

КОМБИНИРОВАННАЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ В ПРОБЛЕМЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Владимир Игоревич Доброродный

Тюменское высшее военно-инженерное командное училище им. маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, 625001, Россия, г. Тюмень, ул. Льва Толстого, 1, ст. преподаватель, тел. (919)950-88-45, e-mail: vovan2172@mail.ru

Галина Федоровна Седухина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sscs.ru

Марат Саматович Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscs.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Работа связана с учетом закономерностей образования пары сейсмических и акустических волн, порождаемых многими сейсмическими процессами. Обосновывается необходимость их одновременного учета при решении задач активного и пассивного геофизического мониторинга окружающей природной среды. В качестве одной из них рассматривается задача геолокации тестовых полигонных взрывов с повышенной точностью. Приводится разработанная авторами информационная технология решения задачи.

Ключевые слова: сейсмоакустические волны, землетрясения, сейсмические вибраторы, полигонные взрывы, геоэкологический мониторинг, информационная технология, натурные эксперименты.

COMBINED SEISMOACOUSTIC LOCATION IN THE PROBLEM OF THE GEO-ECOLOGICAL MONITORING OF THE NATURAL MEDIUM

Vladimir I. Dobrorodny

Tyumen' High Military-Engineering Command College, 1, Lev Tolstoy St., Tyumen, 625001, Russia, Senior Lecturer, phone: (919)950-88-45, e-mail: vovan2172@mail.ru

Galina F. Sedukhina

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sscs.ru

Marat S. Khairtdinov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscs.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia

Work is connected with the account of laws of formation of pair the seismic and acoustic waves generated by many seismic processes. Necessity of their simultaneous account is proved at the deci-

sion of problems of active and passive geophysical monitoring of a surrounding environment. As one of them the problem of a geolocation test field explosions with the raised accuracy is considered. The information technology of the decision of a problem developed by authors is resulted.

Key words: seismoacoustic waves, earthquake, seismic vibrator, explosions, geoeological monitoring, information technology, natural experiments.

Введение

Многие природные и техногенные процессы сейсмической природы сопровождаются образованием сопряженных процессов в атмосфере. В первую очередь, это касается образования акустических полей. В качестве примера на рис. 1 процесс акустического возмущения атмосферы иллюстрируется по отношению к трем разным источникам- техногенному землетрясению (эпицентр- угольный разрез «Бачатский», дата 19.06.2013, магнитуда 5.3), сейсмовибратору ЦВ-40 [1-3], полигонному взрыву малой мощности. Приведенные записи отражают процесс образования акустических волн, сопровождающих сейсмические процессы. При этом уровни акустических волн в отдельных случаях сопоставимы, а иногда выше уровней сейсмических. Это определяет целесообразность учета параметров акустических волн наряду с сейсмическими в задачах геофизического мониторинга окружающей среды, а также в решении некоторых прикладных задач сейсмики. Пример такого подхода рассматривается в настоящей работе по отношению к полигонным взрывам.

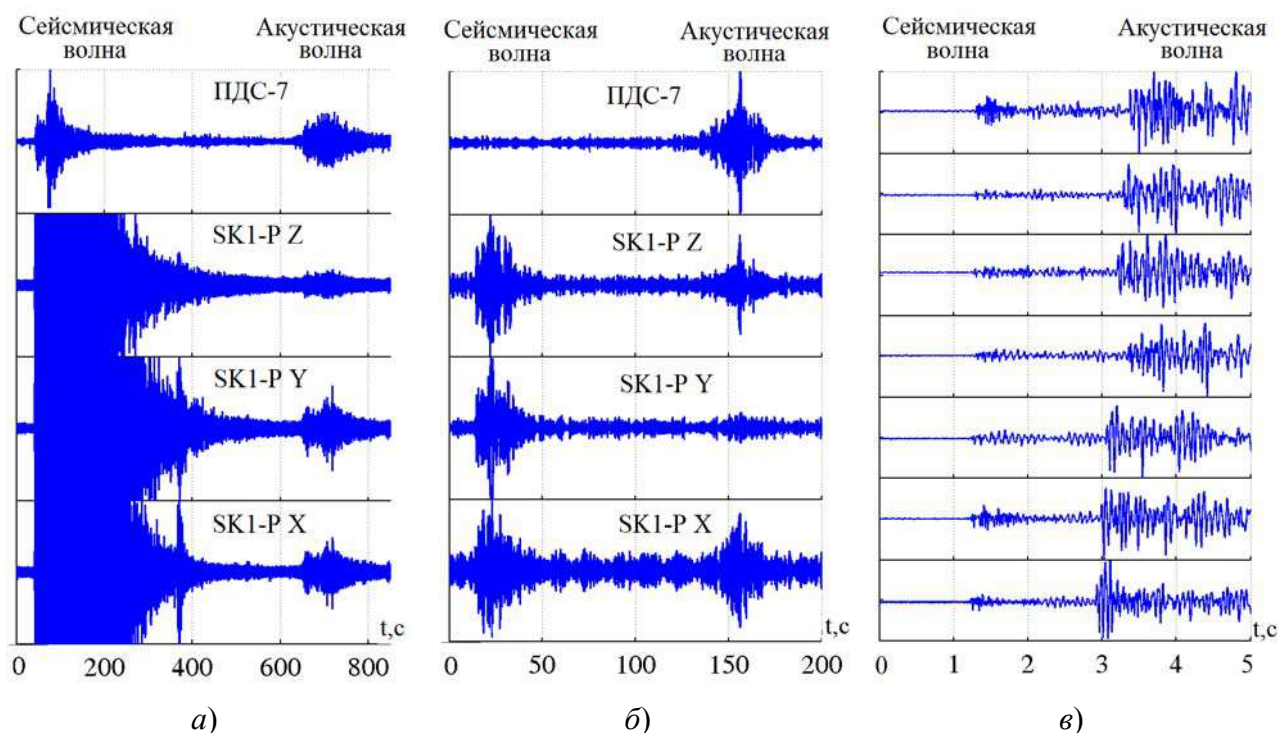


Рис. 1. Записи сейсмических и акустических волн от разного класса источников:

а) запись землетрясения на удалении 205 км (эпицентр – п.Старо-Бачаты, 19.06.2013); б) запись вибратора на удалении 50 км; в) запись полигонного взрыва на небольшом расстоянии

Постановка задачи

Одна из основных целей настоящей работы состоит в оценивании точности определения координат тестовых полигонных взрывов на основе совместного использования параметров сейсмических и акустических волн, а также созданных программно-технических средств и методики проведения натурных экспериментов. Последние включают в себя набор программ помехоустойчивого выделения и оценивания времен вступления сейсмических и акустических волн с последующим вычислением координат источников, используемых в натурных экспериментах. Полученные результаты сопоставляются с заданными координатами, полученными на основе высокоточных данных GPS. Получаемые невязки позволяют определять точности используемой методики проведения работ.

Методика проведения работ

Экспериментальная часть проведения работ базируется на серии взрывов мощностью от 200 до 2600г в тротиловом эквиваленте, находящихся на расстояниях от 570 до 750 м. от места регистрации (рис. 2). Для одновременной регистрации сейсмических и акустических сигналов от взрывов применяется полевая аппаратура «РОСА» [4] в комплекте с сейсмическими датчиками типа СВ-5 (сейсмоприемник вертикальный) с коэффициентом преобразования – 15 в/м/с. Применяется расстановка сейсмодатчиков в виде «Креста» (рис. 3) с линейными размерами 207 м × 207 м с шагом между датчиками 30 м. В каждой точке расстановки использовалось группирование 4-х датчиков.

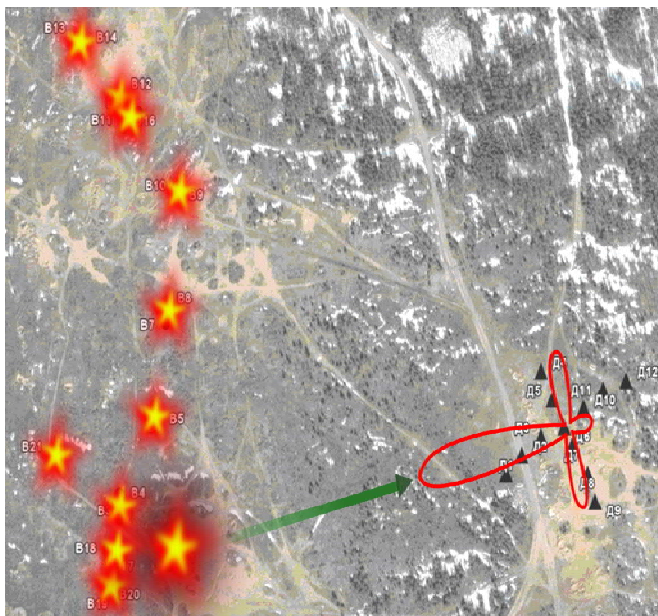


Рис. 2. Схема расстановки пунктов взрывов и регистрирующих датчиков в виде «креста»

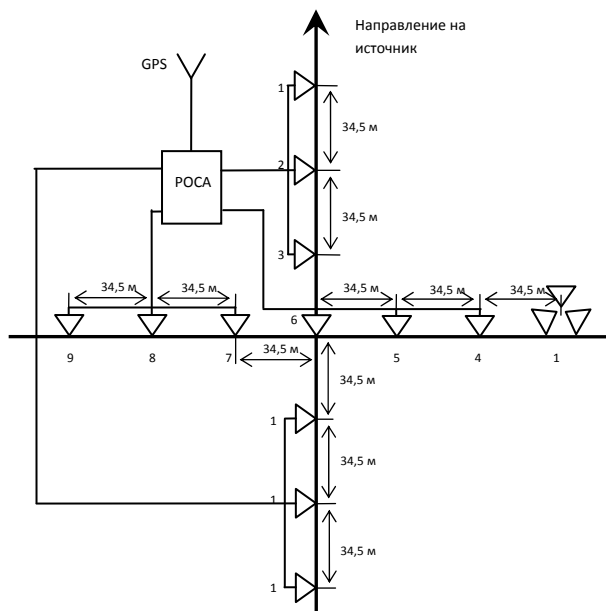


Рис. 3. Схема регистрирующей аппаратуры с набором датчиков СВ-5, расположенных в виде креста

Расстановка «Крест» ориентирована на измерения времен вступлений разного типа волн на всех датчиках одновременно с последующим определением координат каждого источника – взрыва – путем вычисления азимутального направления и расстояния до источника. Синхронизация сейсмических записей по отношению к Мировому времени осуществляется по сигналам GPS перед началом каждого сеанса записи. После пуска на запись регистрация сигналов осуществляется непрерывно на протяжении всего интервала проведения взрывов.

Программно-алгоритмические средства системы регистрации

Повышение точности измерений времен вступлений волн достигается путем использования алгоритма и программы вейвлет-фильтрации. Наиболее эффективна она по отношению к солитоноподобным функциям, описывающим компактные по времени волновые импульсы от взрывов. Как известно, вейвлет-фильтрация основана на разложении одномерного сигнала по базису, скомпонованному из компактных вейвлетов, обладающих свойствами масштабных изменений и переносов. В основе вейвлет-фильтрации лежит интегральное преобразование:

$$X(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{\tau, s}(t) dt, \quad \text{где } f(t) - \text{волновой импульс} \quad (1)$$

$$\Psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right), \quad \tau, s \in R; \quad \psi \in L^2(R).$$

Базис функционального пространства $L^2(R)$ может быть построен с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов вейвлета $\psi(t)$ с произвольными значениями базисных параметров – масштабного коэффициента s и параметра сдвига τ . Наиболее подходящими для аппроксимации сейсмических и акустических волн являются вейвлеты Добеши [5,6]. Для вычисления времен вступления волн в автоматическом режиме предварительно рассчитывается огибающая $A(t)$ волнового импульса $f(t)$ через преобразование Гильберта:

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + f^{*2}(t)},$$

где $f^*(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x)}{t - x} dx$ – преобразование Гильберта.

В процессе обработки [7] в одноканальном режиме исходная зашумленная запись подвергается вейвлет-фильтрации (рис. 4а), далее рассчитывается ам-

плитудная огибающая через преобразование Гильберта (рис. 4б), затем применяется алгоритм STA/LTA [8] со значением порога 1.1 (рис. 4в). Алгоритм означает, что в процессе обработки вычисляется усреднённое значение огибающей вдоль двух окон: короткого (STA) и длинного (LTA). STA представляет собой оценку значения «мгновенной» амплитуды полезного сигнала (например, Р-волны взрыва), LTA оценивает среднее значение шума на длительном участке. Далее производится вычисление соотношения STA/LTA для каждого нового отсчёта сигнала, поступающего на вход алгоритма:

$$STA_i = \frac{1}{NS} \sum_{j=i-NS}^i |X_j|, \quad LTA_i = \frac{1}{NL} \sum_{j=i-NL}^i |X_j|,$$

$$r_i = STA_i / LTA_i, \quad (2)$$

где NS и NL – число отсчетов в коротком и длинном временных окнах соответственно ($NS \ll NL$). Тогда r_i – отношение STA/LTA , представляющее собой оценку отношения сигнал-шум. Момент времени вступления сигнала T определяется:

$$r(T) \geq C > 1, \quad (3)$$

где C – порог срабатывания обнаружителя. Временная сложность детектора STA/LTA равна $O(N)$, где N – число отсчетов анализируемой записи.

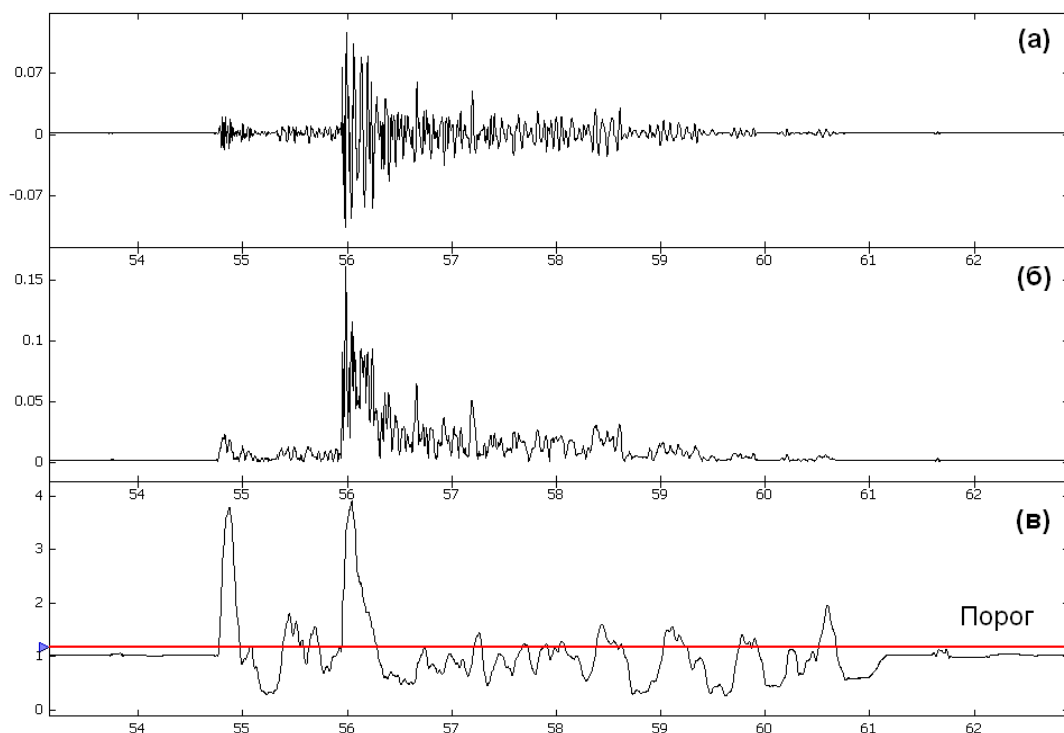


Рис. 4. Отфильтрованная запись полигонного взрыва (а), амплитудная огибающая (б) и результат обработки STA/LTA с параметрами 0.1 с/0.5 с; значение порога обнаружения составляет 1.1

Вычисление координат источника

Для вычисления координат источника необходимо знать две составляющие: расстояние от пункта регистрации и азимут. Расстояние «источник-приёмник» рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{V_S V_A}{V_S - V_A} \Delta T, \quad (4)$$

где V_S , V_A – скорости сейсмических и акустических волн соответственно, ΔT – разность времён прихода сейсмических и акустических волн.

Для анализа скоростных характеристик волн по данным профильной регистрации сейсмических сигналов (рис. 3) построены годографы обоих типов волн. Примеры построения годографов для разных взрывов приведены на рис. 5а – для сейсмических волн, 5б – для акустических волн. Приведенным годографам соответствуют кажущиеся скорости волн V^* .

Располагая значением азимутального направления профильной расстановки датчиков на «Кресте», а также азимутального направления приемника на взрыв вычисляется угол невязки α между обоими направлениями. Истинные скорости распространения волн вычисляются в виде: $V = V^* \cos \alpha$.

Таким образом были оценены скорости обоих типов сейсмической и акустической волн V_S , V_A . Значения их вычисляются по отношению к каждому взрыву.

Азимут на источник (относительно азимута ориентации в пространстве линейного профиля датчиков) определяется по направлению максимума диаграммы направленности регистрирующей линейки сейсмоприемников, выступающей в качестве приемной антенны. Диаграмма направленности вычисляется путём расчёта коэффициента направленного действия (КНД) сейсмической антенны.

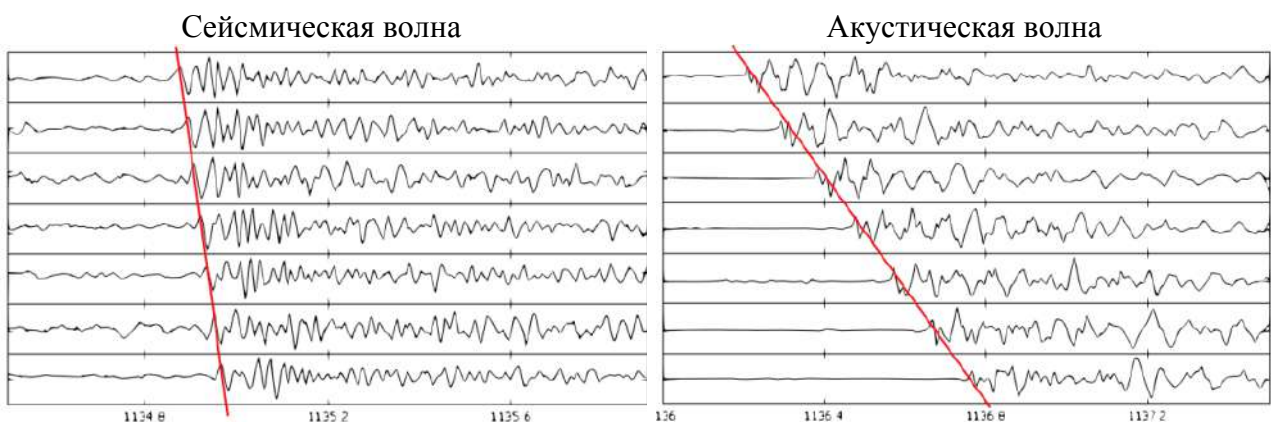


Рис. 5а. Записи сейсмических волн

Рис. 5б. Записи акустических волн

Вычисление коэффициента производится по формуле:

$$K.H.D. = E_{\text{сум}} / E_{\text{max}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{сум}} = \sum_n (f_1(t_n) + f_2(t_n + \Delta t) + \dots + f_k(t_n + \Delta t \cdot (k-1)))^2$, $E_{\text{max}} = 1/k^2 \cdot \sum_n f_n^2$

На рис. 6 изображен пример диаграммы направленности для волны взрыва в полярной системе координат.

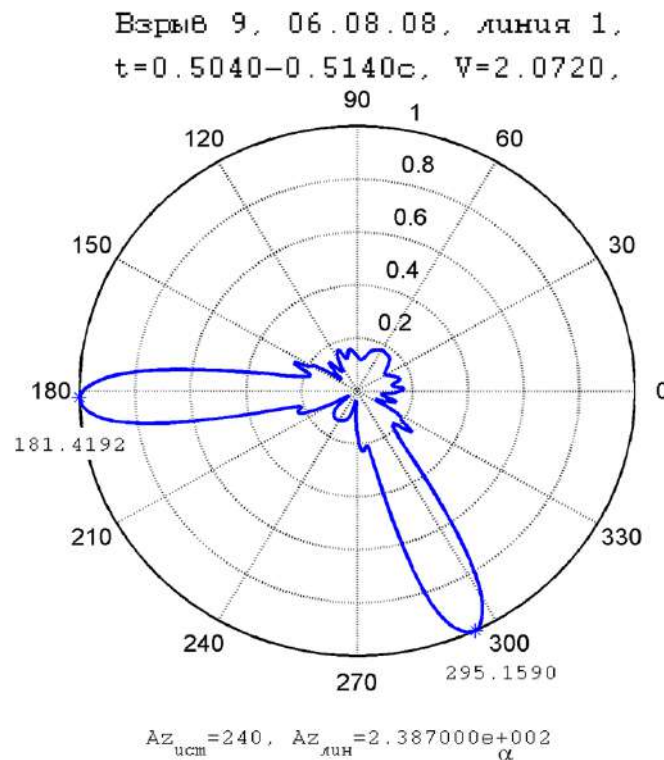


Рис. 6. Пример диаграммы направленности сейсмической волны. Максимум функции направленности соответствует азимуту 295.16° и 181.42°

Результаты натурных экспериментов

В данной работе в качестве прикладных задач применения разработанных алгоритмов и программ рассмотрены задачи обнаружения и локализации событий от тестовых (полигонных) взрывов, удалённых на расстояния 600-800 м.

Используя созданные алгоритмы программы обнаружения и вычислений координат источников сейсмоакустических сигналов был обработан набор записей, содержащих 19 полевых взрывов мощностью от 200 до 2600г в тротиловом эквиваленте, находящихся на расстоянии от 570 до 750 м. Помимо обработки в автоматическом режиме производилась ручная обработка оператором в режиме визуального просмотра сейсмограмм. В таблице представлены ре-

результаты автоматического и ручного вычислений расстояний «источник-приёмник» R , азимутальных направлений на источник и погрешности определения расстояния R при ручной и автоматической обработках с учётом угла азимута. Погрешность вычисляется как расстояние между координатами вычисленного эпицентра и полученного на основе высокоточных данных GPS. Как следует из анализа данных таблицы, по отношению к большинству рассматриваемых событий автоматический метод локации превосходит по точности ручной способ и лежит в пределах 0.025% до 6%, что в среднем составляет около 3%. При этом измеренные средние значения невязки для сейсмических и акустических волн составляют соответственно 0,03 и 0,02 с. Такое расхождение связано со значительным превышением уровней акустических волн над сейсмическими, что является важным фактором в условиях повышенных шумов.

№ события	Расстояние R, м			Азимут, град.		Погрешность, м	
	Автомат.	Ручн.	Истинное	Автомат.	Истинное	Автомат.	Ручн.
1	508,94	499,48	512,37	256,92	253,49	30,76	32,91
2	613,77	569,65	576,28	264,35	260,16	57,42	42,41
3	573,19	559,34	570,52	262,79	261,60	12,17	16,21
4	574,89	563,39	570,70	262,79	263,09	5,15	7,89
5	507,25	509,71	519,66	269,00	269,30	12,70	10,31
6	511,48	509,20	521,51	270,18	270,48	10,39	12,60
7	519,93	520,02	533,53	282,59	281,20	18,66	18,60
8	515,71	526,79	538,05	283,57	283,25	22,54	11,65
9	579,11	575,23	586,68	295,16	295,16	7,57	11,45
10	574,89	581,15	593,02	296,80	296,27	18,92	13,05
11	710,15	709,82	710,77	300,77	300,02	9,32	9,35
12	731,29	731,04	729,54	300,77	300,93	2,69	2,53
13	693,24	684,20	690,42	299,98	300,26	4,41	7,07
14	693,24	690,71	694,36	298,40	298,08	4,03	5,32
15	574,89	574,00	576,54	256,60	256,63	1,68	2,56
16	596,02	591,12	596,18	257,25	257,25	0,16	5,06

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-07-00872-а, 16-07-01052-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" Издательства СО РАН, 2004.
2. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами. // Геология и геофизика. – 1999. – Т.40, №3. – С.431-441.

3. Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмовибраторов. // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т.37, №3. – С.303-312
4. P.R.Andreev, A.P.Grigoruk, M.N.Shorokhov. Systems for reception and recording of vibroseismic signals. // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. in Geoph., v. 7 (2002), p.1–11.
5. Авроров С.А., Хайретдинов М.С. Автоматизированная процедура поточного обнаружения и идентификации сейсмических событий // Периодич. Науч.-техн. журн. Национального ядерного центра республики Казахстан. –2008. – Вып. 2. – С. 70-75
6. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. - М.: РХД, 2001.
7. С.А. Авроров, Хайретдинов М.С.Распределенная обработка данных в мониторинговых системах и сетях // Научный вестник НГТУ. – 2010. – №1. – С.1-11.
8. Stewart, S. (1977). Real-time detection and location of local seismic events in central California, Bull Seism. Soc. Am. 67, 433-452.

© В. И. Доброродный, Г. Ф. Седухина, М. С. Хайретдинов, 2018