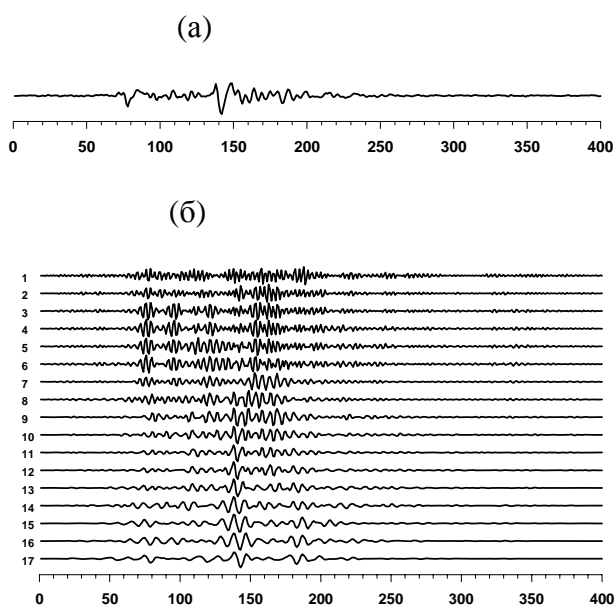


Рис.2

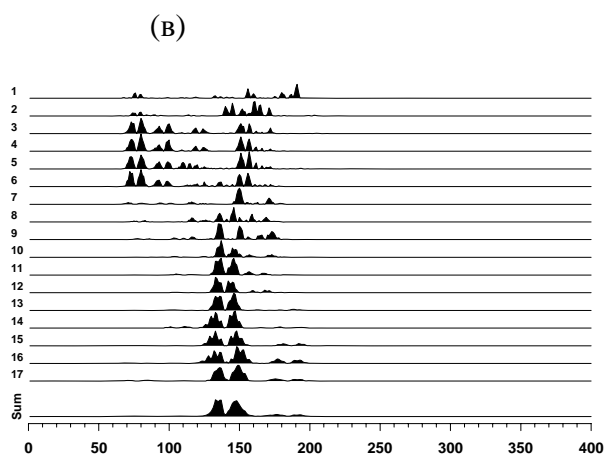


Рис.2(а) – «хорошая» трасса X-21; 2(б) – ее представление в 17 перекрывающихся вейвлет-пакетных частотных полосах с шириной 6 октав; 2(в) – графики поведения мер нестационарности в каждой из частотных полос, самый нижний график (помеченный как sum) является суммой мер нестационарности по всем частотным полосам и демонстрирует наличие сигналов вступлений, S-волна доминирует.

Обозначим через

$$z_{j,k}(t), j = 1, \dots, N_{tr}; k = 1, 2, 3; t = 1, \dots, L \quad (5)$$

совокупность всех 1С сейсмических трасс. Здесь N_{tr} – полное число 3С записей (45 в нашем случае), L – число отсчетов в каждой 1С трассе (400 в нашем случае), индекс $k = 1, 2, 3$ соответствует X, Y и Z-компонентам. Таким образом, первая операция метода состоит в вычислении матрицы:

$$z_{j,k}^{(\alpha)}(t), \alpha = 1, \dots, \alpha_{max} \quad (6)$$

соответствующей системе перекрывающихся частотных полос. На Рис.2(а) изображена исходная 1С трасса X-21 ($j = 21, k = 1$), а на Рис.2(б) – ее разложение (6).

2. *Много-уровневая мера нестационарного поведения.* Пусть $z_{j,k}^{(\alpha)}(t)$ – какая-нибудь компонента частотной полосы с номером α скалярной сейсмической трассы $z_{j,k}(t)$. Возьмем скользящее временное окно радиуса $M^{(\alpha)} = \text{int}(T_{max}^{(\alpha)})$ отсчетов с центральной точкой τ и вычислим дисперсию составляющей полосы α на левой и на правой половинах скользящего окна:

$$(\sigma_{j,k}^{(\alpha)}(\tau/L))^2 = \sum_{t=\tau-M^{(\alpha)}}^{\tau-1} (z_{j,k}^{(\alpha)}(t))^2 / M^{(\alpha)}, \quad (\sigma_{j,k}^{(\alpha)}(\tau/R))^2 = \sum_{t=\tau+1}^{\tau+M^{(\alpha)}} (z_{j,k}^{(\alpha)}(t))^2 / M^{(\alpha)} \quad (7)$$

Вычислим разницу между дисперсиями после чего просуммируем эти разности по всем полосам:

$$\mu_{j,k}^{(\alpha)}(\tau) = [(\sigma_{j,k}^{(\alpha)}(\tau/L))^2 - (\sigma_{j,k}^{(\alpha)}(\tau/R))^2]^2, \quad \mu_{j,k}(\tau) = \sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}} \mu_{j,k}^{(\alpha)}(\tau) \quad (8)$$

Если для какого-то значения τ статистика (8) имеет локальный минимум, это означает, что существует значительная разница между поведением сигнала $z_{j,k}(t)$ слева и справа от точки τ . Суммирование в формуле (8) обеспечивает подавление сильных шумовых составляющих, которые некоррелированы между собой в различных частотных полосах и при суммировании происходит их взаимное гашение. В то же время сигнал вступления имеет коррелированные составляющие в большей части полос и суммирование лишь усиливает всплески статистики (8), относящиеся к моментам вступлений. Рис.2(в) представляет графики значений $\mu_{j,k}^{(\alpha)}(\tau)$ и $\mu_{j,k}(\tau)$ для трассы X-21. Следует заметить, что вариации этих мер для «хороших» сейсмических трасс обычно имеют форму 2-х близко расположенных пиков – это вполне естественно, так как 1-й пик отмечает начало вступления волны, а 2-ой – ее завершение.

3. *Контроль качества 1С трасс.* Процедура автоматического контроля качества 1С трасс использует 3 критерия. Первый критерий основан на вычислении величин:

$$\kappa_{j,k} = \frac{\text{median}_{\tau} \{ \mu_{j,k}(\tau) \}}{\max_{\tau} \{ \mu_{j,k}(\tau) \}} \quad (9)$$

Для хороших скалярных трасс значение медианы статистики (8) определяется малыми фоновыми значениями, тогда как ее максимальные значения соответствуют вступлениям волн и значительно превосходят фон. Поэтому для хороших трасс значение (9) должно быть достаточно мало, тогда как для сбойных трасс с хаотическим или периодическим поведением сигнала это значение будет большим. Таким образом, если:

$$\kappa_{j,k} \geq \kappa_{max} \quad (10)$$

то 1С трасса маркируется как плохая. Значение порога κ_{max} является параметром метода и для нашего примера использовалось значение $\kappa_{max} = 0.04$. На рис.3 представлена скалярная трасса X-41, которая маркирована как плохая согласно критерию (10).

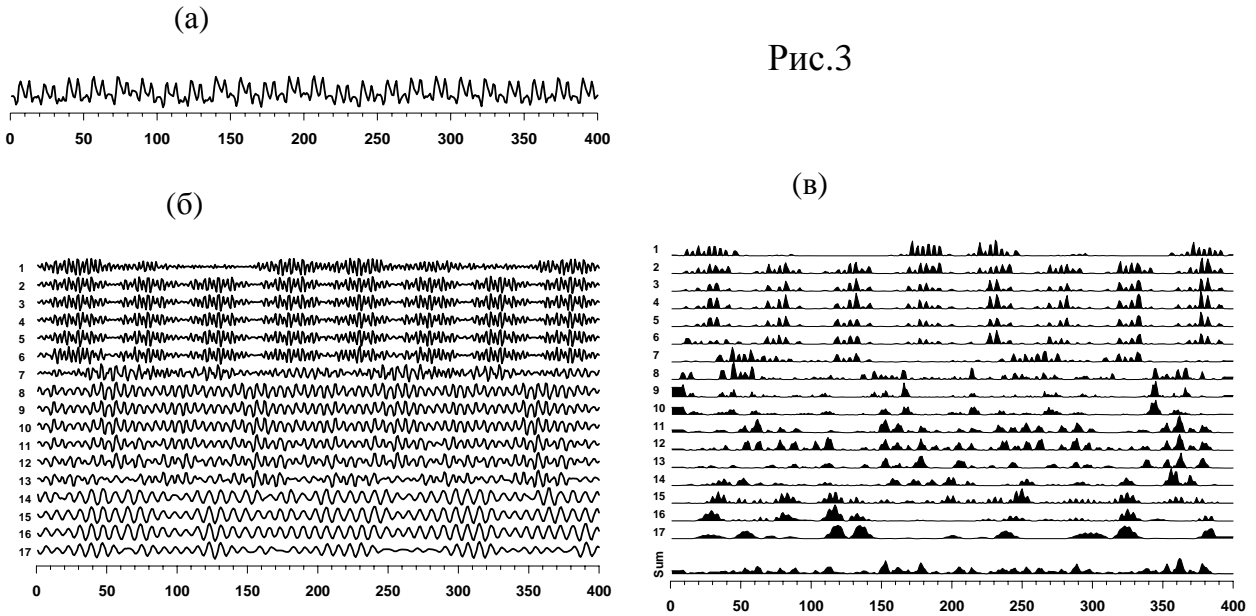


Рис.3

Рис.3(а) – «плохая» трасса X-41; 3(б) – ее представление в 17 перекрывающихся вейвлет-пакетных частотных полосах с шириной 6 октав; 3(в) – графики поведения мер нестационарности в каждой из частотных полос, самый нижний график (помеченный как sum) является суммой мер нестационарности по всем частотным полосам и демонстрирует хаотическое поведение.

Второй критерий качества основан на вычислении нормализованной энтропии распределения значений квадратов обычных вейвлет-коэффициентов сигнала на 1-ом и 2-ом уровнях детальности. Нормализованная энтропия конечного дискретного распределения вероятностей

$p_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n p_i = 1$ определяется формулой:

$$En = \left(- \sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln(p_i) \right) / \ln(n) \quad (11)$$

Таким образом, значения En лежат между 0 и 1. Если в качестве p_i подставить значения квадратов вейвлет-коэффициентов для уровней детальности 1-2, деленные на сумму всех этих значений, а в качестве n взять общее число вейвлет-коэффициентов на первых 2-х уровнях детальности (при $N = 2^n$ это число будет равно $n = 3N / 4$), то значение (11) будет представлять 2-ой критерий $En_{j,k}$ для энтропии 1С трасы $z_{j,k}(t)$. Если трасса обладает хаотическим высокочастотным поведением («дребезг»), то значение $En_{j,k}$ будет большим. Иными словами, если выполняется неравенство

$$En_{j,k} \geq En_{max} \quad (12)$$

то 1С трасса маркируется как плохая. Для анализа данных эксперимента ниже используется порог $En_{max} = 0.25$.

Третий тип «плохих» 1С трасс можно назвать «дутыми», например X-03, X-39, X-42 – они характеризуются слишком большой интенсивностью низких частот. Для их выделения используется критерий отношения энергии «низких» частот к энергии «высоких» частот. Пусть $E_{j,k}^{(L)}$ есть сумма квадратов вейвлет-коэффициентов всех уровней детальности с номерами $\beta > 3$, а $E_{j,k}^{(H)}$ – сумма квадратов коэффициентов для уровней детальности 1-3 обычного (не пакетного) вейвлет-разложения 1С трассы $z_{j,k}(t)$. Рассмотрим отношение:

$$\lambda_{j,k} = E_{j,k}^{(L)} / E_{j,k}^{(H)} \quad (13)$$

Для 3-го типа плохих трасс отношение (13) должно быть велико. Таким образом, если выполняется неравенство

$$\lambda_{j,k} \geq \lambda_{max} \quad (14)$$

то 1С трасса считается плохой. Ниже использовалось значение порога $\lambda_{max} = 2.75$. Если по крайней мере одно из неравенств (10), (12) или (14) выполняется, то 1С трасса маркируется как плохая и исключается из последующего анализа. Скалярные трассы на рис.1, помеченные одиночным восклицательным знаком “!” идентифицированы как плохие на стадии предварительного контроля качества.

Рис.4

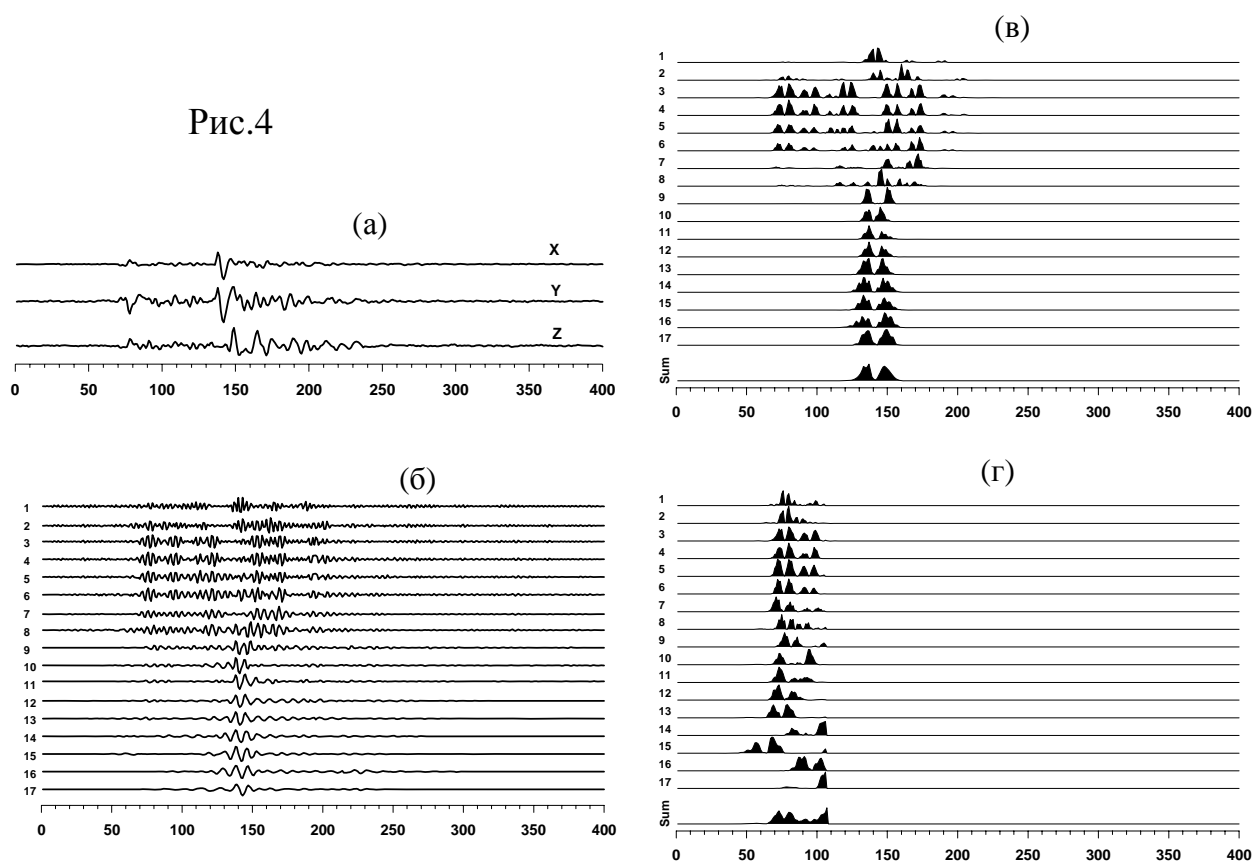


Рис.4(а) – «полностью хорошая» 3-компонентная трасса № 21; 4(б) – ее главные компоненты в 17 перекрывающихся вейвлет-пакетных частотных полосах с шириной 6 октав; 4(в) – графики поведения мер нестационарности в каждой из частотных полос, нижний график (помеченный как sum) является суммой мер нестационарности по всем частотным полосам и демонстрирует наличие сигналов вступления, S-волна доминирует; 4(г) – тот же график, что и на рис.4(в), но построенный для моментов времени строго до вступления S-волн минус значение δt_S , нижний график (помеченный как sum) является суммой мер нестационарности по всем частотным полосам, которая используется для обнаружения вступления P-волны.

Рис.5

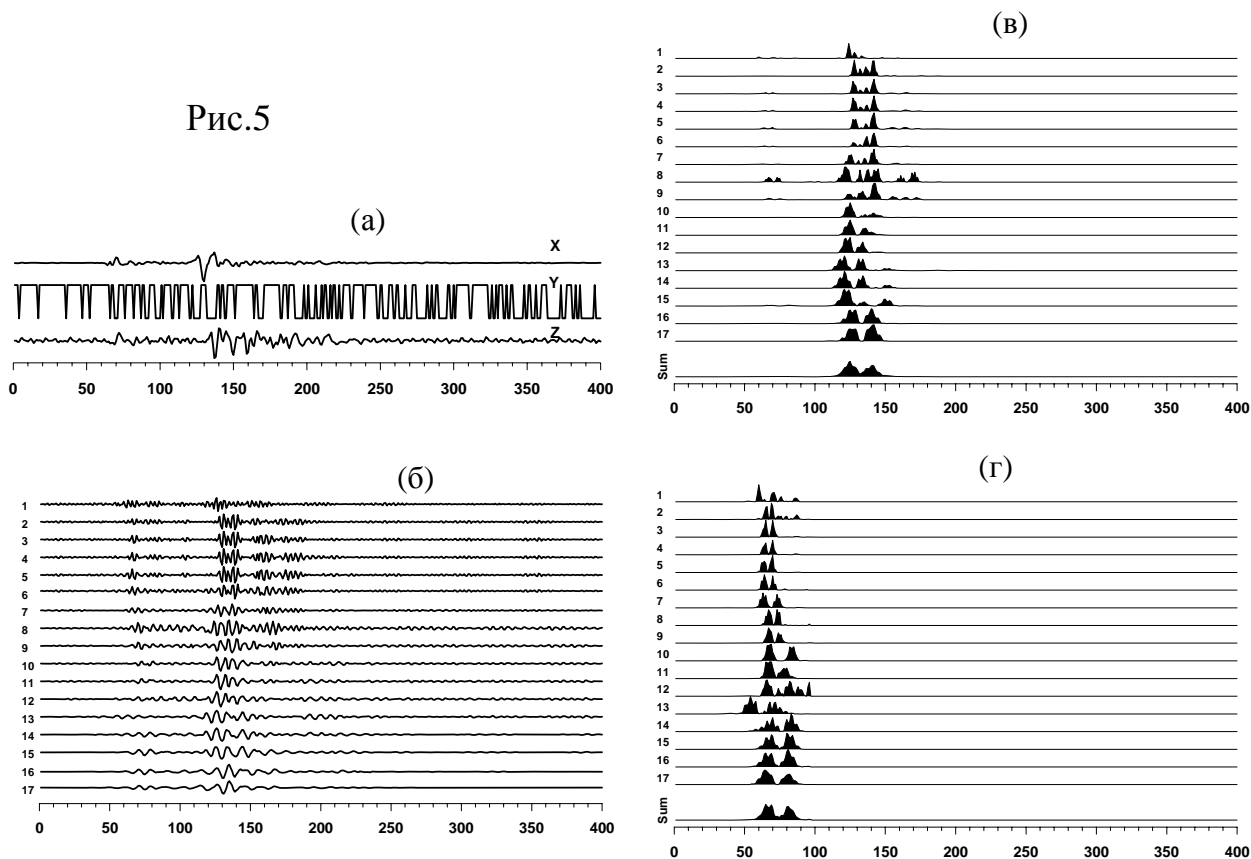


Рис.5(а) – «частично хорошая» 3-компонентная трасса № 43; 5(б) – ее главные компоненты в 17 перекрывающихся вейвлет-пакетных частотных полосах с шириной 6 октав; 5(в) – графики поведения мер нестационарности в каждой из частотных полос, нижний график (помеченный как sum) является суммой мер нестационарности по всем частотным полосам и демонстрирует наличие сигналов вступления, S-волна доминирует; 5(г) – тот же график, что и на рис.5(в), но построенный для моментов времени строго до вступления S-волн минус значение δt_S , нижний график (помеченный как sum) является суммой мер нестационарности по всем частотным полосам, которая используется для обнаружения вступления P-волны.

4. *Масштабно-зависимые главные компоненты.* Те 3С трассы, все скалярные компоненты которых являются плохими, исключаются из анализа. Те 3С трассы, в которых только одна скалярная компонента прошла предварительный тест качества, включаются в анализ данных, но только эта единственная 1С трасса и анализируется. Если же 3С трасса содержит 2 или 3 хороших компонента, то возможно последующее применение метода главных компонент (поляризационного анализа). Главные компоненты для таких 3С трасс вычисляются для каждой из вейвлет-пакетных частотных полос (б).

Для каждой вейвлет-пакетной частотной полосы с номером α главная компонента вычисляется в скользящем временном окне, радиус которого равен $m_p \cdot T_{max}^{(\alpha)}$, где m_p является параметром алгоритма (в расчетах бралось значение $m_p = 10$), а $T_{max}^{(\alpha)}$ есть максимальный период вейвлет-пакетной полосы (в единицах интервала дискретизации – см. таблицу 1). Для каждого положения скользящего временного окна вычисляется выборочная оценка ковариационной матрицы размером 2×2 или 3×3 (в зависимости от того, сколько скалярных компонент прошло тест качества), находится собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу и вычисляется проекция 2-х или 3-мерного вектора сейсмических колебаний на этот собственный вектор. Результат этого проектирования, главная компонента 1С трассы, запоминается лишь для центральной точки скользящего временного окна. Для первого окна, примыкающего к началу записи, главная компонента запоминается для моментов времени из первой половины окна (включая центральную точку), а для последнего окна, примыкающего к концу записи – для второй половины окна. На рис.4(а) и 4(б) представлена «полностью хорошая» 3С трасса № 21 и ее главные компоненты во всех вейвлет-пакетных частотных полосах, а на рис.5(а) и 5(б) – то же самое, но для «частично хорошей» 3С трассы № 43.

5. *Много-уровневые меры нестационарности для главных компонент.* Меры нестационарного поведения скалярной трассы, введенные выше формулами (7) и (8), могут быть вычислены аналогично для масштабно-зависимых главных компонент каждой ЗС трассы. Обозначим их через $\mu_j^{(\alpha)}(\tau)$ и $\mu_j(\tau)$ – в данном случае индекс k для различения X, Y или Z-компонент является излишним и опускается. Если ЗС трасса имеет единственную хорошую 1С компоненту, то для нее используется мера, уже вычисленная ранее в формулах (7) и (8). На рис.4(в) и 5(в) представлены графики зависимостей $\mu_j^{(\alpha)}(\tau)$ и $\mu_j(\tau)$.

6. *Начальные оценки моментов времени вступления S-волн.* Метод сначала определяет моменты вступления S-волн, как в среднем более интенсивных и, следовательно, более просто обнаруживаемых. Пусть j - номер полностью или частично хорошей ЗС трассы, то есть, имеется возможность анализировать статистику $\mu_j(\tau)$. Далее, пусть ξ - центр временного окна радиуса $M_b = 1.5 \cdot T_{max}^{(\alpha_{max})}$ отсчетов для анализа вариаций статистики $\mu_j^{(\alpha)}(\tau)$. Подчеркнем, что в формуле для M_b берется значение максимального периода для последней, самой низкочастотной вейвлет-пакетной полосы с номером α_{max} . Пусть $\bar{\mu}_j$ - среднее значение $\mu_j(\tau)$, вычисленное по всем τ , а $\nu_j(\xi)$ - среднее значение от $\mu_j(\tau)$, вычисленное в скользящем временном окне с центром в точке ξ . Метод определения начальных оценок вступлений S-волн основан на выделении таких моментов времени, для которых $\nu_j(\xi)$ превзойдет порог $\rho \cdot \bar{\mu}_j$, равный произведению общего среднего значения $\bar{\mu}_j$ на некоторый коэффициент ρ . Значения множителя ρ заключены в пределах от 2 до 3 и берутся с достаточно малым равномерным шагом. Следует отметить, что некоторых трасс Р-волна может иметь энергию, сравнимую или даже превосходящую энергию S-волны. Для того, чтобы избежать ошибочной идентификации для этих случаев вступления Р-волны как S-волны, применяется метод анализа пиковых значений статистики $\mu_j(\tau)$ в обратном направлении времени, от конца записи к ее началу. Таким образом, скользящее временное окно движется от конца временного интервала к его началу и ищется первое положение ξ_j^* центра ξ , когда $\nu_j(\xi) > \rho \cdot \bar{\mu}_j$. Затем метод ищет первый момент времени $\tau_j^* \in [\xi_j^* - M_b, \xi_j^*]$ - принадлежащий первой половине скользящего окна, когда значение $\mu_j(\tau)$ превзойдет 85% квантиль распределения значений $\mu_j(\tau)$ внутри интервала $\tau \in [\xi_j^* - M_b, \xi_j^* + M_b]$. Следует подчеркнуть, что τ_j^* зависит еще от значения коэффициента ρ , используемого для определения порога для скользящих средних $\nu_j(\xi)$. Поэтому запишем $\tau_j^* = \tau_j^*(\rho)$. Оптимальное значение параметра ρ находится из условия минимума вариативности значений $\tau_j^*(\rho)$ между соседними трассами:

$$\sum_j |\tau_j^*(\rho) - \tau_{j-1}^*(\rho)| \rightarrow \min_{\rho}, \quad \rho \in [2, 3] \quad (15)$$

Значения $\tau_j^*(\rho)$, где ρ находится из решения задачи (15), берутся в качестве начальных оценок моментов времен вступления S-волны на трассах с номерами j .

7. *Оценка годографа S-волны.* Для уточнения начальных оценок моментов времени вступления S-волн используется итеративная самоорганизующаяся процедура подгонки гиперболических годографов. Определим модельный гиперболический годограф формулой [Hatton et al., 1986]:

$$T_j^* = \sqrt{T_0^2 + (s \cdot (j - j_0))^2} \quad (16)$$

где T_j^* – модельное значение момента вступления, j - номер трассы, (T_0, s, j_0) - параметры модели, в которой s является медленностью волны. Найдем значения параметров из решения задачи:

$$\sum_j |(\tau_j^*)^2 - (T_j^*)^2| \rightarrow \min_{T_0, s, j_0} \quad (17)$$

Те начальные оценки τ_j^* , которые находятся в пределах ± 3 медианы распределения величин $|\tau_j^* - T_j^*|$ в окрестности модельного годографа с параметрами, определенными из (17), не нуждаются в коррекции. Те же значения τ_j^* , которые выходят за эти пределы, подвергаются процедуре коррекции: они заменяются на значения τ , соответствующие максимальным значениям статистики $\mu_j(\tau)$ для аргументов τ , лежащих в вышеуказанных пределах. После этой коррекции процедура подгонки (17) повторяется до тех пор, пока не исчезает необходимость корректировки для всех значений τ_j^* . Если начальные оценки τ_j^* представляют собой выброс от модельного годографа на величину, превосходящую ± 4 медианы, то такие трассы маркируются как плохие и исключаются из анализа – это составляет 2-й, заключительный этап автоматического контроля качества. На рис.1 трассы, отбракованные на 2-ом этапе, помечены двойным восклицательным знаком “!!”.

Если годограф после подгонки (17) своих параметров имеет минимум внутри профиля, то есть $I < j_0 < N_{tr}$, то окрестность трассы j_0 является неблагоприятной для применения метода главных компонент, поскольку там присутствуют сильно коррелированные помехи от близкого вступления Р-волны. В этой ситуации использование вариаций мер $\mu_{j,k}(\tau)$ для индивидуальных скалярных компонент может дать более точное определение вступления S-волны, чем использование меры $\mu_j(\tau)$ для главной компоненты. Таким образом, для полностью или частично хороших ЗС трасс с номером j при условии выполнения $|j - j_0| < 5$ итеративный метод корректировки и подгонки гиперболического годографа включает в себя анализ пиковых значений статистик $\mu_{j,k}(\tau)$ для хороших скалярных компонент k наряду с пиковыми значениями статистики $\mu_j(\tau)$ для главной компоненты. При сравнении этих статистик предпочтение отдается той, для которой 85% квантиль вариаций мер реализует минимальное расстояние от модельного годографа после подгонки его параметров – именно это значение берется для корректировки (если в этом возникает необходимость).

8. *Начальные оценки моментов времени вступления Р-волны.* Моменты вступления Р-волн ищутся после определения годографа S-волны. Метод совершенно аналогичен определению S-годографа, за исключением того, что начальные оценки моментов вступления Р-волн ищутся по вариациям статистик $\mu_j(\tau)$ не для всех значений τ , а лишь удовлетворяющих неравенству

$$\tau < t_s^{(j)} - 2 \cdot T_{max}^{(\alpha_{max})} \equiv t_s^{(j)} - \delta t_s \quad (18)$$

где $t_s^{(j)}$ - момент времени S-годографа на трассе с номером j . На рис.4(г) и 5(г) изображены графики мер $\mu_j^{(\alpha)}(\tau)$ и $\mu_j(\tau)$, для моментов времени $\tau \leq t_s^{(j)} - \delta t_s$, которые используются для определения начальных оценок вступления Р-волн. Отметим, что графики на рис.4(г) и 5(г) соответствуют тем же вариациям, что и на рис.4(в) и 5(в), но они не видны на фоне значительно более сильных изменений, связанных с вступлениями S-волны. Когда же при построении графиков ограничились временами $\tau \leq t_s^{(j)} - \delta t_s$, то предшествующие вариации стали различимыми.

9. *Оценка годографов Р-волны.* Для нахождения Р-годографа используется тот же метод итераций с подгонкой модели гиперболического годографа, что и для S-волны, но медленность Р-волны ищется не

превосходящей по своему значению ранее найденной медленности S-волны, деленной на $\sqrt{2}$. На рис.6 представлены графики обоих годографов вместе с их ошибками, составляющими 3 медианы отклонения начальных оценок от итоговых S и P-годографов.

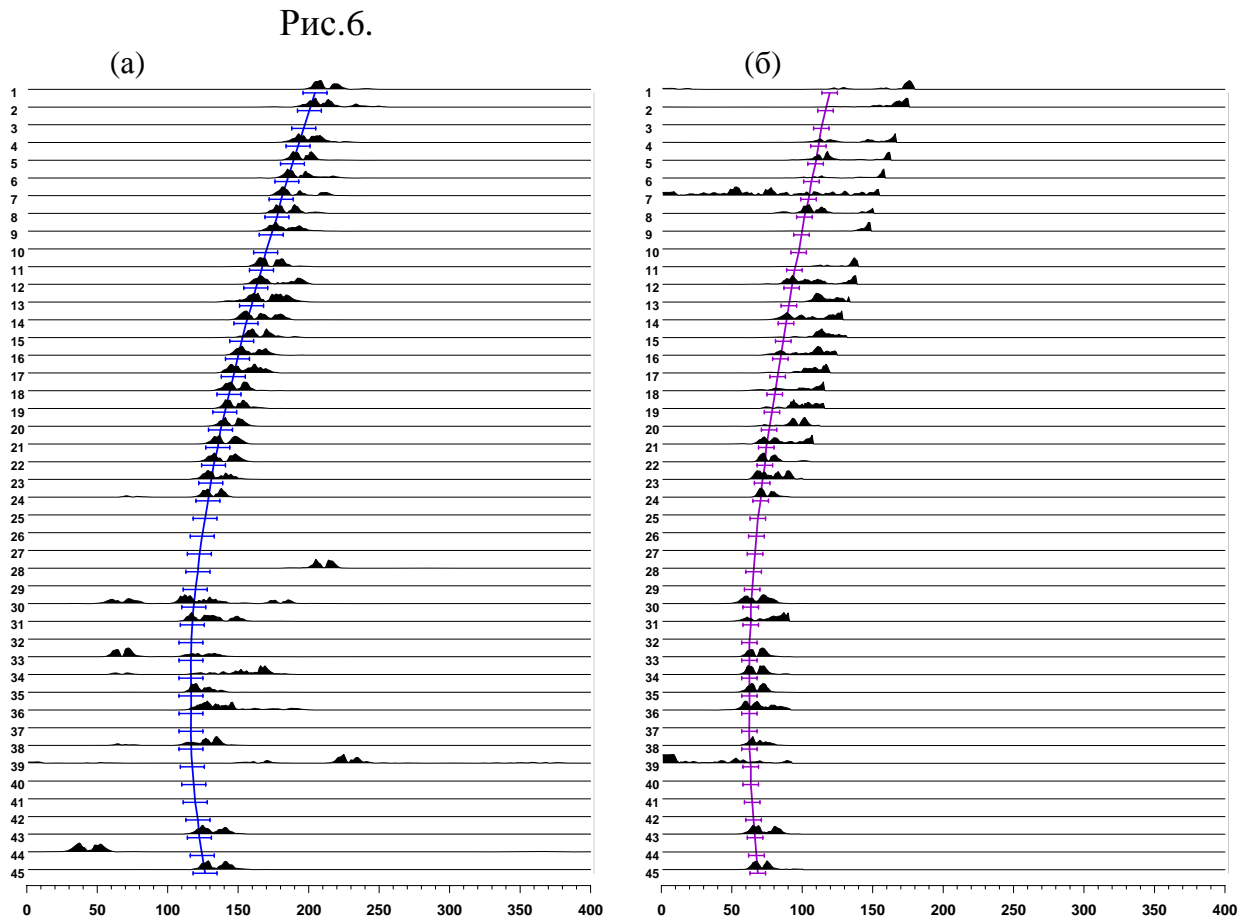


Рис.6 – полученные годографы вступления S-волн (рис.6(а)) и P-волн (рис.6(б)) с горизонтальными штрихами ошибок определения. На рис.6(а) изображены вариации много-уровневной статистики для всех трасс, которые не были классифицированы как «целиком плохие» на 1-ой стадии автоматического контроля качества: 6(б) – те же самые меры нестационарности, но построенные для моментов времени строго до вступления S-волн минус значение δt_s для всех трасс, которые не были классифицированы как «целиком плохие» на 2-ой стадии контроля.

Итак, полный список параметров метода:

1. p - число октав в вейвлет-пакетных перекрывающихся частотных полосах;
2. α_{max} - максимальное число вейвлет-пакетных полос;
3. κ_{max} - порог для применения критерия (10) автоматического контроля качества;
4. En_{max} - порог для применения критерия энтропии (12);
5. λ_{max} - порог для применения энергетического критерия (12);
6. m_p - параметр, определяющий радиус масштабно-зависимого скользящего временного окна для вычисления главных компонент.

Выводы

Разработан и апробирован метод автоматической идентификации моментов времени вступления продольных и поперечных волн для задач пассивного сейсмического мониторинга в задачах скважинной сейсморазведки для ситуаций низкого отношения «сигнал/шум» и при наличии большого числа сбойных однокомпонентных трасс. Метод основан на комбинации идей вейвлет-пакетного разложения сейсмических записей и поляризационного анализа. Разработанные идеи автоматической маркировки

сбойных трасс и накопления полезной информации путем вычисления суммы вариаций многоуровневных мер нестационарности могут найти применение в задачах мониторинга слабых сейсмических событий. Работа была выполнена при финансовой поддержке Исследовательского центра Шлюмберге в Кембридже (Schlumberger Cambridge Research). Автор благодарит Дэвида Лесли (David Leslie) за полезные обсуждения, замечания и комментарии.

ЛИТЕРАТУРА

- Гашии А.Н., А.Ф.Кушнир (1998) Изучение аномалий распространения региональных сейсмических фаз по данным малоапертурной группы Алибек. – Вопросы геодинамики и сейсмологии: Сб. науч. тр. – М., 1998, 355с, (Вычислительная сейсмология, вып.30), с.316-335.
- Кушнир А.Ф., Л.М.Хайкин (2000) Обработка данных в автоматизированной системе для сейсмического мониторинга с помощью малоапертурной группы. – Проблемы динамики и сейсмичности Земли: Сб. науч. тр. – М., 2000, 324с, (Вычислительная сейсмология, вып.31), с.273-289.
- Любушин А.А. (2000) Вейвлет-агрегированный сигнал и синхронные всплески в задачах геофизического мониторинга и прогноза землетрясений. – Физика Земли. N3. С.20-30.
- Любушин А.А. (2002) Робастный вейвлет-агрегированный сигнал для задач геофизического мониторинга – Физика Земли. 2002, N9. С.37-48.
- Любушин А.А., З.Калаб, Н.Частова (2004) Использование вейвлет-анализа для автоматической классификации трехкомпонентных сейсмических записей. – Физика Земли, 2004, N7, с.50-56.
- Chui, C.K. (1992) An Introduction to Wavelets, Academic Press, San Diego, CA (Русский перевод: Чуи Ч. Введение в вейвлеты. М., Мир, 2001, 412с.).
- Daubechies I. (1992) Ten Lectures on Wavelets. No.61 in CBMS-NSF Series in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia (Русский перевод: Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 464с.).
- Hatton L., Worthington M.H., Makin J. (1986). Seismic Data Processing. Theory and Practice. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London (Русский перевод: Л.Хаттон, М.Уэрдингтон, Дж.Мейкин, Обработка сейсмических данных. Теория и практика. М.: «Мир», 1989, 215с.).
- Kanasewich E.R. (1981), Time Series Analysis in Geophysics. The University of Alberta Press (Русский перевод: Канасевич Э.Р., Анализ временных последовательностей в геофизике. М.: «Недра», 1985, 400с.).
- Mallat S. (1998) A wavelet tour of signal processing. Academic Press. San Diego, London, Boston, N.Y., Sydney, Tokyo, Toronto. 577 p.
- Maxwell, S.C., Bossu, R., Young, R.P. and Dangerfield, J. (1998) Processing of induced microseismicity recorded in the Ekofisk Reservoir: Annual Meeting Abstracts, Society Of Exploration Geophysicists, 904-907.
- Maxwell, S.C., Urbancic, T.I., Falls, S.D. and Zinno, R. (2000) Real-Time Microseismic Mapping of Hydraulic Fractures in Carthage, Texas: Expanded Abstracts, Society Of Exploration Geophysicists, Session: RC2.9.
- Pisarenko V.F., A.F.Kushnir, I.V.Savin. (1987) Statistical adaptive algorithms for estimation of onset moments of seismic phases. – Phys. Earth Planet. Interiors. Vol.47, pp.4-10.
- Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A. and Vetterling W.T. (1996) Numerical Recipes, 2-nd edition, Chapter 13, Wavelet Transforms, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Seismic signal analysis and discrimination. Methods in Geochemistry and Geophysics, 17 (1982) – Edited by C.H. Chen, reprinted from Geoexploration, vol.20, No.1/2 – Elsevier Scientific, Amsterdam, Oxford, N.Y. (Русский перевод: Анализ и выделение сейсмических сигналов: Пер. с англ./ Под ред. Ч.Чженя. – М., Мир, 1986, 240с.).
- Zinno, R.J., Gibson, J., Walker Jr., R.N. and Withers, R.J. (1998) Overview: Cotton Valley Hydraulic Fracture Imaging Project: Annual Meeting Abstracts, Society Of Exploration Geophysicists, 926-929.