

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИНХРОННЫХ ДАННЫХ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО АКТИВНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

О.А. Хачай, В.С. Дружинин, Г.И. Парыгин, О.Ю. Хачай*

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

** Уральский государственный университет, 620083, Екатеринбург, просп. Ленина, 51, Россия*

Изложены результаты обработки синхронных площадных трехкомпонентных сейсмических данных от промышленных взрывов. Использован предложенный авторами анализ вейвлет-представлений параметра сейсмической неоднородности. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования промышленных взрывов в виде составной части активного сейсмического мониторинга состояния геологической среды.

Вейвлет-анализ, параметр сейсмической неоднородности, активный сейсмический мониторинг, промышленные взрывы.

WAVELET ANALYSIS IN PROCESSING CONTROLLED-SOURCE THREE-COMPONENT SIMULTANEOUS SEISMIC DATA

O.A. Khachai, V.S. Druzhinin, G.I. Parygin, and O.Yu. Khachai

Three-component simultaneous seismic records of quarry blasts were processed using a new approach of wavelet representation of the inhomogeneity parameter. The results show that quarry blasts can be successfully used in controlled-source seismic monitoring.

Wavelet analysis, seismic inhomogeneity, controlled-source monitoring, quarry blasts

ВВЕДЕНИЕ

При изучении динамики сложно построенной геологической среды важную роль играет установление факторов, чувствительных к ее изменению для выбранной системы наблюдения. В Институте геофизики УрО РАН разработаны теоретические принципы комплексных электромагнитных и сейсмических исследований в частотно-геометрическом варианте с использованием контролируемого сосредоточенного источника заданной геометрии: в электромагнитном случае — вертикальный магнитный диполь, в сейсмическом — вертикальная сосредоточенная сила [1]. Этот теоретический подход реализован на практике в виде попланшетной методики в сейсмическом и электромагнитном вариантах при решении задач картирования приповерхностных неоднородностей [2], а также при моделировании сейсмического отклика коровых гетерогенных структур [3]. В настоящее время происходит изменение модельных представлений о строении среды от слоистых и пологих хорошо отражающих структур до дискретно иерархических или так называемых гетерогенных структур [4], которые в волновом поле характеризуются в основном рассеянными нерегулярными волнами, обладающими свойствами пространственно-временного фокусирования. Необходимость перехода к новому классу моделей диктуется в первую очередь не решением задач картирования трехмерных структур, а необходимостью изучения динамики свойств и состояния этих структур и прогноза этой динамики. Изучение динамики свойств, структуры и состояния массивов горных пород в удароопасных шахтах [5] показало, что разработанная частотно-геометрическая попланшетная методика, преобразованная в многоуровневую объемную методику для подземного варианта, является информативным средством, а наиболее чувствительный фактор в ней — параметр сейсмической или электромагнитной неоднородности, определяемый как отношение модуля амплитуды горизонтальной компоненты, перпендикулярной к направлению на источник, к модулю амплитуды горизонтальной компоненты, направленной на источник.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОНИТОРИНГ

В настоящей работе анализируются сейсмические данные, полученные при использовании в качестве источника возбуждения техногенных взрывов в карьерах, расположенных в различных азимутах от пунктов наблюдения. Мы рассмотрели два варианта мониторинга.

Первый вариант пространственно-временного мониторинга реализован в виде одного планшета, при расположении источника возбуждения приблизительно в центре планшета (пункт Асбест (южный)). Взрывы производились в трех пунктах: Асбест (южный), Асбест (центральный), Асбест (северный), расположенных на расстоянии нескольких километров друг от друга. Однако в этом варианте производился анализ отклика среды в пересчете на координаты пункта Асбест (южный). Точки наблюдения расположены в 8 пунктах вокруг источника возбуждения на расстояниях от 30 до 48 км (рис. 1).

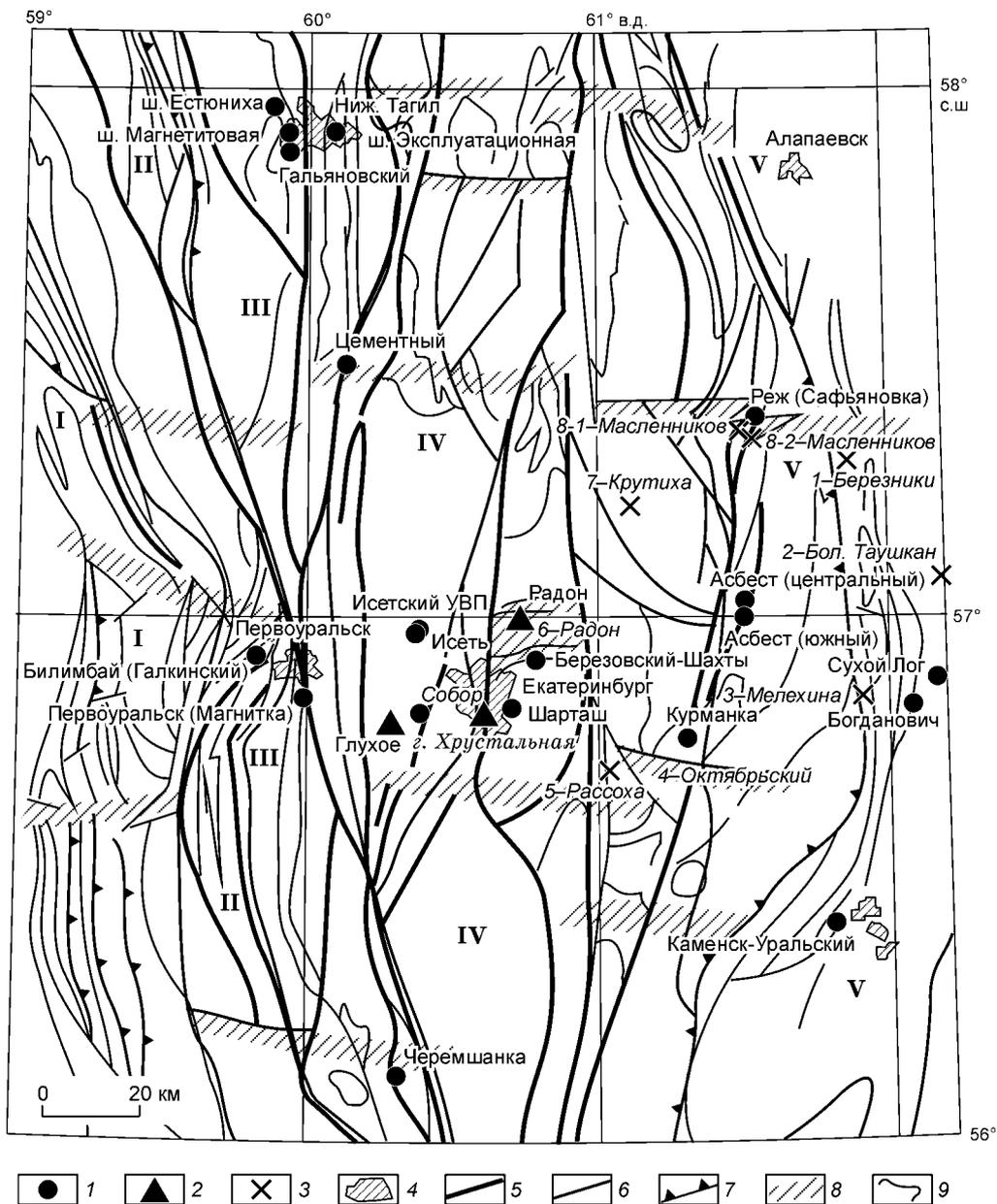


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения и пунктов взрыва на площади работ.

1 — промышленный пункт взрыва; 2 — пункт наблюдения 2000 г.; 3 — пункт наблюдения 2001 г.; 4 — населенный пункт. **Элементы разломной тектоники:** 5 — глубинные разломы, совпадающие, как правило, с контурами тектонических структур I порядка; 6 — разломы, совпадающие с контурами структурно-фациальных зон II порядка и крупными интрузивными комплексами; 7 — надвиговые зоны; 8 — возможные субширотные дислокации; 9 — контуры некоторых составляющих структур I порядка. **Тектонические структуры,** по [9]: I — Западно-Уральская внешняя зона складчатости; II — Центрально-Уральское поднятие; III — Тагильско-Магнитогорский прогиб; IV — Восточно-Уральское поднятие; V — Восточно-Уральский прогиб; VI — Зауральское поднятие.

Для обработки использованы синхронные трехкомпонентные сейсмические записи, которые получены с помощью двух комплектов аппаратуры: аналоговой станцией КАРС „Черепаша“ и цифровыми станциями „Дельта-ГЕОН“. В табл. 1 перечислены последовательные события (взрывы), даты и время суток в часах и минутах по Гринвичу, сейсмические отклики от которых в дальнейшем обрабатывались и анализировались. При оцифровке данных, записанных станцией КАРС, использовалась частота дискретизации 40 Гц. Данные, записанные цифровыми станциями, для событий 1—12 (см. табл. 1) имели частоту дискретизации 71,4 Гц, для 13—17 — 35,7 Гц. Станцией КАРС велось наблюдения в пунктах Березники (1), Радон (6), Крутиха (7), Масленников (8), станциями „Дельта-ГЕОН“ — в пунктах Бол. Таушкан (2), Мелехина (3), Октябрьский (4), Рассоха (5), Радон (6) (см. рис. 1).

Таблица 1.

Промышленные взрывы в пункте Асбест, произведенные в 2001 г.

Дата и время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Число	09	14	15	29	30	21	28	01	02	05	09	11	12	18	22	23	25
Месяц	08	08	08	08	08	09	09	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Время (по Гринвичу), ч. мин	10.35	10.33	10.33 10.34	10.28	10.33	10.30	10.30	10.36	10.35	10.38	10.54	10.28	10.37	10.29	10.31	10.45	10.32 10.33

Предварительно горизонтальные компоненты X и Y для соответствующих точек переводились в компоненты: U_r , направленную на источник, и U_ϕ — перпендикулярную к ней, используя данные об азимуте точки наблюдения относительно точки взрыва. Начало координат расположено в пункте Асбест (южный), ось OX направлена на север.

Сейсмические записи переводились в вейвлетные представления [6]. При частоте дискретизации 40 или 35,7 Гц длина обрабатываемой записи составляла $T_{\max} = 2$ мин при частоте дискретизации 71,4 Гц $T_{\max} = 1,4$ мин. Начало записи для обработки практически для всех записей составляло 7,5 с до начала отклика среды на взрыв. Некоторые из записей содержали два отклика (на первый и повторный взрывы). Обработка этих записей велась единообразно с записями, содержащими одиночный отклик. Алгоритм и программа составлены О.Ю. Хачай, в основе которых лежит представление, изложенное в [7]:

$$F_{iN}(a, b) = \int_0^{T_{\max}} U_{iN}(t) W(a, b, t) dt, \quad (1)$$

где $W(a, b, t) = a(t-b) \exp((-a/2) \cdot (t-b)^2)$; $U_{iN}(t)$ — компоненты сейсмических записей U_z, U_r, U_ϕ ; $F_{iN}(a, b)$ — соответственно их вейвлет-представления F_z, F_r, F_ϕ ; i — номер пункта; N — номер взрыва. Интеграл (1) после приведения к безразмерному виду путем замены переменной $\tilde{t} = (t - b)/1000$ приводится к виду

$$F_{iN}(a, b) = A \int_0^{\tilde{T}_{\max}} U_{iN}(\tilde{t}) W(a, b, \tilde{t}) d\tilde{t}, \quad (2)$$

где A — нормировочная константа, $\tilde{T}_{\max} = (T_{\max} f_1)/1000$, $f_1 = 40$ Гц.

Параметр a в (1) определяется по формуле: $0,05 \cdot 1,5^k$, $k = 1, 2, 3, \dots, 15$. При численном интегрировании (2) шаг интегрирования определяется следующим образом: для частоты дискретизации 40 Гц $d\tilde{t} = 0,001$, для частоты 71,4 Гц $d\tilde{t} = 0,001 \cdot (14/25)$, для частоты 35,7 Гц $d\tilde{t} = 0,001 \cdot (28/25)$. Параметр $b = 0, \dots, L \cdot d\tilde{t}$, L — количество отчетов в записи.

Далее вычисляются вейвлет-представления параметра сейсмической неоднородности во всех точках наблюдения и для всех N событий (взрывов):

$$\Delta_{i,N}(a, b) = \lg(|F_\phi|/|F_r|).$$

Для последовательных событий с номерами N и $N + 1$ для каждого пункта наблюдений вычислен коэффициент корреляции r между $\Delta_{i,N}(a, b)$ и $\Delta_{i,N+1}(a, b)$ для всех значений a и b . На рис. 2,а представлена зависимость коэффициентов последовательной корреляции как функции N событий (взрывов) для пункта (б) Радон (см. рис. 1).

Смысл этих кривых — стабильность отклика среды, т. е. параметра сейсмической неоднородности, на контролируемое воздействие. Чем больше коэффициент корреляции r , тем более устойчиво во времени состояние блока геологической среды, в котором находится точка наблюдения. В дальнейшем эти кривые будем называть кривыми стабильности для конкретного пункта наблюдения. Данные в пункте Радон (б) получены двумя станциями: цифровой станцией „Дельта-ГЕОН“ и станцией КАРС „Черепаша“. Коэффициент корреляции между полученными кривыми стабильности равен 0,97, что характеризует высокую степень идентичности двух комплектов аппаратуры. Однако от события к событию уровень коэффициентов последовательной корреляции не превышает по модулю 0,6, большая часть значений находится в полосе от $-0,2$ до $0,2$, что говорит о низкой коррелированности вейвлет-представления параметра сейсмической неоднородности от события к событию или о низкой стабильности этого отклика.

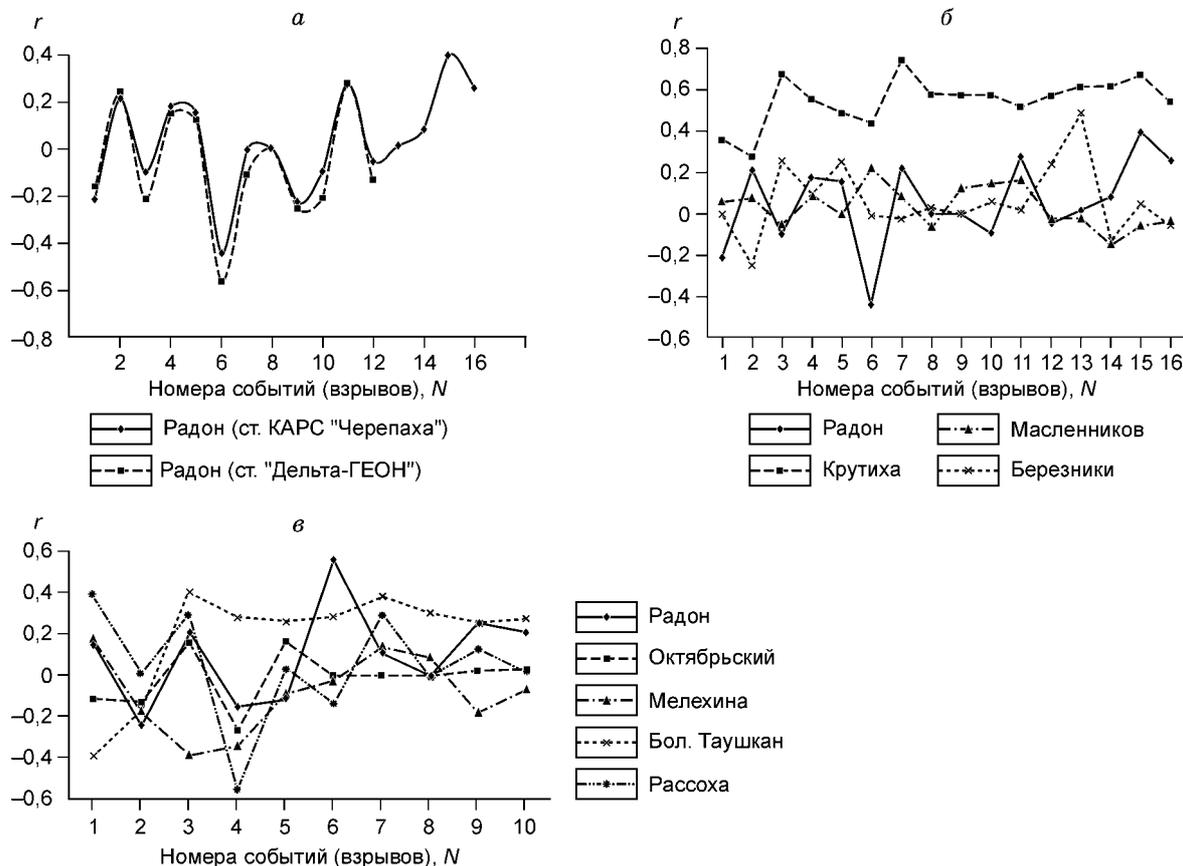


Рис. 2. Коэффициенты последовательной корреляции параметра сейсмической неоднородности в вейвлет-представлении в зависимости от временной последовательности событий (взрывов).

Пункт взрыва — Асбест: *а* — пункт наблюдения Радон (*б*), 2001 г.; *б* — пункты 1, 6, 7, 8; *в* — пункты 2, 3, 4, 5, 6.

Кривые стабильности для остальных пунктов, рассортированных по типу используемой аппаратуры, изображены на рис. 2, *б*, *в*. Наибольший уровень стабильности проявляется в пункте (7) Крутиха (см. рис. 2, *б*) и (2) Бол. Таушкан (см. рис. 2, *в*), коэффициент корреляции для этих двух кривых составил 0,81.

Сопоставляя полученные результаты с геологическими данными, мы видим, что обе эти точки расположены в протяженных однородных блоках (см. рис. 1), которые классифицируются с геологических позиций как устойчивые. С другой стороны, именно для этих пунктов получены отличные от остальных кривые стабильности с наибольшими значениями коэффициентов последовательной корреляции, что по смыслу их введения должно свидетельствовать об устойчивости среды в этих точках к контролируемому техногенному воздействию. Это согласуется и с геологическим прогнозом. Остальные пункты демонстрируют низкий уровень коррелированности, не превышая соответствующего уровня в пункте *б*.

Нами проанализирована пространственная попарная коррелированность кривых стабильности для всего набора обработанных событий, зарегистрированных в рамках системы наблюдений первого варианта. В результате можно выделить пункты Октябрьский (4) и Рассоха (5), для которых коэффициент попарной корреляции кривых стабильности равен 0,51, а также пункты Бол. Таушкан (2) и Березники (1), для них коэффициент попарной корреляции равен 0,52. Вследствие того, что для анализа использовались синхронные сейсмические записи, можно считать, что пункты 4 и 5, 1 и 2 находятся попарно в геологических условиях с подобной стабильностью отклика на контролируемое воздействие. Действительно, пункты 4 и 5 расположены в зонах широтных дислокаций (см. рис. 1), а пункты 1 и 2 — в пределах структуры первого порядка, вблизи границы надвиговой зоны (см. рис. 1). Таким образом, в рамках предложенного анализа сейсмической информации эти различные типы нарушений описываются практически одним и тем же значением коэффициента попарной корреляции кривых стабильности (0,52). Однако это наибольшее для исследуемого участка значение коэффициента корреляции меньше порогового значения 0,7, когда можно говорить о попарной линейной взаимозависимости кривых стабильности.

Таблица 2.

**Пространственное распределение произведенных в 2000 г.
промышленных взрывов в зависимости от времени**

<i>N</i>	<i>T</i> , сут.										
1	0,44	1	17,44	3	29,46	12	39,44	9	60,40	10	78,45
1	0,45	11	18,43	6	30,40	7	42,40	15	64,29	9	80,40
2	3,38	5	21,05	1	30,44	10	43,44	7	64,40	6	80,41
1	3,45	1	21,44	7	31,45	14	52,28	4	64,48	1	80,44
3	3,50	7	22,38	2	32,25	15	53,34	1	66,44	15	81,23
4	3,51	11	22,41	10	32,44	2	53,40	9	67,39	5	83,08
5	6,10	10	23,44	4	32,53	10	53,44	12	67,45	1	84,44
6	7,42	10	23,45	13	33,08	3	57,48	14	70,36	3	85,44
7	9,41	4	23,58	5	34,08	16	58,27	1	70,44	12	85,53
1	10,44	9	24,39	1	35,44	11	58,28	10	72,44	10	86,45
8	10,44	1	24,44	10	37,45	17	58,29	16	74,27	16	88,29
9	11,40	10	25,44	6	38,41	7	58,39	2	74,38	3	88,45
10	11,45	1	28,44	1	38,44	10	58,44	3	74,43	4	88,49
6	17,39	8	29,38	1	38,44	10	58,45	18	76,34		
7	17,40	7	29,40	10	39,44	1	59,44	1	77,44		

Примечание. *N* — пункты взрывов (см. рис. 1): 1 — Асбест (южный); 2 — Реж; 3 — Исеть; 4 — Курманка; 5 — Естюниха; 6 — Цементный; 7 — Первоуральск (Магнитка); 8 — Сухой Лог; 9 — Черемшанка; 10 — Асбест (центральный); 11 — Гальяновский; 12 — Березники-Шахты; 13 — Магнетитовая; 14 — гора Хрустальная; 15 — Богданович; 16 — Билимбай (Галкинский); 17 — Каменск-Уральский; 18 — Эксплуатационная.

Особо выделяются пункты Мелехина (3) и Масленников (8): коэффициенты попарной корреляции кривых стабильности для пунктов (4) и (3), (2) и (8) меньше 0,2, что, возможно, свидетельствует об иной, нелинейной, более значительной чувствительности геологической среды на производимые взрывы в пунктах (3) и (8) по сравнению с остальными пунктами. Геологическая информация подкрепляет этот вывод (см. рис. 1): пункты (8) и (2) расположены в разных блоках, по разные стороны от меридиональной разломной тектонической зоны, кроме того пункт (8) расположен вблизи двух субширотных дислокаций. Сочетание влияния двух разноуровневых структурных нарушений в блоке, в котором находится точка наблюдения, приводит к тому, что и кривая стабильности находится в полосе $-0,2—0,2$ (см. рис. 2, б). Пункт (3) расположен ближе всего к точке взрыва, тем не менее кривая стабильности в этом пункте за исключением двух событий 3 и 4 (см. рис. 2, в) находится также в полосе $-0,2—0,2$. Пункт (3) расположен (см. рис. 1) в структуре первого порядка аналогично пункту (2), но вблизи различных тектонических зон. Возможно, в этом пункте наблюдений сказываются сильнее близповерхностные зоны нарушений, исследование структуры и состояния которых необходимо осуществить методами с большим разрешением.

Имеющаяся геологическая информация о разломной тектонике исследуемой площади свидетельствует о том, что пункты (3) и (8) находятся в зоне различных, не связанных между собой разломов, остальные пункты наблюдений не связаны с этой зоной тектонических нарушений. Исключение составляет пункт Березники (1), который по геологической информации находится в одной зоне разломов с пунктом Мелехина (3), однако эта зона, по всей вероятности, представляет не сплошную, а прерывистую, возможно, гетерогенную зону. Этому не противоречат и наши результаты: коэффициент попарной корреляции кривых стабильности пунктов Бол. Таушкан (2) и Березники (1) равен 0,52, а пунктов Бол. Таушкан (2) и Мелехина (3) — 0,32.

Таким образом, в рамках первого варианта системы наблюдений и соответствующей обработки синхронных сейсмических записей с использованием вейвлет-анализа получены количественные параметры, которые могут быть положены в основу классификации относительной устойчивости различных блоков геологической среды, содержащей разноуровневые тектонические и структурные нарушения. В дальнейшем эта методика может быть опробована для изучения динамики состояния тектонически нарушенных участков геологической среды, находящейся под значительным техногенным воздействием в виде карьерных взрывов.

Эти результаты получены при интегральном анализе сейсмических трасс, включающих временные интервалы: отрезок фоновой записи, отражающей состояние среды до взрыва, собственно сейсмический отклик на взрыв и временной отрезок, включающий сейсмическую коду. Вейвлет-анализ с использованием различных типов вейвлетных функций [8] может позволить анализировать сейсмические сигналы, соответствующие этим трем интервалам в отдельности. При этом достигается возможность анализировать

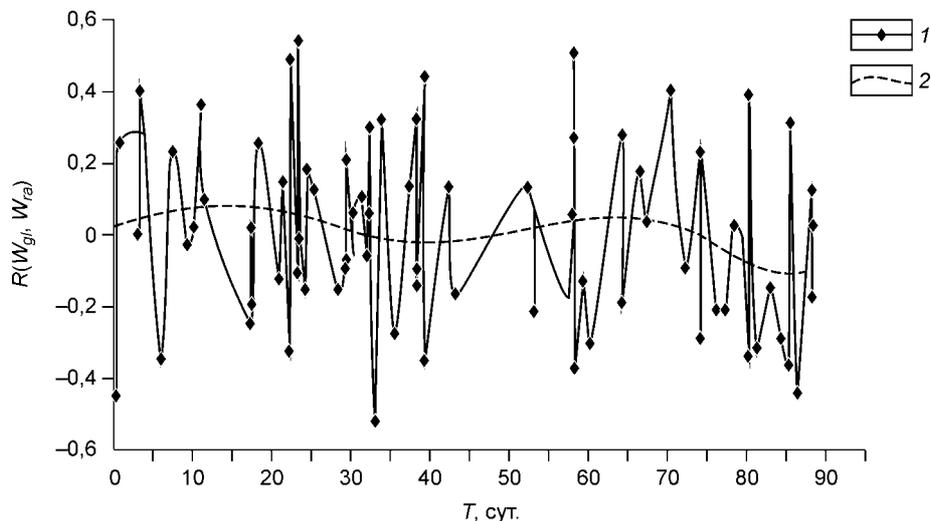


Рис. 3. Изменение во времени коэффициента попарной корреляции между вейвлет-представлениями параметра сейсмической неоднородности по синхронным данным в пунктах Глухое и Радон от промышленных взрывов, произведенных в различных азимутах.

1 — значения коэффициента попарной корреляции; 2 — линия тренда (6-й степени).

тонкую структуру вейвлет-образа отклика гетерогенной среды. Он, безусловно, зависит от многих факторов, связанных не только со строением и состоянием геологической среды, но и с источником возбуждения.

Для изучения влияния источника возбуждения нами был рассмотрен второй вариант мониторинга, при котором точки наблюдения находятся практически в центре планшета (пункты Радон и Глухое), а источники в виде техногенных взрывов в карьерах расположены в различных азимутах вокруг них (см. рис. 1, табл. 2). Измерения производились с помощью той же аналоговой аппаратуры КАРС „Черепаха“. Обработка велась теми же алгоритмами и программными средствами, описанными выше.

Приведенные изменения во времени коэффициента попарной корреляции между вейвлет-представлениями параметра сейсмической неоднородности (рис. 3) в пунктах Глухое и Радон построены с использованием синхронных сейсмических записей от всего набора техногенных взрывов, описанных в табл. 2 и показанных на рис. 1. Эта зависимость имеет знакопеременный характер. Нами был построен ее тренд, задаваемый полиномом 6-й степени, отклонение которого от нуля по модулю для данного отрезка времени мониторинга оказалось не более 0,1. Эта зависимость может быть в дальнейшем использована как фактор классификации степени устойчивости среды для исследуемого участка до глубины 15—20 км. Для этого необходимо провести аналогичные исследования, например, около пунктов Крутиха и Бол. Таушкан (см. рис. 1), которые выделены нами по предыдущему варианту мониторинга как пункты наиболее устойчивые к техногенному воздействию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами предложена методика обработки с использованием вейвлет-анализа данных пространственно-временного 3-компонентного активного сейсмического мониторинга. В качестве анализируемого параметра используется вейвлет-представление параметра сейсмической неоднородности, вычисленного по горизонтальным компонентам сейсмических записей. Нами введен новый параметр, названный кривой стабильности, который определяется как распределение коэффициентов корреляции вейвлет-представлений параметра сейсмической неоднородности для пар последовательных событий-взрывов. На основании этого параметра строится классификация устойчивости состояния участков геологической среды для каждого пункта наблюдений в отдельности. Чем выше значение этого параметра, тем более динамически устойчив блок, в котором находится точка наблюдения. Этот вывод базируется на геологической и геотектонической информации. Следующий параметр попарной пространственной корреляции кривых стабильности позволил ввести градации по степени потенциальной неустойчивости изучаемых блоков среды. Эти градации были сопоставлены с типами геологических нарушений, в непосредственной близости которых находились пункты наблюдения. Использование вейвлет-анализа позволяет производить анализ сейсмической информации на разных временных масштабных уровнях. В этой работе это преимущество использовалось только в виде интегральных характеристик. Использование

дифференциальных характеристик накладывает более строгие требования к исходному материалу и методике его получения. В настоящей работе проанализирован сейсмический материал, полученный с использованием промышленных взрывов в качестве источников возбуждения. В условиях промышленно развитых районов эта методика может быть использована как составная часть активного сейсмического мониторинга при изучении динамики состояния геологической среды. С помощью предлагаемой методики осуществимо структурно-тектоническое районирование и выделение динамически активных зон для исследуемого участка. Эта методика будет развиваться в направлении ее использования в качестве составной части комплексной геофизической методики для прогноза динамики состояния среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хачай О.А., Бодин В.В., Хинкина Т.А.** Теоретические принципы частотно-геометрических трехмерных исследований горно-геологической среды // Горная геофизика. СПб., 1998, с. 583—590.
2. **Хачай О.А., Дружинин В.С., Каретин Ю.С. и др.** Использование комплексной попланшетной сейсмической и электромагнитной методик для решения задач картирования приповерхностных неоднородностей // Геофизика XXI столетия; 2001 г. (Труды III геофизических чтений им. В.В. Федьинского). М., РАЕН, с. 327—337.
3. **Хачай О.А., Дружинин В.С., Хинкина Т.А.** Развитие способов картирования 3-D неоднородностей земной коры на основе методики сейсмических частотно-геометрических исследований // Материалы международного совещания „50 лет ГСЗ“. М., ОИФЗ РАН, 1999, с. 124.
4. **Караев Н.А.** Сейсмическая гетерогенность земной коры и проблемы интерпретации региональных наблюдений в „ближней зоне“ // Неклассическая геофизика. Саратов, 2000, с. 30—32.
5. **Влох Н.П., Хачай О.А., Бодин В.В.** Система комплексного мониторинга напряженного состояния локальных зон массива горных пород // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли (Материалы международной конференции). Новосибирск, 1999, с. 252—255.
6. **Хачай О.А., Хачай О.Ю.** Использование причинного и вейвлет-анализа геофизических полей и процессов для прогноза катастрофических явлений (горных ударов) // Там же, с. 59—64.
7. **Астафьева Н.М.** Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН, 1996, т. 166, № 11, с. 1145—1170.
8. **Добеши И.** Десять лекций по вейвлетам. Ижевск, НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001, 464 с.
9. **Шалагинов В.В.** Государственная геологическая карта РФ (новая серия), М 1 : 1 000 000, листы 040(41). Екатеринбург, 1989.

*Рекомендована к печати 2 февраля 2005 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 1 июня 2004 г.,
после доработки — 17 января 2005 г.*