

Обнаружение и пеленгование транспортных объектов в сейсмоакустических системах наблюдения *

В. И. Доброродный¹, О. А. Копылова^{2,3}, М. С. Хайретдинов^{2,3}

¹ Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова (ТВВИКУ)

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (ИВМиМГ СО РАН)

³ Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)

Аннотация: Рассматривается задача пассивного геофизического мониторинга транспортных объектов с использованием акустических и трёхкомпонентных сейсмических колебаний. Решение основано на применении спектрально-временного анализа, метода спектрально-поляризационной обработки, выделении информативных частот колебаний и определении пеленга на объект. Азимутальная ориентация получаемого при поляризационной обработке положения большой оси эллипса рассеяния позволяет определить пеленг. Получены численные оценки точности решения задачи в условиях натурального эксперимента. Предлагаемый подход основан на учёте пространственно-частотных характеристик объекта и их сезонной вариации.

Ключевые слова: пассивный геофизический мониторинг, обнаружение, пеленгование, транспортный объект, поляризационный метод, полосовая фильтрация, гребенчатый фильтр, натуральный эксперимент.

Для цитирования: Доброродный В. И., Копылова О. А., Хайретдинов М. С. Обнаружение и пеленгование транспортных объектов в сейсмоакустических системах наблюдения // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 3–17. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-3-17>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Доброродный В. И., Копылова О. А.,
Хайретдинов М. С., 2023

Статья поступила в редакцию 25.04.2022;
переработанный вариант – 29.11.2022;
принята к публикации 21.12.2022.

1. Введение

Рассматривается проблема пассивной геолокации транспортных источников на основе порождаемых ими шумовых волновых полей в земле и акустических в атмосфере. В качестве источников рассматриваются различные виды автомобильного, железнодорожного, гусеничного транспорта. Основными вычисляемыми характеристиками здесь являются время обнаружения, азимутальное направление на источник (пеленг), расстояние до него и скорость движения.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00861, госзадания № 0251_22_0004.

Решение задачи геолокации в такой постановке является актуальным для разных приложений: в системах охранной сигнализации [1–4], для определения траектории движения источников [5, 6], в геоэкологии при оценивании экологических рисков транспортных шумов [7, 8].

Одними из основных принципов в рассматриваемой области являются понятия фазовых фронтов волн и подобия сигналов, передающих информацию о лоцируемом источнике в многоканальные пространственно-распределенные системы регистрации. Подобие сигналов при этом оценивается функцией когерентности сигналов на выходах датчиков. В частности, на этих принципах базируется подход к определению пеленга на активные источники по их преобладающим спектральным составляющим шумов [1].

Другой подход к решению рассматриваемой задачи связан с теорией корреляционно-экстремальных систем (КЭС) [9], в основе которых лежит вычисление функции взаимной корреляции случайных процессов и определение координат главного экстремума этой функции, характеризующих положение лоцируемого источника. В качестве исходных данных при этом могут быть использованы волновые поля разной физической природы.

В целом методы решения рассматриваемой задачи у разных авторов достаточно схожи. Отличия состоят в приложениях их к конкретному типу лоцируемого источника с его индивидуальными характеристиками, способах реализации алгоритмов в направлении автоматизации процесса принятия решения, в геометрии расстановки регистрирующих датчиков и характере функции когерентности между ними, расстоянии «источник – приемник». В настоящей работе рассматриваются подходы к решению задач геолокации с учетом особенностей типов исследуемых объектов и их характеристик.

С точки зрения геометрии расстановки рассмотрены следующие случаи:

Случай 1: точечная регистрация волнового поля трехкомпонентным векторно-фазовым сейсмодатчиком с взаимно-ортогональными компонентами X , Y , Z , где Z – вертикальная компонента, X , Y – горизонтальные компоненты. При таком подходе определяется пеленг на источник как азимутальное направление большой оси корреляционного эллипса в координатах X , Y , Z [10–12]. Использование его оказывается оправданным для решения ряда научных задач.

Случай 2: пространственно-распределенная линейка датчиков с заданным шагом между ними. В этом случае линейка выступает в качестве сейсмической антенны, для которой азимутальное положение максимумов ее диаграммы направленности также позволяет определить пеленг на источник.

2. Постановка задачи

Общая постановка задачи пассивной геолокации состоит в следующем. С помощью линейки пространственно-распределенных векторно-фазовых датчиков в земле регистрируется волновое поле, представляемое в виде векторной функции:

$$\bar{A}(x, y, z, t) = \left\{ \bar{A}_k [x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)] \right\}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – множество дискретных значений функций, $k = 1, 2, \dots, M$ – число датчиков в линейке $[x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)]$.

В качестве начального на ориентацию датчиков накладывается условие: компонента X ориентируется на север, Y – на восток, Z – вертикальная компонента.

Координатные функции как результат регистрации сейсмических колебаний в земле с учетом характеристик регистраторов описываются в виде:

$$x_k(t_i) = A_x(k) h_k L[s(t_i - \Delta t_k) + n_k(t_i)]. \quad (2)$$

Здесь A_x – амплитуда колебания по компоненте X на k -ом датчике, h_k – чувствительность датчика, L – оператор фильтрации сигнала, $s(t_i - \Delta t_k)$ – полезный сигнал, $n_k(t)$ – внешний шум с корреляционной функцией $r_k(\tau)$.

В общем случае функция излучения волнового поля от транспортных источников описывается суммой квазигармонических функций с переменными параметрами и широкополосной шумовой составляющей, отражающей взаимодействие источника со средой в процессе его движения. Преобладающей при этом в спектре колебаний является узкополосная гармоническая составляющая, соответствующая числу оборотов основного двигателя. Модель такого колебания описывается функцией

$$x_k(t_i) = A_x(k)h_kL[\cos(\omega_0(t_i - \Delta t_k) + \varphi_x(k)) + n_k(t_i)], \quad (3)$$

где ω_0 – преобладающая в спектре колебаний частота вращения двигателя, $\varphi_x(k)$ – фаза ее в k -ой точке регистрации для компоненты X .

Модели колебаний для компонент Y, Z будут иметь аналогичную форму со своими составляющими $(A_y(k), \varphi_y(k)), (A_z(k), \varphi_z(k))$. В общем случае

$$A_x(k) \neq A_y(k) \neq A_z(k), \varphi_x(k) \neq \varphi_y(k) \neq \varphi_z(k). \quad (4)$$

В качестве обоснования выбора такой модели на рис. 1 приводятся спектры сейсмических колебаний тяжелого автомобиля КамАЗ: рис. 1а соответствует спектру колебаний при работе на месте, рис. 1б – в движении. Как видно, рис. 1 наглядно подтверждает вышесказанное.

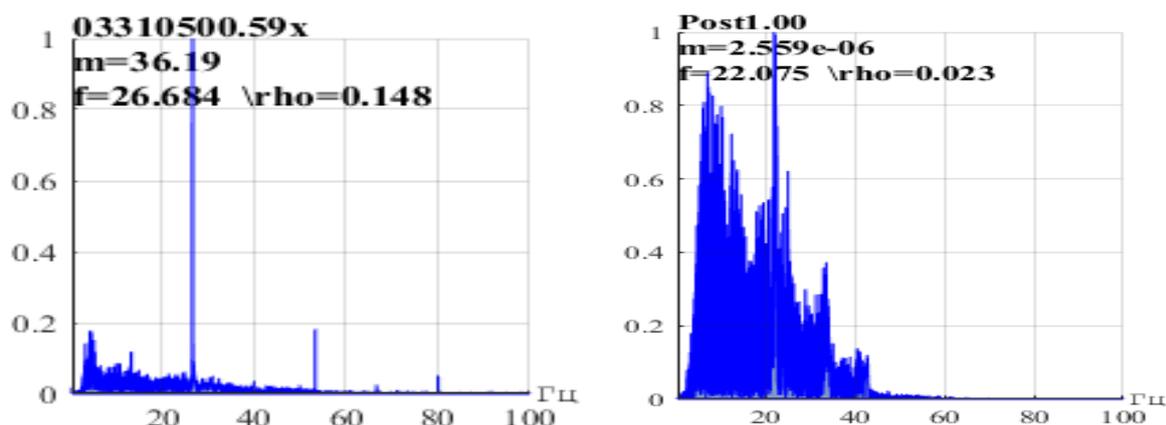


Рис. 1. Распределение спектра излучения автомобиля КамАЗ:
а) при работе на месте; б) в движении

Постановка задачи для случая 1. Трёхмерный вектор сейсмических колебаний (1) с учетом моделей колебаний по компонентам в виде (3) в результате экспериментальных измерений представляется в виде набора точек, пространственное положение каждой из которых характеризуется радиус-вектором $\vec{A}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$. С учетом преобладающей основной гармонической составляющей в спектрах регистрируемых колебаний трехмерная картина волнового поля будет описываться эллипсоидом с наложенными случайными значениями шумов. Такой эллипсоид будем называть эллипсоидом рассеяния. Положение трехмерного эллипсоида в пространстве характеризуется двумя углами – азимутальным α и тангенциальным θ . Направление его большой оси встречно фронту волны [10]. В однородной среде при вышеназванных условиях ориентации компонент (Z – вертикальная, X, Y – горизонтальные компоненты) это будет соответствовать азимуту на источник колебаний.

Поляризационный метод анализа традиционно используется по отношению к волновым формам продольных волн P -волн первых вступлений [12, 13]. Особенность данной работы состоит в том, что такой подход предлагается использовать по отношению к непрерывным вибрационным колебаниям транспортных источников.

Дисперсия случайных значений эллипсоида рассеяния будет характеризовать степень его компактности вдоль большой оси. Чем более выражена компактность, тем меньше погрешность определения азимута $\Delta\alpha/\alpha$. Количественно это определяется значением производной функции, описывающей эллипсоид рассеяния:

$$\Delta\alpha/\alpha \sim \left(1 / \frac{\partial [\bar{A}(x, y)]}{\partial x \partial y} \right). \quad (5)$$

Компактность характеризуется эллиптичностью e . С учетом параметров α , θ , e для случая 1 решается задача оптимизации эллиптичности (компактности) путем поиска азимутального направления большой оси $\bar{B}(\alpha, \theta)$, для которого выполняется условие:

$$\alpha^*, \theta^* = \arg \min_{\alpha \in \Omega_1, \theta \in \Omega_2} Q(\alpha, \theta), \quad Q(\alpha, \theta) = \sum_{i=1}^N |\bar{A}_i - \bar{B}(\alpha, \theta)|. \quad (6)$$

Значения диапазонов изменения азимутальных и тангенциальных углов лежат в пределах $\Omega_1 = 0 \div 360^\circ$, $\Omega_2 = 0 \div 45^\circ$ соответственно.

Условие (6) означает минимизацию суммы расстояний случайных векторов \bar{A}_i от большой оси эллипсоида путем поиска пары $[\alpha^*, \theta^*]$.

Постановка задачи для случая 2. По отношению к данному случаю расстановки сейсмодатчиков задача состоит в определении пеленга на источник путем поиска экстремума функции, заданной в виде:

- прямоугольной системе координат:

$$E^* = \max E = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M x_k(t_i + \Delta t_k); \quad (7)$$

- в полярной системе координат:

$$\alpha^* = \arg \max_{\Phi \in \Omega_1} E(\alpha). \quad (8)$$

3. Методы решения задачи

Случай 1.

В основе решения лежит поляризационный метод определения пеленга на источник. В прямоугольной системе координат траектории колебаний (1) описываются полным вектором колебаний A с проекциями на горизонтальные и вертикальную составляющие A_x , A_y , A_z по осям x , y , z . Данные измерений представляются в виде набора точек, пространственное положение каждой из которых характеризуется радиусом-вектором $\bar{A}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$. Ставится задача определения направления, задаваемого единичным вектором $\bar{p} \equiv (p_x, p_y, p_z)$ поляризации так, чтобы в соответствии с условием (6) сумма квадратов расстояний всех точек от прямой, проведённой в этом направлении, была минимальна. Для автоматизации процедуры нахождения параметров α , θ , e решение предлагается искать с применением матричного исчисления.

Собственные числа и собственные векторы матрицы ковариации исходных данных определяются из уравнения [14, 15]:

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Определяемым из (9) вектором поляризации является собственный вектор \vec{p}_1 ковариационной матрицы, соответствующий максимальному собственному числу. Два других собственных вектора, \vec{p}_2 и \vec{p}_3 , дают два ортогональных направления. Собственные числа $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ показывают значение отклонения поляризации от линейной.

Зная параметры осей мгновенного эллипсоида поляризации, можно найти тангенциальный и азимутальный углы, а также коэффициент эллиптичности. Последний характеризует «вытянутость» эллипсоида поляризации. Направление главной оси эллипсоида поляризации определяется по компонентам вектора \vec{p}_1 . Азимутальный угол находится из выражения:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{p_{1y}}{p_{1x}} \right), \quad (10)$$

где p_{1x}, p_{1y} – x и y компоненты p_1 соответственно. Тангенциальный угол вычисляется по формуле:

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{p_{1x}^2 + p_{1y}^2}}{p_{1z}} \right), \quad (11)$$

где p_{1x}, p_{1y}, p_{1z} – x, y и z компоненты p_1 соответственно. Коэффициент эллиптичности, определяемый отношением малой полуоси к большой, вычисляется по формуле:

$$e = \sqrt{\frac{3\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}}. \quad (12)$$

Для повышения точности определения параметров направленности на источник колебаний в (1) предварительно предусматривается цифровая фильтрация с использованием оператора L для подавления шумов и выделения полезных сигналов. В качестве оператора L используется передаточная функция полосового фильтра Баттерворта [16]:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{2n}}}, \quad (13)$$

где ω_0 – граничная частота, n – порядок фильтра.

Полоса пропускания фильтра согласована с областью частот, охватывающей наиболее выраженные частотные составляющие колебаний источника. В связи с этим предварительно был выполнен спектрально-временной анализ (СВА) записей колебаний разного типа движущихся источников с целью выделения спектральных мод, наиболее адекватных типу источника. В основе анализа лежит оконное преобразование БПФ:

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} x_l(t_n) e^{-i \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (14)$$

где $x_l(t_n)$ – анализируемый сигнал в рамках временного окна l , где $l = 1, \dots, L$ – количество временных окон, N – количество временных отсчетов в окне. Такой анализ позволяет изучать пространственно-временную динамику волновых полей движущихся источников с учетом их режимов движения. В качестве примера на рис. 2 приведен результат спектрально-временного анализа записи колебаний от тяжелого автомобиля КамАЗ. На рис. 2а представлен нормированный спектр в координатах «амплитуда – частота – время», на рис. 2б – проекция его на плоскость «частота – время». Как видно из рис. 2, преобладающая мода спектра лежит около 10 Гц, что определяет выбор параметров полосового фильтра Баттерворта.

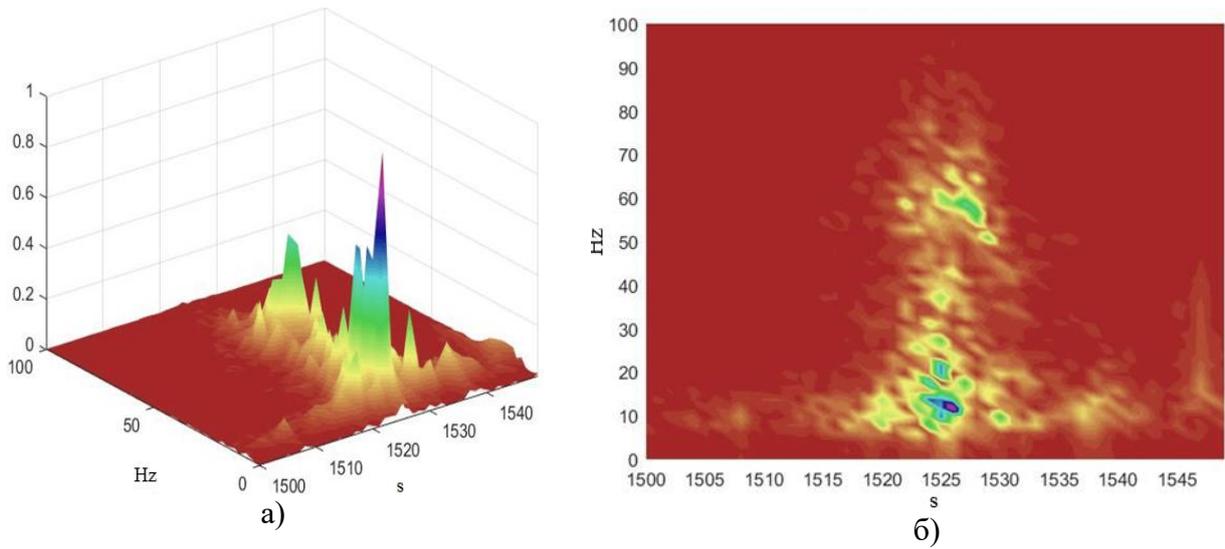


Рис. 2. Спектрально-временная функция колебаний тяжелого автомобиля КамАЗ

Случай 2.

Решение задачи (7) в нормированном представлении связано с вычислением коэффициента направленного действия сейсмической антенны с шагом расстановки $\Delta t_k = k \Delta t$ ($k = 0, \dots, M$) в виде

$$КНД = E_{сум} / E_{max} . \quad (15)$$

Здесь $E_{сум} = \sum_{i=1}^N (x_1(t_i) + x_2(t_i + \Delta t) + \dots + x_k(t_i + \Delta t \cdot (M - 1)))^2$, а E_{max} соответствует максимальному значению энергии колебаний на выходе антенны. В частном случае, когда уровни регистрируемых колебаний на всех датчиках одинаковы, значение E_{max} будет выражать суммарную энергию: $E_{max} = M \sum_{i=1}^N x_i^2$.

Для рассматриваемого случая на колебания $x_k(t_i)$ накладываются условия по аналогии со случаем 1: они подвергаются полосовой цифровой фильтрации фильтром Баттерворта в полосах частот для наиболее выраженных спектральных мод.

В результате обработки в прямоугольной системе координат получается график зависимости $КНД$ от величины $\Delta t/T$, где T – преобладающий период регистрируемых колебаний. Более естественным является представление $КНД$ в полярной системе координат, отражающей угловое положение максимума $КНД$ по отношению к азимуту на источник. Последнее иллюстрируется примером, приведенным на рис. 3. Здесь на рис. 3а представлена диаграмма направленности линейки из 5 датчиков по отношению к спектральной моде колебаний 7 Гц от источника, выделенной с помощью спектральной обработки на всех 5 датчиках (рис. 3б). Положение максимума $КНД$ соответствует азимуту на источник $\alpha = 5$ град с погрешностью $\Delta\alpha / \alpha_{ист} = 5\%$ по отношению к истинному азимуту $\alpha_{ист}$. Последний определяется по данным GPS.

Ниже рассматриваются результаты применения поляризационного метода пеленгования к полевым данным.

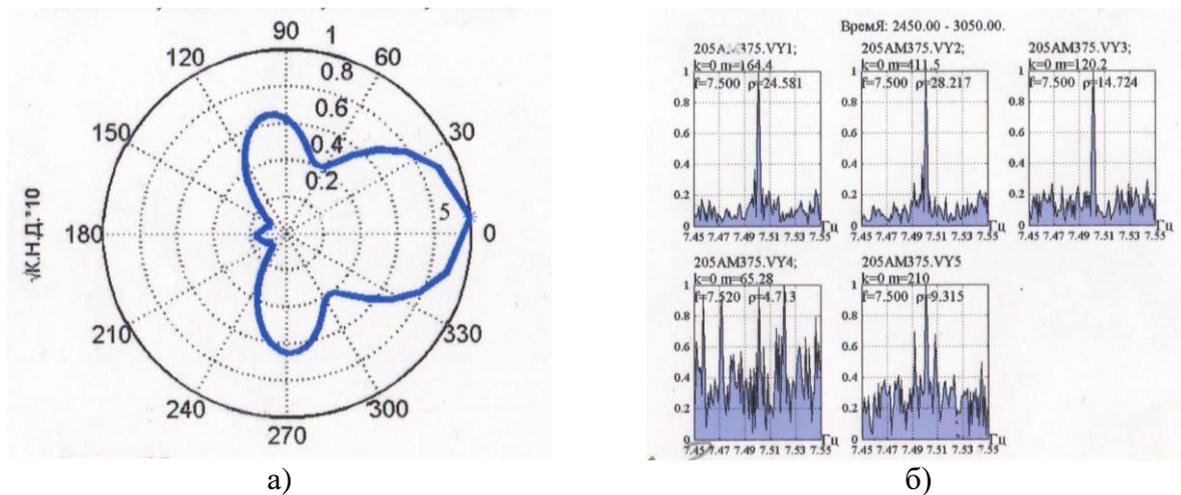


Рис. 3. а) результат вычисления KND и определения азимута на источник в полярной системе координат; б) спектры колебаний от источника для линейки из 5 датчиков по компоненте Y , отражающие результаты одновременного выделения преобладающих спектральных мод

4. Эксперименты и результаты

Для решения задачи пеленгования движущихся транспортных источников проведён ряд полевых экспериментов по синхронной записи порождаемых ими сейсмических колебаний в земле и акустических в атмосфере в разных режимах движения и пространственного положения. Регистрация сейсмического волнового поля осуществляется с помощью трёхкомпонентных геофонов GS-3, пьезокерамических микрофонов ПДС-7. Геофон и пьезокерамический микрофон объединялись в группу с общей точкой регистрации. При этом регистрация координат пространственной расстановки регистрирующих станций и временная синхронизация записей производятся по сигналам GPS. Пространственное положение транспортных объектов фиксировалось при помощи устройств GPS с записью маршрутов движения (GPS-треки). Такой подход обеспечивает получение достоверной информации о локализации источника во времени и пространстве, что позволяет в дальнейшем оценить точность пеленгования.

В качестве примера ниже рассматривается решение задачи пеленгования гусеничного транспорта. Предварительно решается задача обнаружения источника по его собственным шумам и шумам, возникающим при взаимодействии его со средой (землей) в процессе движения. Такие шумы будем называть полезными. При отсутствии каких-либо априорных сведений о них задача обнаружения формулируется как обнаружение случайных полезных сигналов на фоне внешнего случайного шума (микросейсмов).

Этому случаю отвечает алгоритм обнаружения, основанный на вычислении энергетических характеристик квазистационарных сигналов с гауссовым распределением [17]:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} \geq G. \quad (16)$$

Здесь N – длительность окна усреднения, выбираемая исходя из скоростных характеристик движущегося объекта, x_i – текущий отсчет записи колебаний, G – пороговое значение, определяемое по фоновому шуму и рассчитываемое на интервалах отсутствия полезного сигнала.

Величина порогового значения устанавливается в зависимости от того, с какой вероятностью требуется определять наступление полезного события. Так, например, для определения наступления события с вероятностью, равной 95.44 %, пороговое значение устанавливается равным двум среднеквадратичным отклонениям квадрата амплитуды колебаний фонового

шума. Время вступления t_i полезных колебаний соответствует моменту наступления условия (16), время окончания – обратному условию (16).

С учётом того, что по требованиям решение задач обнаружения (16) осуществляется в режиме реального времени, то вычисление статистик здесь осуществляется в классе вероятностно-итерационных алгоритмов оценивания вида [18]:

$$\bar{A}_j = F(X_j, \bar{A}_{j-1}), \quad (17)$$

где \bar{A}_j, \bar{A}_{j-1} – вектор оценок на j и $j-1$ шагах соответственно, X_j – текущие значения сигналов.

Реализация обнаружения с использованием (17) требует итерационного вычисления порога обнаружения с предварительным оцениванием среднего и среднеквадратического значений текущей последовательности отсчетов фонового шума и далее уровня значимости. Можно доказать, что итерационно-вероятностный алгоритм оценивания текущей дисперсии фонового шума имеет вид:

$$D(x) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \rightarrow D[N+1] = D[N] + \gamma (x[N+1] - \bar{x}[N])^2. \quad (18)$$

Здесь $\bar{x}[N+1] = \bar{x}[N] + \gamma (x[N+1] - \bar{x}[N])$ является оценкой текущего среднего; обозначение $x[N+1]$ соответствует текущим значениям отсчётов случайного процесса, $\bar{x}[N]$ – предшествующие текущие средние, γ – параметр, определяющий скорость сходимости итерационной процедуры оценивания к установившейся оценке. Один из способов выбора значения этого параметра соответствует $\gamma = \frac{\Delta t}{T}$, где Δt – интервал дискретизации непрерывного входного процесса, а T – его длительность. Для ускорения скорости сходимости итерационной процедуры принимают $\gamma = \text{var}$, например, $\gamma = 1/N+1$.

Как видно, при таком способе оценивания нужно использовать лишь три ячейки памяти, что многократно экономит память. Это требование особенно важно по отношению к системам реального времени, имеющим дело с длительными непрерывными процессами.

Вычисляемое значение D используется для задания порога принятия решения $G = p\sqrt{D}$ о наличии полезного колебания в регистрируемом внешнем шуме. Параметр p определяет уровень значимости решения.

В меняющейся внешней помеховой обстановке применение алгоритма (18) позволяет автоматически корректировать значение порога обнаружения, что является принципиальным.

Важным моментом, связанным с обнаружением, является выбор временного окна анализа T . Выбор его определяется скоростью движения v и перемещением транспортного средства по расстоянию Δr : $T \leq \Delta r/v$. Выбор Δr задается в виде последовательных отрезков проходимых объектом расстояний, определяющих точность оценивания его положения в пространстве.

Результаты обнаружения транспортного источника сопоставляются с его текущими координатами вдоль маршрута движения, фиксируемыми в виде GPS-треков с последующим оцениванием точности обнаружения по дальности.

Обнаружение осуществляется с помощью алгоритма (16) с применением скользящего окна сглаживания длительностью 5 секунд. Ниже на рис. 4 представлен графический пример обнаружения движущейся гусеничной техники в двух вариантах: в широкой полосе частот исходного колебания (1–50 Гц) и в узкой полосе 10–20 Гц, соответствующей положению максимума спектра колебаний источника. В обоих случаях моменты обнаружения соответствуют уровню значимости 0.95. По расстоянию в первом случае момент обнаружения транспортного средства соответствует нахождению его на удалении около 1350 м, во втором – 1470 м от пункта регистрации, т.е. предварительная фильтрация исходных колебаний в ин-

формативной полосе частот способствует существенному увеличению дальности обнаружения.

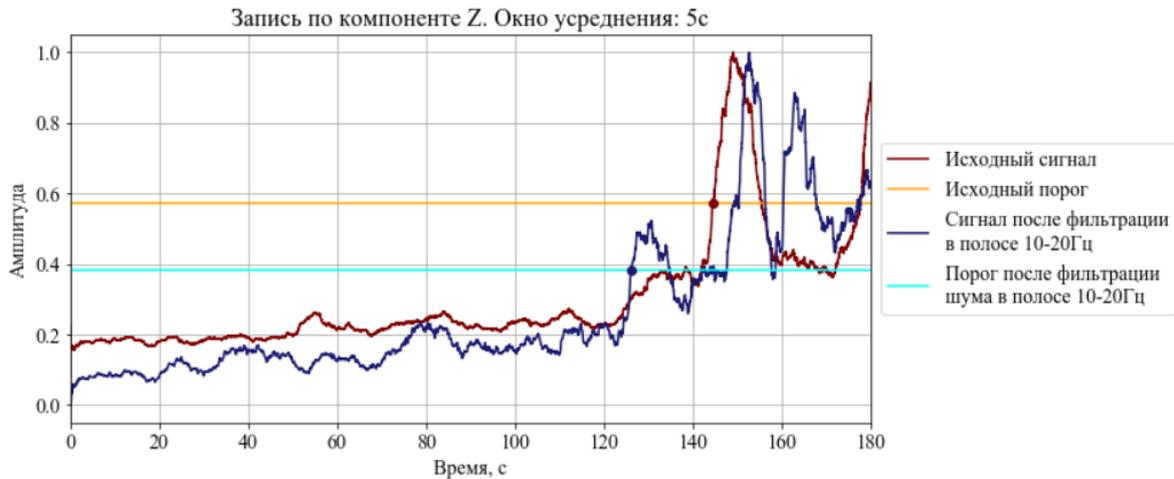
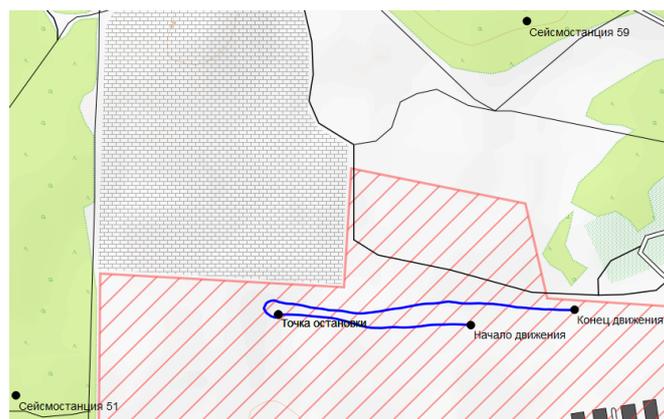
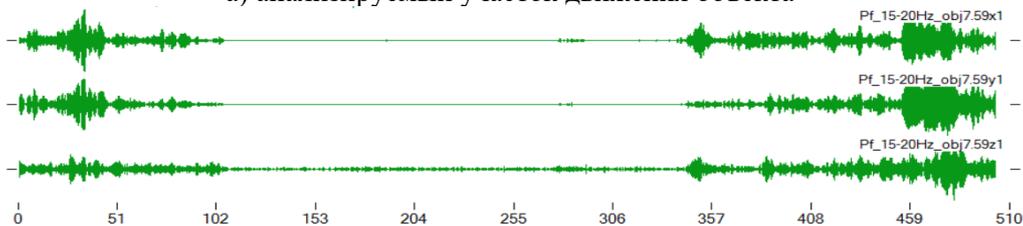


Рис. 4. Результат работы алгоритма обнаружения на примере обработки записи колебаний движущейся гусеничной техники с применением порога обнаружения с уровнем значимости 0.95 при нахождении на расстоянии от сейсмического датчика около 1470 м и при фильтрации в полосе частот 10–20 Гц, на расстоянии от сейсмического датчика около 1350 м без предварительной фильтрации

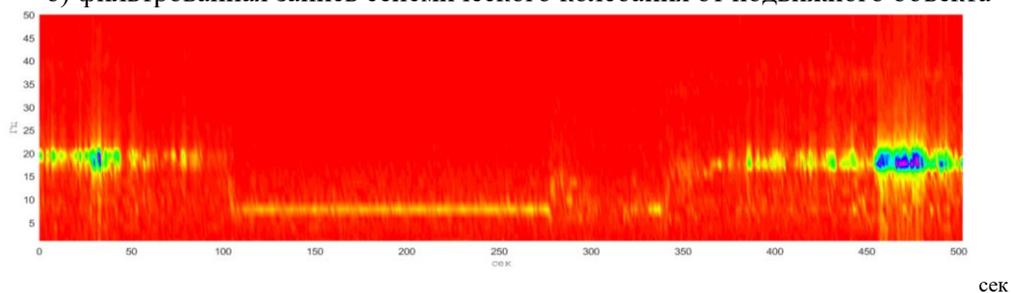
Этап пеленгования гусеничной техники рассматривается применительно к эксперименту с траекторией движения источника, представленной на рис. 5а [19]:



а) анализируемый участок движения объекта



б) фильтрованная запись сейсмического колебания от подвижного объекта



в) спектрально-временной анализ записи колебаний движущегося объекта, выполненных на станции № 59 (рис. 3)



г) профиль скорости движения объекта, полученного при помощи записи трека движения

Рис. 5. Исходные материалы для расчета пеленга движущегося объекта

Представленный рисунок отражает исходные материалы, которые используются для проведения расчетов: рис. 5а – траектория движения объекта (GPS-трек), где звездочками фиксируются положения движущегося объекта; рис. 5б – фильтрованная запись сейсмического колебания от подвижного объекта на удалениях от 474 до 650 м; рис. 5в – результат спектрально-временного анализа колебаний движущегося объекта (14), записанных на станции № 59; рис. 5г – профиль скорости движения объекта, полученного при помощи записи трека движения.

Как следует из рис. 5, картины спектрально-временного анализа (рис. 5в) и профиля скорости движения объекта (рис. 5г) высококоррелированы (коэффициент корреляции составляет около 0.9) и характеризуют режимы движения транспортного источника, выделяемые временными интервалами: нулевые горизонтальные линии на графиках соответствуют режиму «останов», остальные – «движению».

Конечные результаты поляризационного анализа иллюстрируются на примере определения пеленга на источник по отношению к его фиксируемым положениям (рис. 5а) Результат поляризационного анализа представляет собой полярограмму в виде эллипса рассеяния, отражающего траекторию движения двумерного вектора в азимутальной системе координат X,Y (рис. 6). Значение азимута на объект (его пеленга) определяется ориентацией большей оси эллипса согласно (9). В частном случае для верхнего рисунка, относящегося к положению источника в точке 1 (рис. 5а) и станции наблюдения № 51, азимут на источник составил $\alpha = 57.2^\circ$ при коэффициенте эллиптичности $e = 0.28$, по отношению к станции № 59 (нижняя часть рисунка) – $\alpha = 51.1^\circ$ при $e = 0.18$. Отклонение азимута от истинного (географического) значения составляет 2.1° .

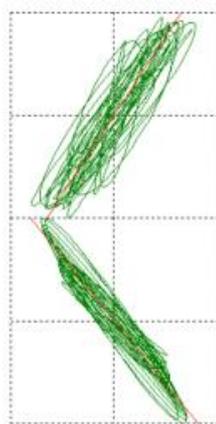


Рис. 6. Пример иллюстрации положений эллипсов рассеяния по данным станций наблюдения № 51, 59 по отношению к положению источника в точке 1

На рис. 7 представлен график изменения азимутального угла α в пределах участка движения объекта по данным регистрации на станции № 59.

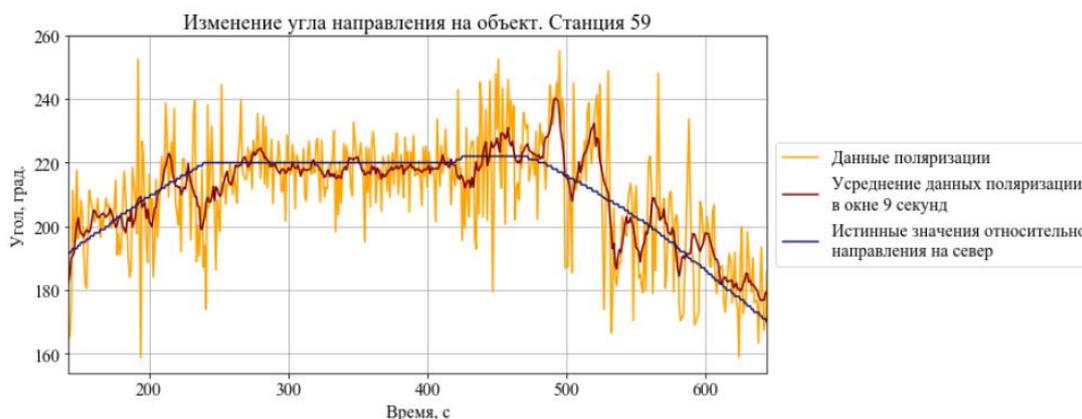


Рис. 7. График изменения угла полярограммы на исследуемом участке движения объекта, регистрируемого станцией № 59

Здесь множество текущих экспериментально измеренных значений азимутальных углов вычисляется в последовательных окнах длительностью 9 секунд. Им соответствует график желтого цвета. График значений азимутов (синего цвета), полученных по данным спутниковой карты, наложен на экспериментально измеренные. В результате усреднения в окне длительностью 9 секунд экспериментально полученных результатов измерений и аппроксимации их при помощи полинома (график красного цвета) получим, что изменение азимутального угла в пределах GPS-трека по данным № 59 составляет 52° , а для станции № 51 – 12° , что с высокой точностью соответствует изменению истинного угла, измеренного по спутниковой карте.

С учетом данных, представленных на рис. 7, на рис. 8 изображен график модуля невязки между истинными и измеренными азимутами, полученного при усреднении данных поляризации во временном окне, равном 9 секундам. Как следует из рис. 8, в режиме «движение» значения невязок лежат около 20 град, в то время как в режиме «останов» значения лежат в пределах 5 град. Для 20-градусной невязки относительная погрешность измерений азимута в пределах 0–90 град составит 22 %.

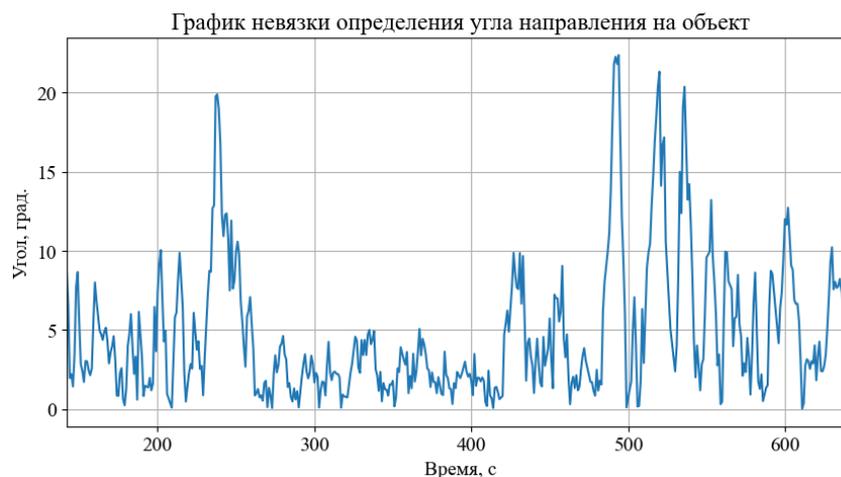


Рис. 8. График изменения модуля невязки определения угла поляризационным методом на исследуемом участке движения объекта, регистрируемого станцией № 59

5. Заключение

Теоретически обоснован и экспериментально проверен подход к решению задачи обнаружения и пеленгации подвижного транспортного объекта с помощью сосредоточенного трехкомпонентного сейсмического датчика с применением метода спектрально-поляризационной обработки. Реализация метода связана с решением последовательных задач обнаружения сейсмоакустических транспортных колебаний, выделением информативных частот, характерных для выбранных типов источников, и построением поляризационных эллипсов в координатах регистрирующего датчика с последующим расчетом пеленга на источник. Рассмотрен способ пеленгования с помощью сейсмической антенны в виде линейки из 5 пространственно-разнесенных сейсмодатчиков. Показана высокая точность пеленгования данным способом.

Разработаны алгоритмы и программный комплекс для решения перечисленных задач в реальном масштабе времени. Эффективность созданных программно-алгоритмических средств доказана при проведении натуральных экспериментов с подвижными объектами. В частности, показано что достигнутая относительная погрешность пеленгации движущегося источника с помощью поляризационного метода составляет около 22 %, с помощью сейсмической антенны из пяти датчиков – 5 %.

Литература

1. Карлтон П. Н., Фидлер Р. У. Определение положения источника сейсмических колебаний методом пассивного эксперимента // Анализ и выделение сейсмических сигналов. М.: «Мир», 1987. С. 158–175.
2. Спектор А. А., Райфельд М. А. Статистические задачи и методы пассивной сейсмической локации. Новосибирск: НГТУ, 2018. 199 с.
3. Морозов Ю. В., Райфельд М. А., Спектор А. А. Обработка сейсмических сигналов для оценки траектории движущегося транспортного средства // Автометрия. 2018. № 3. С. 32–38.
4. Аверьянов А. В., Глебова Г. М. Определение координат движущегося объекта сосредоточенной системой наблюдения // Автометрия. 2014. № 4 (50). С.67–73.
5. Алямкин С. А., Нежевенко Е. С. Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 31–39.
6. Averbuch A., Zheludev V., Rabin N., Schclar A. Wavelet based acoustic detection of moving vehicles // School of Computer Science Tel Aviv University, March 11, 2007.
7. Khairtdinov M. S., Kopylova O. A., Dobrorodny V. I., Shimanskaya G.M. Geoinformation Technology for Estimation of Geocological Risks from Technogenic Noise // Proc. 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russia, 2020. P. 272–276. DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314658.
8. Kopylova O., and Khairtdinov M. Statistical Algorithms for Analysis, Measurement, and Recognition of Transport Noises // Proc. IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022. P. 940–943. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016946.
9. Странгуль О. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы навигации и локации подвижных объектов // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 201–210.
10. Гальперин Е. И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: «Недра», 1977. 277 с.
11. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2006. 560 с.

12. *Alessandrini B, Cattaneo M, Demartin M, Gasperini M, Lanza V. A. Simple P-wave polarization analysis: its application to earthquake location // Annals of Geophysics. 1994. № 5 (5). P. 883–897.*
13. *Perelberg A. I., Hornbostel S. C. Applications of seismic analysis // Geophysics. 1994. № 59 (1). P. 119–130.*
14. *Григорюк А. П., Ковалевский В. В., Брагинская Л. П. Исследование поляризации сейсмических волн при вибросейсмическом мониторинге // Сборник материалов Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 2. С. 10–16.*
15. *Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software. Prentice Hall, INC, 1989. 575 p.*
16. *Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: «Мир», 1978. 848 с.*
17. *Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов: под редакцией Ю. Б. Кобзарева. М.: «Издательство иностранной литературы», 1963. 432 с.*
18. *Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: «Наука», 1968. 350 с.*
19. *Добrorодный В. И., Копылова О. А. Характеристики микросейсм и акустических шумов в условиях транспортного полигона. // Сборник материалов Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2021. № 1. С. 118–125.*

Добrorодный Владимир Игоревич

преподаватель, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А.И. Прошлякова (ТВВИКУ, 625001, Тюмень, ул. Л. Толстого, 1), e-mail: Dobrorodny@bk.ru.

Копылова Оксана Андреевна

инженер, ИВМиМГ СО РАН, НГТУ (630090, Новосибирск, просп. Ак. Лаврентьева, 6), тел. +7 383 330 87 43, e-mail: oksana@opg.sccc.ru, ORCID ID: 0000-0003-2311-2390.

Хайретдинов Марат Саматович

д.т.н., г.н.с., ИВМиМГ СО РАН, профессор НГТУ (630090, Новосибирск, просп. Ак. Лаврентьева, 6), тел. +7 383 330 87 43, e-mail: marat@opg.sccc.ru, ORCID ID: 0000-0002-3250-521X.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Detection and Direction Finding of Transport Objects in Seismoacoustic Observation Systems

Vladimir I. Dobrorodny¹, Oksana A. Kopylova^{2,3}, Marat S. Khairtudinov^{2,3}

¹ Tyumen Higher Military Engineering Order of Kutuzov Command School named after Marshal of Engineering Troops A. I. Proshlyakov

² Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS (ICMMG SB RAS)

³ Novosibirsk State Technical University (NSTU)

Abstract: The problem of passive geophysical monitoring of transport objects using acoustic and three-component seismic oscillations is considered. The solution is based on the application of spectral-time analysis, the method of spectral-polarization processing, the selection of informative frequencies of oscillations and the determining the direction finding on the object. The azimuthal orientation of the major axis position of the scattering ellipse obtained by polarization processing makes it possible to determine the direction finding. Numerical estimates of the accuracy of problem solving in a field experiment have been obtained. The proposed approach is based on consideration of the spatial-frequency characteristics of the object and its seasonal variation.

Keywords: passive geophysical monitoring, detection, direction finding, transport object, polarization method, bandpass filtering, comb filter, field experiment.

For citation: Dobrorodny V. I., Kopylova O. A., Khairtudinov M. S. Detection and direction finding of transport objects in seismoacoustic observation systems (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2023, vol. 17, no. 1. pp. 3-17. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-3-17>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Dobrorodny V. I., Kopylova O. A.,
Khairtudinov M. S., 2023

The article was submitted: 25.04.2022;
revised version: 29.11.2022;
accepted for publication 21.12.2022.

References

1. P.N. Karlton, R.U. Fidler. Opredelenie polozheniya istochnika seismicheskikh kolebaniy metodom passivnogo eksperimenta [Determination of the position of the source of seismic vibrations by the method of passive experiment]. *Book «Analiz i vydelenie seismicheskikh signalov»*, Moscow, Mir, 1987, pp.158-175.
2. A.A. Spektor, M.A. Raifel'd. *Statisticheskie zadachi i metody passivnoi seismicheskoi lokatsii* [Statistical problems and methods of passive seismic location]. Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 2018. 199 p.
3. Morozov Yu.V., Raifel'd M.A., Spektor A.A. Obrabotka seismicheskikh signalov dlya otsenki traektorii dvizhushchegosya transportnogo sredstva [Seismic signal processing for trajectory estimation of a moving vehicle]. *Avtometriya*, 2018, no. 3, pp. 32-38.
4. Aver'yanov A.V., Glebova G.M. Opredelenie koordinat dvizhushchegosya ob"ekta sosredotochen-noi sistemoi nablyudeniya [Determining the coordinates of a moving object by a lumped observation system]. *Avtometriya*, 2014, no. 4, pp.67-73.
5. Alyamkin S.A., Nezhevenko E.S. *Vosstanovlenie traektorii dvizhushchegosya ob"ekta v seismi-cheskoi sisteme obnaruzheniya pri ogranichenom kolichestve datchikov* [Reconstruction of the trajectory of a moving object in a seismic detection system with a limited number of sensors]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 2, pp. 31-39.
6. Averbuch A., Zheludev V., Rabin N., Schclar A. Wavelet based acoustic detection of moving vehicles. *School of Computer Science Tel Aviv Univesity*, Tel Aviv 69978, Israel, 2007.

7. M. S. Khairtdinov, O. A. Kopylova, V. I. Dobrorodny and G. M. Shimanskaya, "Geoinformation Technology for Estimation of Geoecological Risks from Technogenic Noise". *2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE)*, Novosibirsk, Russia, 2020, pp. 272-276, doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314658.
8. Kopylova and M. Khairtdinov. *Statistical Algorithms for Analysis, Measurement, and Recognition of Transport Noises. 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 940-943, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016946.
9. Strangul' O.N., Tarasenko V.P. Korrelyatsionno-ekstremal'nye sistemy navigatsii i lokatsii podvizhnykh ob"ektov [Correlation-extremal systems of navigation and location of moving objects]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2001, no. 7, pp. 201-210.
10. Gal'perin E.I. *Polyarizatsionnyi metod seismicheskikh issledovaniy* [Polarization method of seismic surveys]. Moscow, Nedra, 1977. 277 p.
11. Gordienko V.A. *Vektorno-fazovye metody v akustike* [Vector phase methods in acoustics]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 560 p.
12. Alessandrini B, Cattaneo M, Demartin M, Gasperini M, Lanza V. A. Simple P-wave polarization analysis: its application to earthquake location. *Annals of Geophysics*, 1994, no. 5(5), pp. 883-897.
13. Azik I. Perelberg, Scott C. Hornbostel; Applications of seismic analysis. *Geophysics*, 1994, no. 59 (1), pp. 119–130.
14. A. P. Grigoryuk, V. V. Kovalevskii, L. P. Braginskaya. *Issledovanie polyarizatsii seismicheskikh voln pri vibroseismicheskom monitoringe* [Study of the polarization of seismic waves during vibroseismic monitoring]. *Interekspo GEO-Sibir'. XIV Mezhdunar. nauch. kongr., Mezhdunar. nauch. konf. «Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchei sredy, geokologiya»*. Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies, 23-27 April, 2018, iss. 2, pp. 10-16.
15. D. Kahaner, C. Moler, S. Nash. *Numerical Methods and Software*. Prentice Hall, INC, 1989. p. 575.
16. L. Rabiner, B. Gould. *Teoriya i primeneniye tsifrovoi obrabotki signalov* [Theory and Applications of Digital Signal Processing]. Moscow, Mir, 1978. 848 p.
17. K. Khelstrom. *Statisticheskaya teoriya obnaruzheniya signalov* [Statistical Theory of Signal Detection] Ed. Yu.B. Kobzarev. Moscow, Izdatel'stvo inostranoi literatury, 1963. 432 p.
18. Tsympkin Ya.Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka, 1968. 350 p.
19. V. I. Dobrorodny, O. A. Kopylova. *Kharakteristiki mikrozeism i akusticheskikh shumov v usloviyakh transportnogo poligona* [Characteristics of microseisms and acoustic noise in the conditions of a transport polygon]. *Interekspo GEO-Sibir'. XVII Mezhdunar. nauch. kongr., Mezhdunar. nauch. konf. «Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchei sredy, geokologiya»*, Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies, 19-21 May, 2021, iss. 4, pp.118-125.

Vladimir I. Dobrorodny

Lecturer, Tyumen Higher Military Engineering Order of Kutuzov Command School named after Marshal of Engineering Troops A. I. Proshlyakov (Tyumen, Russia), Dobrorodny@bk.ru.

Oksana A. Kopylova

Engineer, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk State Technical University (ICMMG SB RAS, NSTU, Novosibirsk, Russia), oksana@opg.sccc.ru, ORCID ID: 0000-0003-2311-2390.

Marat S. Khairtdinov

Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Principal Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk State Technical University (ICMMG SB RAS, NSTU, Novosibirsk, Russia), marat@opg.sccc.ru, ORCID ID: 0000-0002-3250-521X.