

0017K0

На правах рукописи

НА
ВЕР
СТОЯ

Варыпаев Александр Вячеславович

**Оценивание параметров микросейсмического источника по
измерениям, производимым группой датчиков**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка
информации (информатика, машиностроение)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Москва - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

**Научный
руководитель:**

кандидат физико-математических наук, доцент
Бежаева Зинаида Ивановна

**Официальные
оппоненты:**

Чернояров Олег Вячеславович,
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Национальный
исследовательский университет «Московский
энергетический институт», профессор кафедры
радиотехнических приборов и антенных систем

Любушин Алексей Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН»

**Ведущая
организация:**

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Российский
государственный университет нефти и газа
им. И. М. Губкина»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2015 г. в __ ч. __ мин. на
заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
Москва, Рубцовская наб., 2/18, ауд. 1006 л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (www.bmstu.ru)
Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Аттетков
Александр Владимирович

Актуальность темы. В настоящее время инженеры в сфере энергетики интенсивно исследуют вопрос об экологически безопасном и эффективном в прибыльном отношении освоении углеводородных и геотермальных резервуаров, что, как правило, осуществляется при помощи технологически сложной и ответственной операции гидроразрыва пласта (ГРП). Единственным способом контроля ГРП является микросейсмический мониторинг.

Под микросейсмическим мониторингом понимают комплекс аналитических методов, позволяющих получать достаточно точную информацию о сложных физических процессах, протекающих в приповерхностной земной среде, в частности, о геометрии трещин, развивающихся в пространстве и во времени. Эту информацию извлекают из результатов непрерывной обработки записей сейсмической группы в режиме реального времени, оценивая параметры сейсмического источника на каждом временном интервале, где был обнаружен сигнал от индуцированного гидроразрывом микросейсмического события.

Впервые задача определения координат сейсмического источника по данным поверхностных сейсмических групп рассматривалась при мониторинге землетрясений и подземных ядерных взрывов, на региональных и глобальных расстояниях. Основное отличие указанной задачи, которой посвящена обширная литература, от задачи, рассматриваемой в диссертации, состоит в том, что источник сейсмических волн удалён от сейсмической группы на расстояние, значительно превышающее апертуру группы. В этом случае волновой фронт, приходящий на сейсмическую группу, является плоским, вследствие чего невозможно оценить местоположение очага с требуемой на практике точностью, используя только информацию об относительных запаздываниях сейсмического сигнала на датчиках группы. Однако именно в указанных приложениях получили развитие и нашли широкое применение методы обработки данных сейсмических групп. По наблюдениям группы

оцениваются такие параметры, как азимут вектора нормали плоской волны и проекция скорости волны на земную поверхность.

Наряду с энергетикой, микросейсмический мониторинг применяется в горнодобывающей отрасли для обеспечения безопасности и повышения экономической эффективности открытых горных работ.

Несмотря на то, что настоящая работа посвящена разработке алгоритмов решения конкретной прикладной задачи геофизики, результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при решении круга практических задач, которые математически формулируются как идентификация многомерных линейных систем с одним входом и несколькими выходами, векторная передаточная функция которых зависит от конечного набора неизвестных постоянных во времени параметров. Такие задачи часто встречаются, например, в акустике, радиотехнике, медицине, геофизике и связаны с ситуациями, когда некоторый сигнал, проходящий через сложно устроенную физическую среду, измеряется в присутствии помех в различных точках этой среды. При этом распространение сигнала в среде математически описывается линейными дифференциальными уравнениями в частных производных, а по результатам измерения этого сигнала в разных точках среды необходимо изучить свойства среды или определить характеристики объекта, излучающего сигнал.

Цель проведённых исследований – статистический синтез и анализ численных методов определения параметров точечных источников слабых упругих колебаний земной среды, сигналы от которых наблюдаются на фоне интенсивных помех.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих **основных задач**:

1. Статистическое обоснование и вывод основных функционалов, оптимизация которых приводит к определению значений параметров микросейсмического источника с неизвестной детерминированной временной

функцией; при этом характеристики среды распространения сейсмических волн от источника полагаются известными.

2. Получение статистической оценки параметров микросейсмического источника, обладающей свойством асимптотической эффективности, для случая, когда временная функция источника описывается как «отрезок» гауссовского стационарного случайного процесса с известной автокорреляционной функцией.

3. Доказательство статистической состоятельности оценок параметров микросейсмического источника, получаемых при поиске экстремума функционала от фазовых компонент спектральных наблюдений сейсмической группы, для случая неизвестной временной функции микросейсмического источника.

4. Синтез фазовых алгоритмов оценивания параметров микросейсмического источника, робастных к диаграмме его излучения.

5. Сравнительный анализ матриц среднеквадратических ошибок статистических оценок параметров микросейсмических источников, соответствующих различным алгоритмам оценивания этих параметров.

Методы исследования. При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертации, использовались различные классы математических методов: функциональный анализ, теория вероятностей, теория стационарных случайных процессов, статистическая теория оценивания параметров случайных процессов, методы матричной алгебры, метод независимых испытаний Монте-Карло, методы вычислительной математики, современная технология программирования.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается результатами численного моделирования. Результаты диссертационной работы согласуются с известными результатами других авторов.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. С помощью современной асимптотической теории статистического оценивания разработаны алгоритмы определения значений векторных параметров микросейсмических источников по наблюдениям многомерных временных рядов, регистрируемых группами пространственно распределённых сейсмоприемников.

2. Разработаны и экспериментально исследованы фазовые алгоритмы оценивания параметров сейсмического источника, учитывающие спектральные плотности мощности помех и временных функций микросейсмических источников, диаграммы излучения этих источников.

3. Разработаны и экспериментально исследованы фазовые алгоритмы, инвариантные к неизвестным диаграммам излучения источников, позволяющие оценивать координаты микросейсмического источника при отсутствии априорной информации о его диаграмме излучения.

4. Теоретически обосновано, что используемый в современной практике микросейсмического мониторинга алгоритм сейсмической эмиссионной томографии (СЭТ) есть частный случай разработанных в диссертации методов определения параметров микросейсмического источника. С использованием результатов вычислительных экспериментов, методами математического моделирования доказано, что СЭТ существенно уступает разработанным в диссертации алгоритмам по точности оценивания параметров микросейсмических источников при малых отношениях сигнал-шум и статистических характеристиках помех, коррелированных по времени и по пространству.

Практическая значимость. Разработанные в диссертации методы «борьбы с помехами», основанные на современной статистической теории оценивания параметров многомерных случайных процессов, могут быть использованы для решения широкого класса практических задач, в которых

наблюдения «полезных» сигналов искажены помехами, сильно коррелированными во времени и в пространстве.

Разработанные в ходе исследований алгоритмы определения значений параметров микросейсмических источников могут быть использованы для повышения эффективности мониторинга микросейсмической активности с помощью поверхностных сейсмических групп. В частности, в проблеме микросейсмического мониторинга гидроразрыва пластов на месторождениях углеводородов разработанные статистически оптимальные и фазовые алгоритмы являются альтернативой традиционному методу эмиссионной томографии – практически единственному методу, используемому в настоящее время для анализа данных от микросейсмических событий, регистрируемых поверхностными сейсмическими группами.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 74-ой Международной конференции Европейской ассоциации геофизиков и инженеров (Копенгаген, 2012); 33-ей Генеральной ассамблее Европейской сейсмологической комиссии (Москва, 2012); 82-ой Ежегодной конференции Американского общества разведочной геофизики (Лас Вегас, 2012); Международном микросейсмическом форуме «Evaluating Monitoring Techniques: Downhole, Buried and Surface» (Напа, Калифорния, 2013); 4-ом Семинаре по сейсморазведке Европейской ассоциации геофизиков и инженеров (Амстердам, 2013); совместном научном семинаре кафедр «Вычислительные системы и сети» и «Кибернетика» Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ (2014); Общественном постоянном научном семинаре «Теория автоматического управления и оптимизации» Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (2014).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 5 научных работах, в том числе в 4 статьях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий общим объёмом 3.3 п. л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 132 страницах, содержит 18 иллюстраций и 6 таблиц. Библиография включает 91 наименование.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включён лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объёме диссертационной работы.

В **первой главе** осуществляется синтез статистически оптимальных алгоритмов определения параметров микроземлетрясений по наблюдениям сейсмического волнового поля с помощью поверхностной группы сейсмоприемников.

В рассматриваемой математической формулировке задачи поверхностного микросейсмического мониторинга векторный параметр $\varphi = (\mathbf{r}, \theta) \in \Theta$ источника представлен его координатами $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$, и шестью величинами $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_6)$, однозначно определяющими его диаграмму излучения.

На практике, при работе с вычислительными процедурами в качестве наблюдений, всегда имеют дело с конечной выборкой значений непрерывного

случайного процесса, полученной с определённой частотой дискретизации f_s .

Математическая модель этих наблюдений имеет следующий вид:

$$y_k = \sum_{\tau=0}^n h_{k-\tau}(\varphi) u_{\tau} + \xi_k, \quad k \in \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$y_k = (y_{l,k}, l \in \overline{1, m})^T, \quad h_k(\varphi) = (h_{l,k}(\varphi), l \in \overline{1, m})^T;$$

$$\xi_k = (\xi_{l,k}, l \in \overline{1, m})^T, \quad (\xi_k, k \in \overline{1, n}) \sim N(0, \Sigma), \quad \dim(\Sigma) = mn \times mn.$$

Функция u_{τ} описывает временную функцию колебаний среды в источнике, ξ_k - вектор случайных помех, искажающих сигналы от источника, зарегистрированных поверхностной группой сейсмоприёмников. Вектор $h_k(\varphi)$ представляет набор импульсных переходных характеристик эквивалентных линейных систем, связывающих временную функцию колебаний в источнике u_{τ} с процессами, наблюдаемыми на отдельных сейсмометрах группы. Если в качестве u_{τ} рассматривать выборку из гауссовского стационарного процесса с нулевым средним и известной спектральной плотностью $g(f)$, то при существовании в Θ непрерывных смешанных частных производных третьего порядка от компонент вектор-функции $h_k(\varphi)$ можно выписать оценку неизвестного параметра $\varphi \in \Theta$, которая будет иметь в классе регулярных оценок наименьшую предельную матрицу среднеквадратических ошибок, равную обратной предельной матрице Фишера $J^{-1}(\varphi)$. Эта оценка имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}(\bar{x}_n) = \operatorname{argmax}_{\varphi \in \Theta} & \left[-\sum_{j=1}^n \log [\det (F_{j, \xi} + g_j H_j(\varphi) H_j^*(\varphi))] + \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^n \frac{|H_j^*(\varphi) F_{j, \xi}^{-1} x_j|^2}{g_j^{-1} + H_j^*(\varphi) F_{j, \xi}^{-1} H_j(\varphi)} \right], \quad \bar{x}_n = (x_j, j \in \overline{1, n}); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_j(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \mathbf{h}_k(\varphi) \exp \left\{ -i 2\pi k \frac{f_j}{f_s} \right\}; \quad \mathbf{x}_j = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \mathbf{y}_k \exp \left\{ -i 2\pi k \frac{f_j}{f_s} \right\};$$

$$\mathbf{F}_{j,\xi}^{-1} = \mathbf{F}_{\xi}^{-1}(f_j); \quad g_j^{-1} = g^{-1}(f_j); \quad f_j = \frac{f_s j}{n}, \quad j \in \overline{1, n};$$

$$\sqrt{n} \left(\hat{\varphi}(\bar{\mathbf{x}}_n) - \varphi \right) \xrightarrow{d} N(0, \mathbf{J}^{-1}(\varphi)).$$

Вектора $\mathbf{H}_j(\varphi)$ и $\mathbf{x}_j$ представляют собой дискретное конечное преобразование Фурье (ДКПФ) от последовательностей $\mathbf{h}_k(\varphi)$ и $\mathbf{y}_k$ соответственно. Оценка (2) находится как корень уравнения $\Delta(\bar{\mathbf{x}}_n, \varphi) = 0$, где статистика $\Delta(\bar{\mathbf{x}}_n, \varphi)$ - первый член разложения для логарифма отношения правдоподобия совместной плотности распределения величин $\bar{\mathbf{y}}_n = (\mathbf{y}_k, k \in \overline{1, n})$ модели наблюдений (1):

$$\log \frac{p(\bar{\mathbf{y}}_n, \varphi + n^{-1/2} \psi)}{p(\bar{\mathbf{y}}_n, \varphi)} = \psi^T \Delta(\bar{\mathbf{x}}_n, \varphi) - \frac{1}{2} \psi^T \Gamma_n(\varphi) \psi + \alpha_n(\bar{\mathbf{x}}_n, \varphi);$$

$$\alpha_n(\bar{\mathbf{x}}_n, \varphi) \xrightarrow{p} 0, \Delta(\bar{\mathbf{x}}_n, \varphi) \xrightarrow{d} (0, \mathbf{I}(\varphi)); \quad \Gamma_n(\varphi) \xrightarrow{p} \mathbf{J}(\varphi), \quad \forall \varphi \in \Theta.$$

Аналогичным образом, применяя формальную логику метода максимального правдоподобия, можно получить оценку параметра $\varphi \in \Theta$ модели (1) для случая, когда $\mathbf{u}_t$ представляет собой последовательность детерминированных неизвестных величин. Эта оценка имеет вид:

$$\hat{\varphi}(\bar{\mathbf{x}}_n) = \arg \max_{\varphi \in \Theta} \sum_{j=1}^n \frac{|\mathbf{H}_j^*(\varphi) \mathbf{F}_{j,\xi}^{-1} \mathbf{x}_j|^2}{\mathbf{H}_j^*(\varphi) \mathbf{F}_{j,\xi}^{-1} \mathbf{H}_j(\varphi)}. \quad (3)$$

Поскольку, с ростом числа наблюдений количество неизвестных параметров, в данном случае информативных - φ и неинформативных - $\mathbf{u}_t$, увеличивается прямо пропорционально n , то остаётся неисследованным вопрос об асимптотических свойствах оценки (3). Оценку (3) называют оценкой максимального правдоподобия (МП) параметра φ модели (1) при неизвестной детерминированной функции $\mathbf{u}_t$.

На практике значения обратной матричной спектральной плотности мощности $\mathbf{F}_{j,k}^{-1}$ неизвестны, поэтому их оценивают по довольно длительному интервалу записей «чистых» помех группы.

Алгоритм сейсмической эмиссионной томографии оценивания пространственных координат источника выводится из формулы (3) для случая $\mathbf{H}_j^*(\mathbf{r}) = \left(\exp \{ -i2\pi f_j \tau(l, \mathbf{r}) \}, l \in 1, \dots, m \right)^T$ и некоррелированных по времени и пространству случайных дискретных гауссовых помех:

$$\hat{\mathbf{r}}(\tilde{\mathbf{x}}_n) = \operatorname{argmax}_{\mathbf{r} \in \Theta} \sum_{j=1}^n \left| \mathbf{H}_j^*(\mathbf{r}) \mathbf{x}_j \right|^2, \quad (4)$$

где $\tau(l, \mathbf{r})$ - время прохождения волны от источника с координатами $\mathbf{r}$ до l -го сейсмоприёмника.

Хорошо зарекомендовавший себя в акустике робастный к помехам класс фазовых алгоритмов локации точечных источников в диссертации обобщён на задачу поверхностного микросейсмического мониторинга. Вектор $\mathbf{H}_j(\varphi) = \left(H_k(f_j, \varphi), k = \overline{1, m} \right)$ - модель частотной характеристики «путей распространения» сигнала источника вдоль сейсмических лучей, соединяющих источник с датчиками группы, можно представить в следующем виде :

$$H_k(f_j, \varphi) = a_k(\theta) \exp \{ -i2\pi f_j \tau_k(\mathbf{r}) \} = |a_k(\theta)| \exp \{ \gamma_k(\theta) \} \exp \{ -i2\pi f_j \tau_k(\mathbf{r}) \};$$

$$\text{где } \gamma_k(\theta) = \begin{cases} 0, & \text{если } a_k(\theta) \geq 0; \\ \pi, & \text{если } a_k(\theta) < 0; \end{cases}$$

Путем пренебрежения изменениями величины $|a_k(\theta)|$ - амплитуды диаграммы излучения микросейсмического источника (т.е., считая, что $|a_k(\theta)| \equiv 1$) получен фазовый алгоритм, позволяющий одновременно оценивать параметры $\mathbf{r}$ и θ :

$$\hat{\varphi} = \operatorname{argmin}_{(\mathbf{r}, \theta) \in \Theta} \mathcal{Q}_n(\tilde{\mathbf{x}}_n, \mathbf{r}, \theta), \quad (5)$$

где

$$\Omega_n(\bar{\mathbf{x}}_n, \mathbf{r}, \theta) = \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k,l=1 \\ k < l}}^m c_{k,l}(f_j) \rho(2\pi f_j \delta_{k,l}(\mathbf{r}) - \phi_{k,l}(f_j) - \lambda_{k,l}(\theta)),$$

$$\delta_{k,l}(\mathbf{r}) = \tau_k(\mathbf{r}) - \tau_l(\mathbf{r}), \lambda_{k,l}(\theta) = \begin{cases} 0, & \text{если } a_k(\theta) a_l(\theta) \geq 0; \\ \pi, & \text{если } a_k(\theta) a_l(\theta) < 0; \end{cases}$$

$\phi_{k,l}(f_j)$ - оценка главного значения аргумента взаимного спектра пары наблюдаемых процессов на сейсмоприёмниках с индексами k и l ; действительные коэффициенты $c_{k,l}(f_j)$ являются весовыми множителями.

На практике, путём перебора возможных значений параметра θ , оценка (5) позволяет определять истинное значение этого параметра, вычисляя относительные полярности сигналов, генерируемых источником на различных датчиках группы при различных параметрах диаграммы излучения.

В частном случае, при $\rho(x) = \cos(x)$, алгоритм (5) допускает эквивалентное представление, позволяющее значительно сократить затраты при вычислениях:

$$\hat{\varphi}(\bar{\mathbf{x}}_n) = \operatorname{argmax}_{(\mathbf{r}, \theta) \in \Theta} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n b_{k,j} \frac{x_{j,k}}{|x_{j,k}|} \exp\{-i2\pi f_j \tau_k(\mathbf{r}) + \gamma_k(\theta)\}. \quad (6)$$

Коэффициенты $b_{k,j}$ в (6) играют роль весовых множителей, позволяющих оптимизировать качество алгоритма.

В диссертации также синтезирован подкласс фазовых алгоритмов, обладающих важным свойством инвариантности к форме диаграммы излучения микросейсмического источника и обеспечивающих оценивание его координат в пространстве при полном отсутствии априорной информации о механизме микросейсмического источника. В этот подкласс входят все оценки вида (5) при $\lambda_{k,l}(\theta) \equiv 0$ и функции $\rho(x)$, удовлетворяющей следующим условиям:

$$1) \rho(x) = \rho(-x), \rho(0) = 0;$$

$$2) \rho(x_1) < \rho(x_2), \text{ если } x_1 < x_2 \text{ и } x_1, x_2 \in [0, \pi/2];$$

3) $\rho(x) = \rho(\pi - x)$, при $x \in [0, \pi/2]$ (т.е. функция $\rho(x)$ симметрична относительно точки $\pi/2$).

Во второй главе рассматриваются практически важные свойства алгоритмов поверхностного микросейсмического мониторинга, синтезированных в первой главе.

1. Обосновывается выбор оптимальных коэффициентов $c_{k,l}(f_j)$ и $b_{k,l}$ в выражениях (5) и (6) соответственно, которые потенциально могут обеспечивать наибольшую точность оценивания параметра Φ .

Вид коэффициентов $c_{k,l}(f_j)$ в формуле (5) определяется предельным распределением случайных величин $\phi_{k,l}(f_j)$. При предельном переходе $n \rightarrow \infty$ последовательность частот $\{f_j\}_{j=1}^n$ такова, что $\lim_{n \rightarrow \infty} f_j = \frac{j}{n} f_s = f \in (0, f_s/2)$. Если u_t есть выборка из гауссовского стационарного процесса с нулевым средним, то предельная плотность вероятности центрированной случайной величины $\phi_{k,l}(f_j)$ имеет следующий аналитический вид:

$$P_{k,l}(\vartheta) = \frac{1 - |\gamma_{k,l}(f)|^2}{2\pi} \left(\frac{1}{1 - g_{k,l}^2(f, \vartheta)} + g_{k,l}(f, \vartheta) \frac{\pi - \arccos g_{k,l}(f, \vartheta)}{(1 - g_{k,l}^2(f, \vartheta))^{3/2}} \right), \quad (7)$$

где $g_{k,l}(f, \vartheta) = |\gamma_{k,l}(f)| \cos \vartheta$, $\vartheta \in [-\pi; \pi]$;

$\gamma_{k,l}(f)$ - значение комплексной функции когерентности на частоте f .

Из формулы (7) следует, что асимптотическая дисперсия величин $\phi_{k,l}(f_j)$ для любой пары процессов, наблюдаемых на сейсмоприёмниках группы, монотонно убывает при стремлении к единице модуля когерентности этих процессов. Последний факт позволяет утверждать, что коэффициенты $c_{k,l}(f_j)$ должны зависеть от $|\gamma_{k,l}(f_j)|$. В диссертации предложены коэффициенты

$c_{k,j}(f_j)$, равные $|\gamma_{k,j}(f_j)|$, при этом качество оценивания координат сейсмического источника проверяется методами математического моделирования. На практике значение модуля комплексной функции когерентности оценивается по наблюдениям, регистрируемым сейсмоприемниками группы.

Вид коэффициентов $b_{k,j}$ в (6) определяется предельным распределением главного значения аргумента случайной величины $\frac{x_{j,k}}{|x_{j,k}|}$ и рассматриваются для случая, когда u_τ представляет собой последовательность детерминированных величин:

$$b_{k,j} = \frac{R_k(f)}{\sqrt{C_k(f_j)}} = \frac{|u(f_j)| |H_k(f_j, \Phi_0)|}{\sqrt{C_k(f_j)}};$$

$$u(f) = \sum_{\tau=l}^{\infty} u_\tau e^{-i2\pi\tau \frac{f}{f_1}}; H_k(f, \Phi) = \sum_{\tau=l}^{\infty} h_{k,\tau}(\Phi) e^{-i2\pi\tau \frac{f}{f_1}}, k = \overline{1, m};$$

$C_k(f)$ - спектральная плотность мощности помех на k -м сейсмоприёмнике группы.

2. Доказана сходимость по вероятности оценок координат очага источника к истинным значениям этих параметров, которые фазовые алгоритмы локации обеспечивают при неограниченном увеличении числа наблюдений, зарегистрированных поверхностной группой. С точки зрения математической статистики это качество оценок - свойство состоятельности является их важнейшей характеристикой.

Следующий ряд условий позволяет установить состоятельность оценок вида (5) при $\Phi = \mathbf{r}$ и $c_{k,j}(f_j) \equiv 1$:

- $\mathbf{r}_0$ является внутренней точкой множества Θ .
- Θ - компактное множество.

- Существует некоторая непрерывная на множестве Θ функция $T(\mathbf{r}) \in C(\Theta)$ такая, что $\forall \varepsilon > 0 \lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \sup_{\mathbf{r}} |n^{-1} \Omega_n(\tilde{\mathbf{x}}_n, \mathbf{r}) - T(\mathbf{r})| \geq \varepsilon \right\} = 0$, причём $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ является единственной точкой минимума для $T(\mathbf{r})$.

3. Для оценки максимального правдоподобия (МП) (3) устанавливается свойство эффективного подавления пространственно когерентных случайных помех, воздействующих на сейсмоприемники поверхностной группы, т.е. помех с матричной спектральной плотностью мощности (МСПМ) $F_{\xi}(f)$, близкой к вырожденной. В этом случае поле помех генерируется несколькими локализованными в пространстве точечными источниками, каждый со своей спектральной плотностью $C_k(f)$ и своим вектором частотных характеристик путей распространения $\mathbf{H}_k(f), k = \overline{1, s}, s < m$. В этом случае МСПМ $F_{\xi}(f)$ допускает следующее представление:

$$F_{\xi}(f) = \sum_{k=1}^s \mathbf{H}_k(f) \mathbf{H}_k^*(f) C_k(f), s < \infty, F_{\xi}(f) = \mathbf{A}(f) \mathbf{A}^*(f) + \sigma \mathbf{V}(f); \quad (8)$$

$$\mathbf{A}(f) \in C^{m \times s}; \mathbf{V}(f) \in C^{m \times m}, \quad s < m.$$

Число σ является регуляризирующим параметром, а матрица $\mathbf{V}(f)$ - любая невырожденная комплексная матрица. Матрица $F_{\xi}^{-1}(f)$ с учётом (8) и известных формул матричной алгебры приводится к специальному виду :

$$F_{\xi}^{-1}(f) = \sigma^{-1} \mathbf{U} + \mathbf{G} + \mathbf{O}(\sigma);$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{V}^{-1} + \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{A}^* \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^* \mathbf{V}^{-1};$$

$$\mathbf{Q}(f) = (\mathbf{H}_1(f), \mathbf{H}_2(f), \dots, \mathbf{H}_s(f))^T;$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{A}^* \mathbf{V}^{-1} \mathbf{A})^{-2} \mathbf{A}^* \mathbf{V}^{-1}.$$

Можно показать, что $\mathbf{U}$ - оператор, действующий в C^m и проектирующий любой вектор этого пространства на ортогональное дополнение к s - мерному

подпространству в C^m , определяемому множеством вектор-столбцов матрицы $Q(f)$, т. е. $U = V^{-1} - V^{-1}Q(Q^*V^{-1}Q)^{-1}Q^*V^{-1}$.

Это свойство матрицы U позволяет утверждать, что для оценок (2) и (3) ошибки оценивания параметра Φ , обусловленные случайными величинами ξ_k , $k \in \overline{1, n}$ в модели (1), уменьшаются при $\sigma \rightarrow 0$ независимо от мощности помех $C_k(f)$, $k = \overline{1, s}$, $s < m$.

В третьей главе представлены результаты вычислительных экспериментов, проведённых с применением метода последовательных независимых испытаний Монте-Карло.

Выявлены специфические особенности применения существующих и предложенных в диссертации алгоритмов определения координат микросейсмического источника при сложной диаграмме излучения его очага. Приведены результаты сравнительного анализа точности оценивания этих алгоритмов при конечной длине выборки в условиях интенсивных сейсмических помех (в условиях малого отношения сигнал-помеха).

Кроме экспериментов с синтетическими сейсмограммами микросейсмических источников представлены также результаты обработки записей реальных микросейсмических событий, индуцированных процессами перфорирования скважины при ее подготовке к процедуре гидроразрыва пласта на месторождении углеводородов.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработаны статистически оптимальные методы оценивания векторных параметров микросейсмических источников по наблюдениям многомерных временных рядов, регистрируемых группами пространственно распределённых сейсмоприемников. Эти методы позволяют учитывать физические свойства модели среды распространения сейсмических волн, спектральные характеристики случайных сейсмических помех, коррелированных по времени и пространству, механизмы очагов

микросейсмических событий и обеспечивают оценивание параметров этих событий при малых отношениях сигнал-шум.

2. В аналитическом виде получен класс теоретических оценок параметров микросейсмического источника, основанных на фазовой информации спектрального представления многомерных сейсмических наблюдений. В этом классе следует отметить оригинальные оценки, инвариантные к диаграмме излучения источника. Все алгоритмы фазовых оценок предполагают реализацию в частотной области, что обеспечивает их высокую вычислительную эффективность.

3. В рамках рассматриваемой параметрической модели наблюдений было получено аналитическое выражение для асимптотического распределения плотности вероятности разности фазовых компонент дискретных спектральных наблюдений двух гауссовских стационарных случайных процессов.

4. В результате проведенных вычислительных экспериментов были убедительно продемонстрированы существенные преимущества разработанных статистически оптимальных алгоритмов поверхностного микросейсмического мониторинга по сравнению с существующими алгоритмами в отношении точности оценивания координат микросейсмического источника и параметров, определяющих его диаграмму излучения, при малых отношениях сигнал-помеха, которые реально достижимы при проведении гидроразрывов пластов на месторождениях углеводородов.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Варыпаев А. В. Статистический анализ фазового алгоритма локации источника широкополосного волнового поля. Распределение разности фаз спектральных компонент наблюдений на пространственно разнесённых датчиках // Естественные и технические науки. 2012. № 3. С. 220-232. (0.75 п.л.).

2. Варыпаев А. В. Синтез статистических алгоритмов определения параметров микросейсмических источников по записям малоапертурной группы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2012. № 12. С. 21-36. (0.9 п.л.).

3. Kushnir A.F, Rozhkov N.M., Varypaev A.V. Statistically-based approach for monitoring of micro-seismic events // International Journal on Geomathematics. 2013. Vol. 4, N2. P. 201-225. (1.5 п.л./0.75 п.л.).

4. Determining the microseismic event source parameters from the surface seismic array data with strong correlated noise and complex focal mechanisms of the source / A. Varypaev [et al.] // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2014. Vol. 50, N3. P. 334–354. (1.25 п.л./0.6 п.л.).

5. Passive surface microseismic monitoring as a statistical problem: location of weak microseismic signals in the presence of strongly correlated noise / A. Varypaev [et al.] // Geophysical Prospecting. 2014. Vol. 62, N4. P. 819-833. (0.85 п.л./0.3 п.л.).