

УДК 534.2 : 519.254

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НАБЛЮДЕНИЯ*

А. В. Аверьянов, Г. М. Глебова

*Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194
E-mail: glbgalina@yandex.ru*

Для пассивной сейсмической системы наблюдения предложен и экспериментально проверен алгоритм обработки сигналов, позволяющий эффективно обнаруживать и определять траекторию движущегося объекта. При испытаниях использовалась сосредоточенная приёмная система, состоящая из двух геофонов, разнесённых на расстояние, много меньшее длины волны принимаемого сигнала. Результаты обработки эксперимента показали возможность определения не только местоположения сейсмоактивного объекта, но и параметров его движения.

Ключевые слова: сейсмические системы наблюдения, геофон, характеристика направленности, пространственный спектр.

Введение. Одним из способов контроля перемещений различных объектов по поверхности Земли является регистрация сейсмических колебаний, возбуждаемых объектами при движении [1]. Перечень задач, решаемых сейсмическими системами наблюдения, включает в себя обнаружение сейсмоактивного объекта, определение траектории движения объекта и его классификацию: человек, группа людей, автомобиль и др.

Обычно для определения координат сейсмоактивного объекта используется не менее трёх геофонов, разнесённых на расстояния в несколько метров и образующих навигационный треугольник. Несмотря на то что направленность геофонов является их неотъемлемой частью [2], при проектировании алгоритмов обработки это их свойство не принимается в расчёт [3–6]. Однако хорошо известно, что учёт дополнительной информации о направленности приёмников позволяет улучшить рабочие характеристики систем обнаружения [7, 8]. Так, с помощью всего лишь одиночного сейсмоприёмника, состоящего из трёх ортогональных геофонов с единым фазовым центром, можно определить направление на источник сигналов [9].

Рассматривается метод обработки сигналов, который учитывает направленные свойства ортогональных приёмных компонент геофонов. Экспериментально показана возможность установления местоположения объекта при использовании двух геофонов, разнесённых на расстояние, много меньшее длины волны принимаемого сигнала.

Постановка задачи. Размещаемые в грунте датчики обеспечивают регистрацию сигналов, которые после усиления и преобразования в цифровую форму подвергаются обработке на компьютере или цифровом сигнальном процессоре. Применяемая в эксперименте сосредоточенная приёмная система представляет собой два геофона, каждый из которых содержит два взаимно-ортогональных в горизонтальной плоскости датчика (2D-геофон) с дипольной характеристикой направленности. Входные сигналы во временной и спектральной областях обозначим $U_l(t)$ и $U_l(\omega)$ ($l = 1, \dots, 4$) соответственно, т. е. для

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-01-31320).

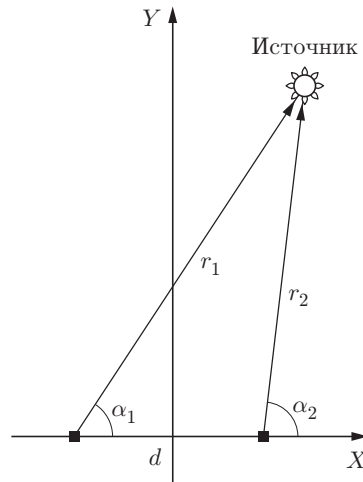


Рис. 1. Схема проведения испытаний в горизонтальной плоскости XY в системе координат, связанной с приёмной системой (r_i, α_i — расстояние и азимут источника)

данной системы общее число приёмных каналов равно 4. Звуковое поле, создаваемое в точке наблюдения локальным источником с единичной амплитудой, можно записать в виде $W = \exp(-jkr)/\sqrt{r}$, где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, r — расстояние между источником и приёмником. Тогда сигнал, приходящий на приёмные каналы системы, состоящей из двух $2D$ -геофонов (рис. 1), с учётом характеристик направленности приёмных элементов можно представить в виде

$$W(r, \alpha) = \begin{bmatrix} \exp(-jkr_1) \cdot \cos \alpha_1 / \sqrt{r_1} \\ \exp(-jkr_2) \cdot \cos \alpha_2 / \sqrt{r_2} \\ \exp(-jkr_1) \cdot \sin \alpha_1 / \sqrt{r_1} \\ \exp(-jkr_2) \cdot \sin \alpha_2 / \sqrt{r_2} \end{bmatrix}.$$

Для определения местоположения сейсмоактивного объекта воспользуемся подходом, который в настоящее время распространён в гидроакустике для векторно-скалярных приёмных систем [8]. Алгоритмы, формирующие пространственный спектр с различной разрешающей способностью [10, 11], предусматривают вычисление матрицы ковариаций принимаемых сигналов $U(\omega)$, значения элементов которой запишем как

$$K_{ml}(\omega) = U_l(\omega)U_m(\omega)^* \quad (m, l = 1, \dots, 4), \quad (1)$$

где символ «*» — эрмитово сопряжение. Ковариационная матрица K представляет собой сумму сигнальной матрицы $K(s)$ и матрицы аддитивных помех $K(n)$: $K = K(s) + K(n)$.

В данной работе для решения обратной задачи пассивной локации сейсмоактивного объекта применяется метод Кейпона [10], который, если обратиться к истории, был первоначально создан для обнаружения сейсмических сигналов [12]. В спектральной области алгоритм обработки имеет вид (зависимость от частоты для простоты записи опущена)

$$\Phi(\theta) = \sum_{\Delta\omega} (W^*(\theta)K^{-1}W(\theta))^{-1}, \quad (2)$$

где $W(\theta)$ — сканирующий вектор, зависящий от вектора неизвестных координат и согласованный по структуре как с моделью распространения сигнала в данной среде, так и с типом приёмных элементов. Вектор θ , определяющий положение точки на плоскости, может задаваться в полярной ($\theta = (r, \alpha)$) или декартовой ($\theta = (x, y)$) системе координат. Как правило, осреднение выполняется в частотной полосе $\Delta\omega$, характерной для сейсмоактивного объекта. Отметим, что метод Кейпона обладает целым рядом неоспоримых достоинств. Так, алгоритм обработки создан по критерию, который обеспечивает максимальное отношение сигнал/помеха на выходе приёмной системы. При выводе алгоритма не накладывается никаких ограничений на закон распределения сигналов и шумов, поступающих на вход приёмной системы, также не требуется априорной информации о матрице аддитивных помех [13].

Формирование пространственного спектра (2) является первым этапом обработки, после выполнения которого возможны анализ временного и пространственного положения локальных максимумов и определение параметров движения объекта.

Эксперимент и его результаты. Экспериментальные работы выполнялись с использованием приёмной системы, состоящей из двух комбинированных сейсмоприёмников, разнесённых на расстояние $d = 1$ м (см. рис. 1). Источником сигналов являлся движущийся человек. Расстояние между источником и приёмником составляло ~ 10 м. Объект двигался вдоль оси Y , удаляясь от приёмной системы. Скорость сейсмической волны равна 170 м/с.

Принятые сигналы усиливались, оцифровывались и подавались в компьютер. На рис. 2 представлен сигнал с одного из каналов приёмной системы. Три импульса, превышающие шумовой фон, характерны для сигналов, наблюдаемых при движении человека. Это соответствует типичным сейсмограммам пешехода, полученным на различных полигонах [14], из которых также следует, что отношение сигнал/помеха на входе приёмного канала больше единицы, $(s/n)_{\text{in}} > 1$. Расчёт пространственных спектров $\Phi(x, y)$ проводился в декартовой системе координат, т. е. в плоскости XU , и выполнялся методом Кейпона (2). Длительность обрабатываемой выборки 0,15 с, осреднение пространственных спектров происходит в полосе 10–40 Гц. Необходимо отметить, что в предложенном методе обнаружения и определения местоположения объекта нет предварительного анализа временных сигналов для нахождения момента прихода импульсов, их периодичности и пр. Наоборот, параметры движения объекта (временные и пространственные) находятся после выполнения основного этапа обработки — формирования пространственных спектров — с последующим их анализом за период наблюдения.

Анализ представленных данных показывает, что максимальное значение пространственного спектра $\Phi_{\text{max}}(x, y)$ сильно зависит от степени «захвата» в обработку сигнала,

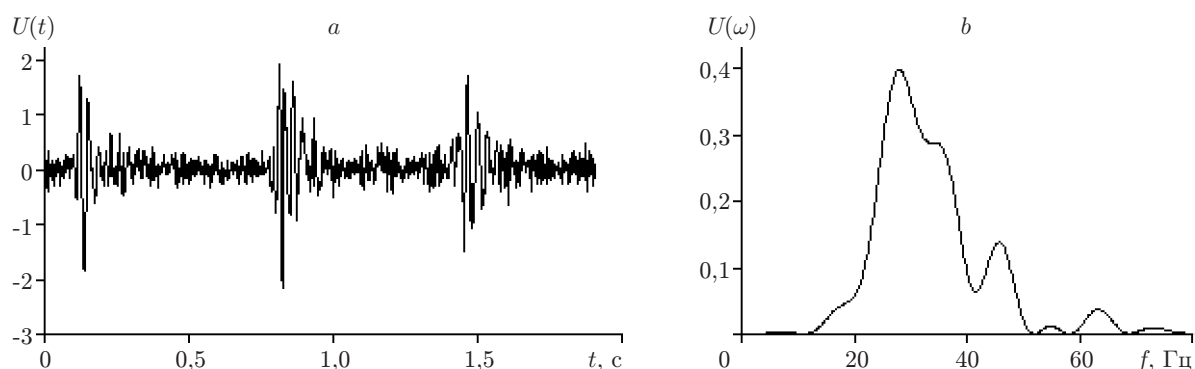


Рис. 2. Сигнал на входе приёмника: осциллограмма (а) и спектр (б)

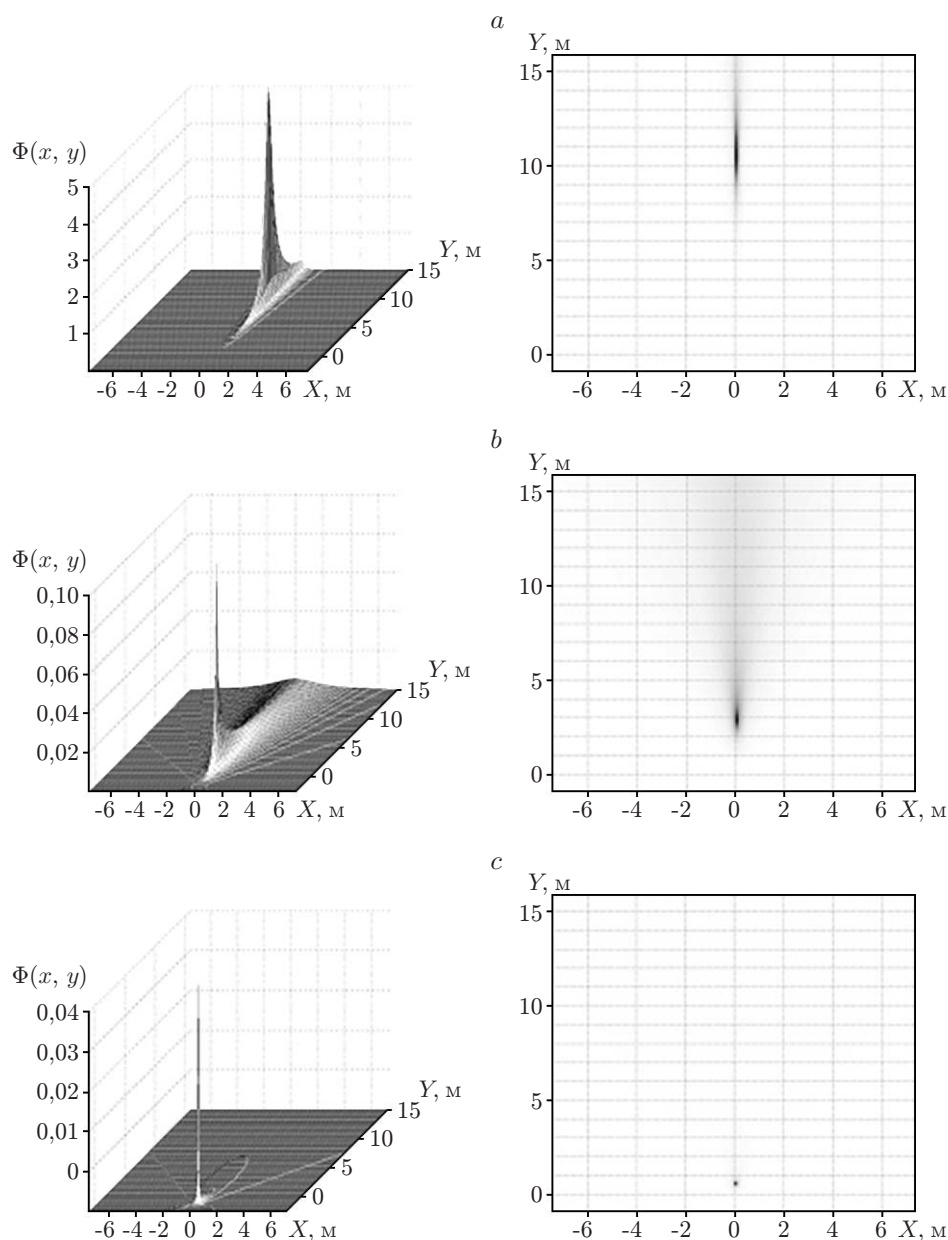


Рис. 3. Зависимости пространственного спектра от координат в различные моменты времени: при $0,8 < t < 0,95$ с (a), $0,9 < t < 1,05$ с (b), $1,0 < t < 1,15$ с (c)

обусловленного поступью человека. Так, когда захватывается бóльшая часть импульса (рис. 3, a), $\Phi_{\max}(x, y) = 5$. Если в обработку попала только часть импульса (рис. 3, b), то $\Phi_{\max}(x, y) = 0,1$. Когда обрабатывается сигнал, соответствующий шумовому фону (рис. 3, c), $\Phi_{\max}(x, y) = 0,03$.

На рис. 4 положение объекта во временной и пространственной областях соответствует точкам 1–3. На рис. 4, a представлена зависимость максимальных значений выходного сигнала $\Phi_{\max}(x, y)$ от времени (пунктирная кривая). Видно, что положения локальных максимумов $\Phi_{\max}(x, y)$ хорошо согласуются со временем прихода импульсных сигналов, вызванных пешеходом (сплошная кривая). Оценка местоположения движущегося человека (рис. 4, b) близка к истинному положению объекта в соответствующие моменты времени (см. рис. 4, a).

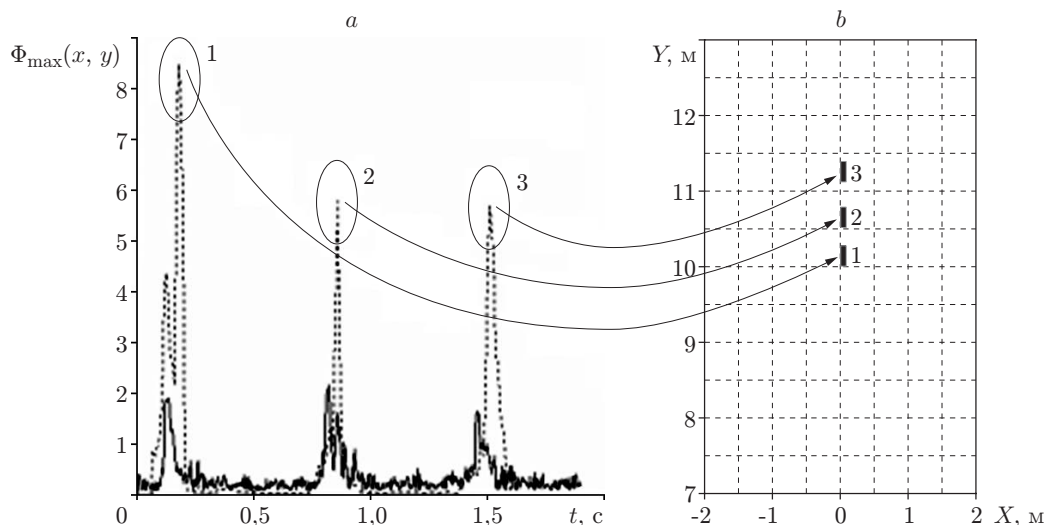


Рис. 4. Максимальные значения пространственного спектра $\Phi_{\max}(x, y)$: во временной области (а) и пространственной области на плоскости XY (b) (для временных интервалов $0,1 < t < 0,25$ с (1), $0,8 < t < 0,95$ с (2), $1,4 < t < 1,55$ с (3))

Положение локальных максимумов $\Phi_{\max}(x, y)$ на временной оси и в пространстве позволяет определить траекторию передвижения объекта (точки 1–3 на рис. 4, b), скорость его движения, ширину и периодичность шага (1 м/с, 0,6–0,7 м и 0,6–0,7 с соответственно). Найденные параметры характерны для движущегося человека и могут быть использованы на последующих этапах обработки для классификации обнаруженного объекта. Анализ пространственных спектров показал, что координаты источника определяются с высокой точностью.

Принципиальная возможность применения предложенного в данной работе подхода, а также его высокая эффективность подтверждаются расчётами потенциальной точности оценки координат источника [15], которые приведены на рис. 5. Представленные расчёты среднеквадратических ошибок оценки азимута и расстояния позволяют сравнить характеристики двух сосредоточенных приёмных систем. Поскольку оценку расстояния ненаправ-

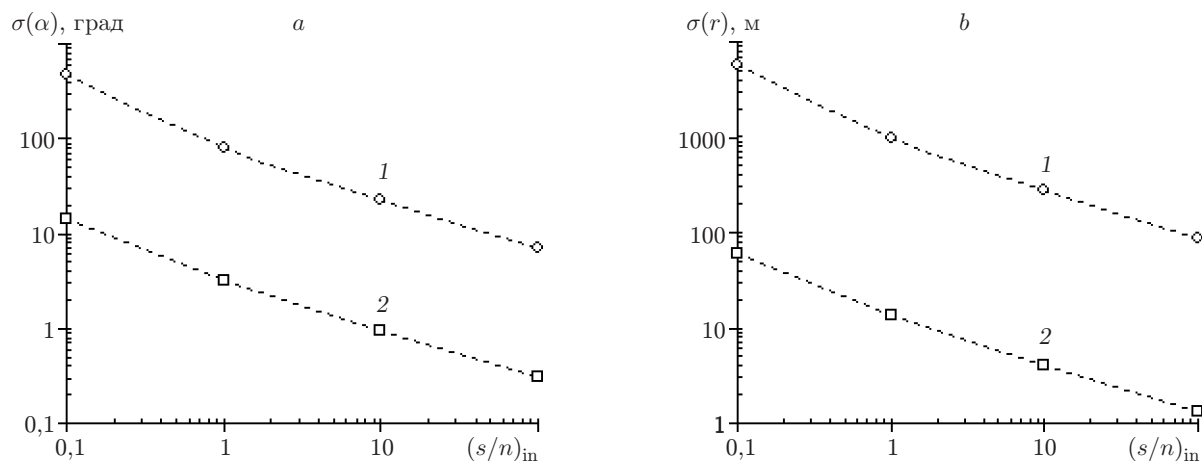


Рис. 5. Среднеквадратическая ошибка оценки: азимута (а) и расстояния (b) сейсмоактивного объекта в зависимости от отношения $(s/n)_{in}$

ленными приёмными элементами можно выполнить по измерениям сигнала не менее чем в трёх разнесённых точках, то рассматривается линейная приёмная антенна, состоящая из трёх элементов, разнесённых на 0,5 м, апертура антенны равна 1 м. Предполагается, что характеристика направленности каждого приёмного элемента представляет собой монополю, т. е. используется общепринятый подход (кривые 1). Вторая приёмная система соответствует экспериментальной, а при обработке сигналов учитывается пространственная направленность геофонов (кривые 2). Взаимное геометрическое расположение приёмных элементов и источника сигналов соответствует выполненному эксперименту (см. рис. 1) для случая, когда источник удалён на расстояние 10 м.

Для расчёта среднеквадратических ошибок оценок параметров $\sigma(\theta)$ применялся подход, основанный на расчёте информационной матрицы Фишера [15], который в работе [16] обобщён для векторно-скалярных приёмных систем:

$$\sigma_i^2(\theta) = I_{ii}^{-1}, \quad I_{ij} = \text{Tr} \left(K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \theta_i} K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \theta_j} \right).$$

Здесь I — информационная матрица Фишера, θ — вектор неизвестных параметров, для данной задачи это координаты источника в полярной системе координат: азимут α и расстояние r .

Для стандартного подхода, который не учитывает при обработке сигналов направленных свойств геофонов, получен вполне предсказуемый результат: расстояние до источника определить невозможно, а азимут находится с большой ошибкой даже при $(s/n)_{\text{in}} = 100$. При использовании характеристики направленности геофонов экспериментальные данные и теоретически рассчитанные ошибки оценок координат практически совпадают. Так, при $(s/n)_{\text{in}} = 30$, что соответствует экспериментальным данным, $\sigma(\alpha) = 0,7^\circ$, $\sigma(r) = 2$ м, а ширина пространственного спектра по уровню 0,5 по азимуту $\Delta\alpha \approx 0,8^\circ$ и по расстоянию $\Delta r \approx 1,6$ м.

Таким образом, показано, что предлагаемый подход даёт качественный скачок: точность оценок координат намного выше, появляется возможность определения расстояния сосредоточенной приёмной системой. Эффективность предложенного подхода при работе с сейсмической приёмной системой, имеющей размеры, много меньшие длины волны (расстояние между геофонами равно 1 м), получена за счёт использования направленных свойств геофонов и обработки сигналов методом с высоким пространственным разрешением. Малый размер приёмной антенны (1 м) существенно упрощает её установку, эксплуатацию и другие тактико-технические характеристики. Как следствие, возможно существенное расширение сферы применимости сейсмических систем наблюдения.

Заключение. Экспериментально проведённое тестирование предложенного метода обработки сигналов, который учитывает характеристики направленности геофонов, подтвердило возможность определения координат движущегося человека с использованием всего лишь двух 2D-геофонов, разнесённых на расстояние, много меньшее длины волны принимаемого сигнала. Надёжное обнаружение, определение координат, траектории и параметров движения объекта выполняется в радиусе до 30 м. Показано, что предлагаемый подход обеспечивает потенциально достижимые характеристики сосредоточенной приёмной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магауенов Р. Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учеб. пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 367 с.
2. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.

3. Райфельд М. А., Спектор А. А. Непараметрический метод обнаружения сигналов от сейсмически активных объектов // Автометрия. 2005. **41**, № 6. С. 88–97.
4. Спектор А. А., Филатова С. Г. Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 68–74.
5. Мархакшинов А. Л., Спектор А. А. Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 48–53.
6. Мархакшинов А. Л., Спектор А. А. Оценивание траектории движения человека на локальном участке в сейсмической системе охраны // Сб. науч. тр. НГТУ. 2010. **59**, № 1. С. 59–64.
7. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2006. 560 с.
8. Глебова Г. М., Аверьянов А. В., Кузнецов Г. Н. Экспериментальное исследование характеристик направленности векторно-скалярной антенны // Акустический журнал. 2011. **57**, № 5. С. 681–694.
9. Алексеев В. А., Демкин В. П. Пеленгование цели векторно-фазовым сейсмоприемником // Георазрез. 2012. **12**, № 4. 7 с. URL: <http://geogazrez.ru> (дата обращения: 2.04.2013).
10. Capon J. High resolution frequency wavenumber spectrum analysis // Proc. IEEE. 1969. **57**, N 8. P. 1408–1418.
11. Pisarenko V. F. The retrieval of harmonics from a covariance function // Geophys. Journ. Roy. Astron. Soc. 1973. **33**, N 3. P. 347–366.
12. Кейпон Дж. Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением // ТИИЭР. 1967. **57**, № 8. С. 69–79.
13. Гаммельсетер О. Б. Адаптивное формирование диаграмм применительно к узкополосным сигналам // Подводная акустика и обработка сигналов / Под ред. Л. Бьерне: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. С. 271–288.
14. Алямкин С. А., Еременко С. И. Алгоритм распознавания пешехода на основе анализа автокорреляционной функции сейсмического сигнала // Автометрия. 2011. **47**, № 2. С. 26–32.
15. Bangs W. J., Shultheiss P. M. Space-time processing for optimal parameter estimation // Signal Processing /Eds. W. R. Griffiths, P. L. Stocklin, C. van Schooneveld. N. Y.: Academic Press, 1973. P. 577–590.
16. Glebova G. M., Kuznetsov G. N. Estimating parameters of signal sources and characteristics of noise field by using spatially separated vector-scalar modules // The Formation of Acoustical Fields in Oceanic Waveguides, Reconstruction of Inhomogeneities in Shallow Water. N. Novgorod: Inst. Appl. Phys., 1998. Vol. 1. P. 109.

Поступила в редакцию 2 апреля 2013 г.
