

# ОЦЕНКА ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Приводятся методика и результаты имитационного статистического моделирования, проведенного с целью оценки ошибок определения местоположения сейсмического источника. На основании анализа результатов моделирования приводятся некоторые рекомендации по практическому применению.*

*С.И. Березина*

*Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Военного научного центра космических исследований, г. Харьков, ул. Динамовская 3А.  
Контактный тел.: +38(0572)68-66-27*

*И.А. Таран*

*Адъюнкт кафедры №1 Харьковского Военного университета, г. Харьков, пл. Свободы 6  
Контактный тел.: +38(0572)40-41-41, дод.2-88*

## 1. Постановка проблемы

В настоящее время, несмотря на прогресс в различных областях науки и техники, человечество все еще зачастую бывает бессильным перед различными явлениями стихии. Наибольшую опасность представляют землетрясения, прогноз которых с достаточной точностью остается нерешенной задачей. Ежегодно на Земном шаре землетрясения уносят десятки тысяч человеческих жизней, наносят огромный материальный ущерб, уничтожают культурные ценности. Для изучения землетрясений, разработки и совершенствования методов их прогноза, уменьшения последствий ведущие страны мира производят накопление и анализ данных о происходящих землетрясениях, а также их параметрах: местоположении, магнитуде, времени возникновения. Регистрация сейсмических данных производится с использованием системы приемников сейсмических возмущений, размещенных в пределах некоторого региона. Зарегистрированные данные обрабатываются с целью определения параметров землетрясений, производится их анализ и накопление. Обычно данные о зарегистрированных землетрясениях и их параметрах заносятся в каталоги, публикуемые в специализированных изданиях, а, в последнее время, и в сети Internet, откуда их получают различные пользователи.

Одним из наиболее важных параметров землетрясения является местоположение источника сейсмического возмущения. Для определения местоположения источника сейсмического возмущения используются позиционные методы: угломерный, дальномерный, разностно-дальномерный. Выбор наиболее целесообразного метода проводится исходя из условия обеспечения наиболее высокой точности определения местоположения. Такому выбору, очевидно, должна предшествовать оценка точности определения местоположения для различных методов применительно к рассматриваемой группировке сейсмических

средств. При этом может производиться теоретическая оценка потенциальной точности, а также оценка точности по данным имитационного статистического моделирования. В данной работе предложена методика оценки точности местоопределения путем имитационного статистического моделирования, а также приводятся некоторые полученные практические результаты.

## 2. Обзор литературы

В ряде работ [1,2,3] предложены различные методы (методики) местоопределения сейсмического источника. Очевидными преимуществами при небольшой дальности до источника (одного порядка с расстояниями между пунктами приема) обладает разностно-дальномерный метод местоопределения, применительно к которому и будут определяться точностные характеристики в виде корреляционных матриц ошибок определения координат. Как показывает анализ литературы, в большинстве случаев в сейсмологии при проведении исследований ограничиваются обработкой некоторого количества сейсмограмм для определения точностных характеристик метода. Такой подход не всегда является приемлемым, поскольку оставляет возможность целенаправленного подбора наиболее благоприятных исходов эксперимента. Более целесообразным представляется проведение имитационного статистического моделирования, что и является темой данной статьи.

## 3. Цель статьи

Определение точностных характеристик разностно-дальномерного метода местоопределения сейсмического источника путем проведения имитационного статистического моделирования, а также выработка некоторых рекомендаций по практическому применению разностно-даль-

номерного метода местоопределения.

**4. Методика и полученные результаты.**

Методика оценки ошибок определения местоположения сейсмического источника иллюстрируется рисунком 1. Исходными данными для моделирования являются:

- принятое расположение сейсмических приемников, задаваемое векторами координат

$$X_{сп} = (x_{сп1}, x_{сп2}, \dots, x_{спn})$$

$$Y_{сп} = (y_{сп1}, y_{сп2}, \dots, y_{спn});$$

- координаты источника сейсмических  $X_{ист}, Y_{ист}$  возмущений  $x_c$  и  $y_c$ .

Для заданных исходных данных и принятой модели распространения сейсмической волны определялся вектор истинных значений разностей времен прихода фронта продольной волны  $T=(T_1, T_2, \dots, T_{n_1})$ , где  $n_1$ —число независимых измерений. Далее, в полученные значения вносилась ошибка путем добавления нормально распределенной случайной величины  $\tau$  с заданной дисперсией  $\sigma_\tau$  и нулевым математическим ожиданием. Для полученного вектора наблюдений  $\tilde{T} = (\tilde{T}_1, \tilde{T}_2, \dots, \tilde{T}_{n_1})$ , состоящего из независимых измерений разностей времен прихода фронта сейсмической волны, определялись оценки координат источника  $\tilde{x}_c$  и  $\tilde{y}_c$ , которые вследствие наличия ошибок отличались от истинных  $x_c$  и  $y_c$ . Оценка координат источника  $\tilde{x}_c$  и  $\tilde{y}_c$  производилась путем нахождения минимума функционала

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^{n_1} (T_i(x, y) - \tilde{T}_i)^2.$$

Указанные действия проводились N раз для каждого набора исходных данных. Полученные выборки оценок координат  $\tilde{x}_{cj}$  и  $\tilde{y}_{cj}$ ,  $j=1...N$  обрабатывались с целью получения, оценок корреляционной матрицы ошибок определения координат:

$$\tilde{K} = \begin{pmatrix} \tilde{K}_{xx} & \tilde{K}_{xy} \\ \tilde{K}_{xy} & \tilde{K}_{yy} \end{pmatrix}$$

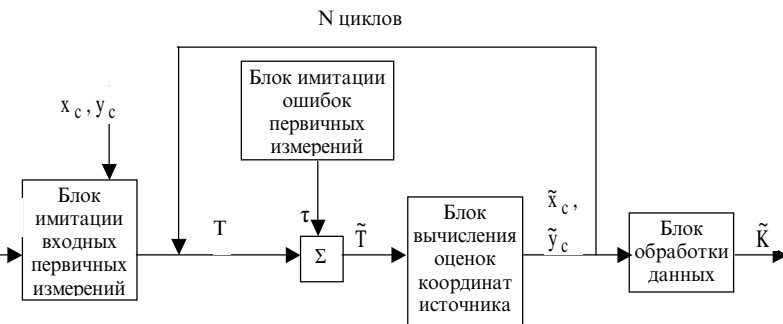
$$\tilde{K}_{xx} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\tilde{x}_{cj} - \tilde{m}_x)^2$$

$$\tilde{K}_{yy} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\tilde{y}_{cj} - \tilde{m}_y)^2$$

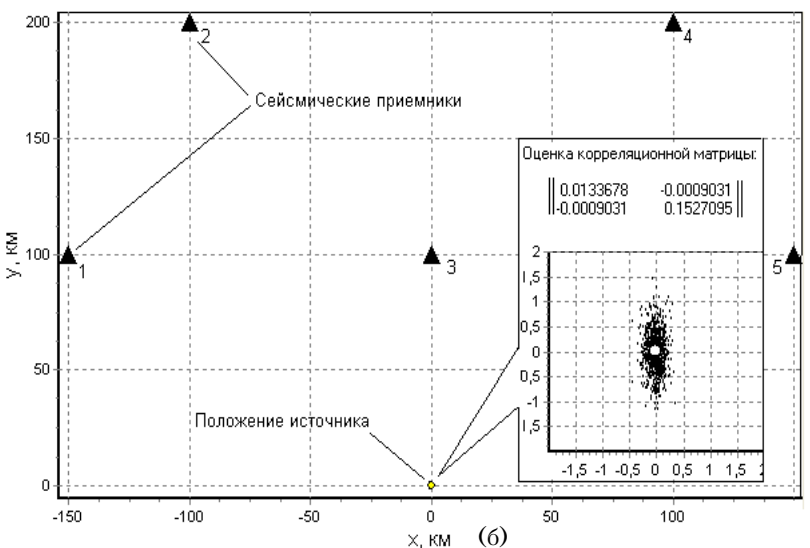
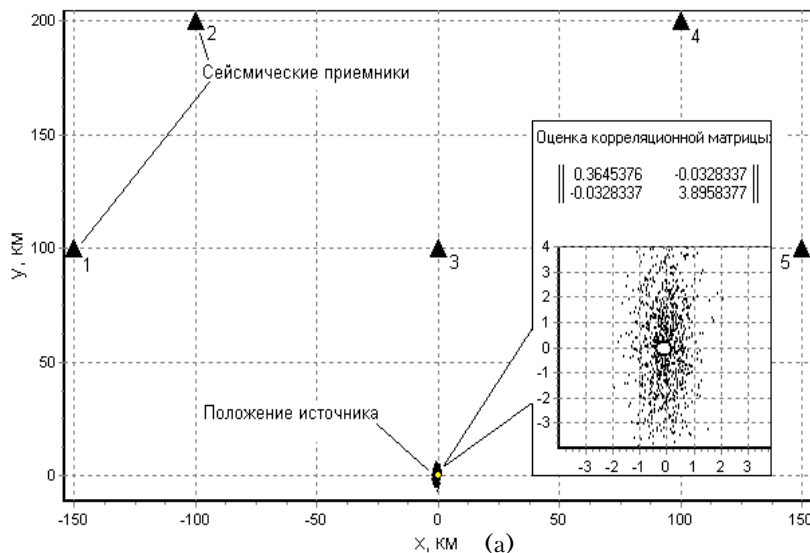
$$\tilde{K}_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\tilde{x}_{cj} - \tilde{m}_x)(\tilde{y}_{cj} - \tilde{m}_y)$$

На рисунках приведены некоторые результаты имитационного статистического модели-

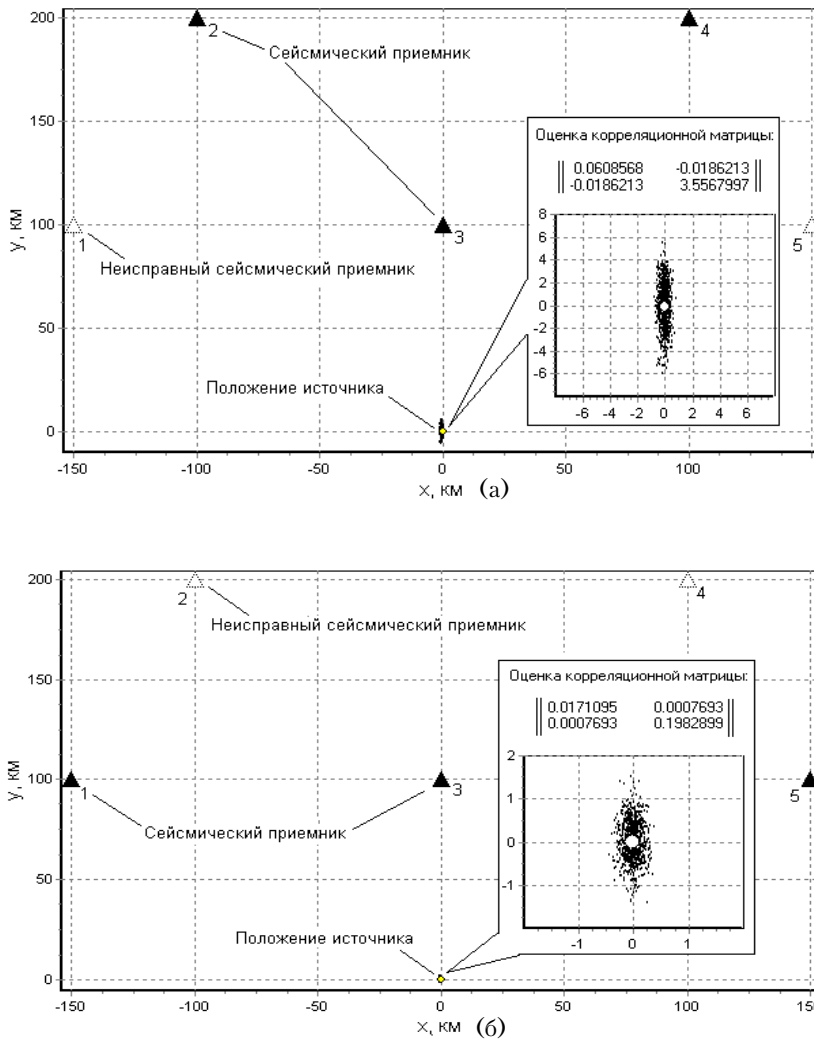
рования применительно к рассматриваемому варианту расположения сейсмических приемников на местности. На рис.2(а, б) показано рассеяние оценок координат источника проведенное для различных значений среднего квадратического отклонения (СКО) ошибки измерения разности времен прихода фронта сейсмической волны. Очевидно, что СКО ошибки определения координат возрастает пропорционально СКО ошибки измеренного па-



**Рисунок 1.** Модель оценки ошибок определения



**Рисунок 2.** Рассеяние оценок координат источника при СКО измерения разности времен прихода фронта сейсмической волны  $\sigma_\tau=0,1$  сек (а) и  $\sigma_\tau=0,02$  сек (б)



**Рисунок 3.** Влияние выхода из строя отдельных сейсмических приемников на точность определения местоположения сейсмического источника при  $\sigma_T=0,02$  сек

раметра. На рис.3(а, б) показаны результаты имитационного статистического моделирования для случаев выхода из строя некоторых сейсмических приемников.

### Выводы

1. Ошибки определения разности времени прихода фронта сейсмической волны оказывают существенное влия-

ние на точность определения координат сейсмического источника разностно-дальномерным методом (прямо пропорциональны). Уменьшение ошибок достигается применением фильтрации, когерентного сложения данных группы сейсмоприемников, поляризационной обработки сейсмических данных.

2. Для рассматриваемого варианта расположения сейсмических приемников определение координат сейсмического явления разностно-дальномерным методом производится с приемлемой в ряде практических приложений точностью. С целью снижения ошибок местоопределения источников предлагается использование комплексирования разностно-дальномерного и угломерного методов, а также наращивание группировки сейсмических приемников.

3. Увеличение расстояния между сейсмическими приемниками способствует снижению ошибок местоопределения. Из анализа результатов моделирования видно, что выход из строя сейсмических приемников, расположенных внутри группировки (рис.3б), вызывает незначительное снижение точности местоопределения; в то же время выход из строя наиболее удаленных сейсмоприемников (рис.3а) приведет к значительному росту ошибок местоопределения. Поэтому наращивание группировки сейсмических приемников необходимо проводить, по возможности, увеличивая расстояние (базу) между сейсмическими приемниками. В то же время, удаление сейсмических приемников от источника приведет к снижению интенсивности регистрируемого сейсмическим приемником сейсмического сигнала, что в свою очередь может привести к возрастанию ошибок измерения разности времен прихода

фронта сейсмической волны. Задача рационального размещения сейсмических приемников является противоречивой и требует проведения имитационного статистического моделирования применительно к конкретному расположению интересующего сейсмического источника, существующей группировке сейсмических приемников и возможностей по наращиванию группировки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пасечник И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. М.: Наука, 1970.
2. Кедров О.К., Башилов П.П. О поляризационном способе выделения объемных волн от удаленных сейсмических источников // Физика земли, №8, 1975.
3. Бармин М.П. и др. Определение координат сильных землетрясений на ЭВМ «Мир-1» в службе срочных донесений // Физика земли, №9, 1976.

Поступила в редколлегию 17.07.03