

УДК 550.34.044

© 1992 г. В.Ю. БУРМИН, НГО ТХИ ЛЫ, Н.В. КОНДОРСКАЯ,  
В.М. АХМЕТЬЕВ

АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИИ СОВРЕМЕННОЙ СЕТИ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ  
СЕВЕРНОГО ВЬЕТНАМА

**Введение.** Основой для детального и всестороннего изучения сейсмичности является совокупность надежных данных о параметрах гипоцентров землетрясений, происшедших в изучаемой гипоцентральной области. Практический опыт и численные расчеты показывают, что точность определения параметров гипоцентров землетрясений в значительной степени зависит от взаимного расположения сейсмических станций и их положения относительно гипоцентральной области.

До 1989 г. на территории Северного Вьетнама работали всего лишь четыре сейсмические станции, находившиеся относительно близко друг от друга, и этих станций явно не хватало для надежной локализации землетрясений. В связи с этим в декабре 1989 г. вьетнамские сейсмологи установили еще три новые сейсмические станции. Однако дополнительные станции не позволили заметно улучшить локализацию гипоцентров землетрясений. В связи с этим авторами настоящей статьи была поставлена задача на основе анализа эффективности сети наблюдений определить на территории Северного Вьетнама положение дополнительных сейсмических станций, которые позволили бы существенно улучшить точность определения параметров гипоцентров. В дальнейшем задачу размещения  $m$  сейсмических станций, при котором ошибки в определении параметров гипоцентров землетрясений принимают минимальные значения среди всех других возможных положений этих станций, будем называть задачей определения оптимального положения сейсмических станций.

Подобные задачи решались различными авторами в работах [1–10], в которых использовались различные подходы к оптимизации сейсмических сетей в Индии, Югославии, Румынии и СССР. Во Вьетнаме такая задача была рассмотрена в работе Нгуен Куи Хи [9]. В результате было рассчитано положение 15 точек на территории Вьетнама, где необходимо построить дополнительные сейсмостанции. Однако практического применения эта работа не имела в связи с тем, что задача решалась в отрыве от сейсмологической практики и не учитывала материальных затрат, связанных с построением такого количества новых станций.

В общем случае задача определения оптимального положения  $m$  дополнительных сейсмических станций при существовании  $n$  станций на изучаемой территории решается численными методами путем минимизации некоторого функционала от так называемой целевой функции, которая характеризует качество системы наблюдений [6, 7]. Цель настоящей работы — показать, что задачу выбора положения дополнительных станций можно решать, основываясь на общих решениях, полученных в работе [7] для неограниченных областей путем сопоставления целевой функции для различных систем наблюдений.

**1. Методика исследования.** Остановимся на основных этапах решения задачи. Они заключаются в следующем.

Линеаризация исходной системы уравнений, связывающих координаты очага землетрясения и координаты регистрирующих станций

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  — номера сейсмических станций;  $X, Y, H$  — координаты гипоцентра землетрясения;  $t_0$  — время в очаге;  $x_i, y_i$  — координаты сейсмических станций;  $t_i$  — время прихода сейсмической волны на  $i$ -ю станцию;  $v_i$  — эффективная скорость волны, численно равная отношению расстояния вдоль прямой, соединяющей гипоцентр и  $i$ -ю станцию, ко времени пробега волны по лучу, приводит к системе линейных уравнений [7].

В общем случае  $v_i$  являются функциями переменных  $X, Y, H, x_i, y_i$ , но в задачах, связанных с выбором оптимального расположения сейсмических станций, среду считаем однородной, т.е.  $v_i = v = \text{const}$ . Это предположение практически не влияет на результаты решения задачи, но существенно упрощает выкладки [7]. В этом случае система (1) путем раскрытия скобок и группирования членов приводится к системе линейных уравнений, которая решается методом наименьших квадратов. Погрешность полного вектора неизвестных параметров системы удовлетворяет неравенству [7]

$$\|\Delta p\| \leq J |\Delta t|.$$

Функция  $J = \|\tilde{K}^+\| \|R v \varphi\|$  называется целевой функцией;  $p = \{X, Y, \eta, t_0\}$  — вектор искомых параметров ( $\eta = -5(X^2 + Y^2 + H^2 - v_i^2 t^2)$ );  $\tilde{K}^+$  — обобщенная обратная матрица системы, равная  $(\tilde{K}^T \tilde{K})^{-1} \tilde{K}^T$ ;  $\varphi_i$  — весовой множитель, характеризует как качество измерений на  $i$ -й станции, так и систематическую ошибку, обусловленную отклонением средней скорости  $v$  пробега волны по лучу от эффективной скорости  $v_i$  сейсмической волны (здесь мы принимаем  $\varphi = 1$ );  $R$  — вектор, компонентами которого являются соответствующие гипоцентральные расстояния;  $|\Delta t|$  — абсолютное значение погрешности в определении времени прихода сейсмических волн на станции. Как упоминалось выше, характер этих погрешностей может быть различный. Целевая функция  $J$  определяет точность параметров гипоцентров землетрясений, т.е. по сути дела характеризует качество системы наблюдений. Величина  $J$  имеет размерность параметров гипоцентров и представляет собой погрешность полного вектора ошибки при  $\Delta t = 1$  с. Задавая различные положения сейсмических станций и вычисляя соответствующие значения функции  $J$ , можно показать, какая система обеспечивает наиболее высокую точность локализации землетрясений. Именно такой подход был применен в данной работе при выборе мест для дополнительных сейсмических станций на территории Северного Вьетнама.

**2. Анализ результатов.** Для решения поставленной задачи указанный подход был применен для площади, ограниченной координатами  $18^\circ$ – $25^\circ$  N,  $101^\circ$ – $108^\circ$  E, для землетрясений с  $M \geq 3$ , т.е. для землетрясений, надежно регистрируемых всеми станциями. Расчет значений целевой функции  $J$  был проведен для четырех разных случаев расположения сейсмических станций для глубин землетрясений, равных 30 км, при неизвестных параметрах  $X, Y, H$  и  $t_0$ .

*А. Современная сеть сейсмических станций Северного Вьетнама.* Распределение изолиний целевой функции для современной сети (семь станций) сейсмических станций показано на рис. 1, а. Из рис. 1, а видно, что изолинии целевой функции имеют достаточно большие значения по отношению к погрешностям, принятым в сейсмологической практике, и распределены неравномерно и несимметрично. Значения целевой функции быстро растут во все стороны, особенно в направлении северо-запад — юго-восток. Вытянутость изолиний ошибок в направлении северо-восток — юго-запад и их сжатие в направлении северо-запад — юго-восток связано с отсутствием сейсмических станций в северных, северо-восточных и юго-западных областях изучаемой территории. Это дает основание полагать, что необходимо добавить новые станции на севере, северо-востоке и на юго-западе изучаемой территории.

*Б. Две сейсмические станции добавлены к современной сети.* На основе анализа результата полученного в разд. А и общего решения задачи об оптимальном располо-

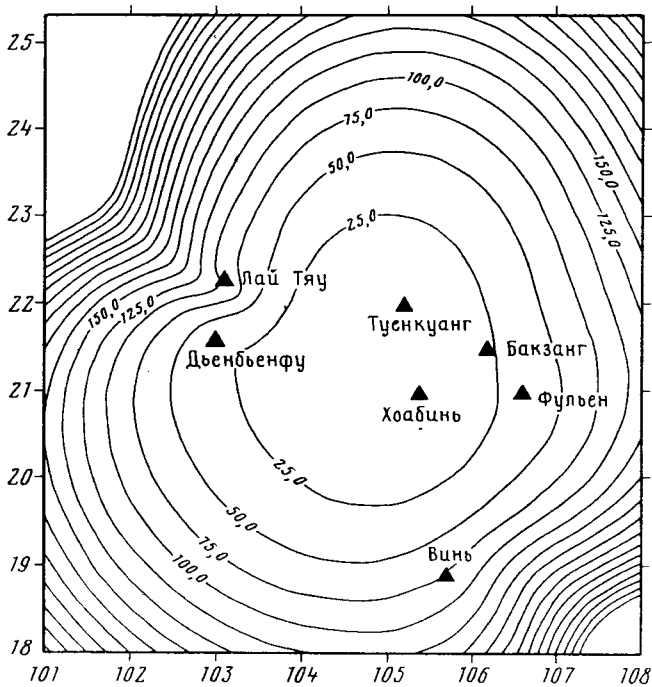


Рис. 1, а. Изолинии значений целевой функции для современной сети сейсмических станций Северного Вьетнама (7 станций). Треугольник – действующие сейсмические станции. Сплошная линия – изолинии значений целевой функции

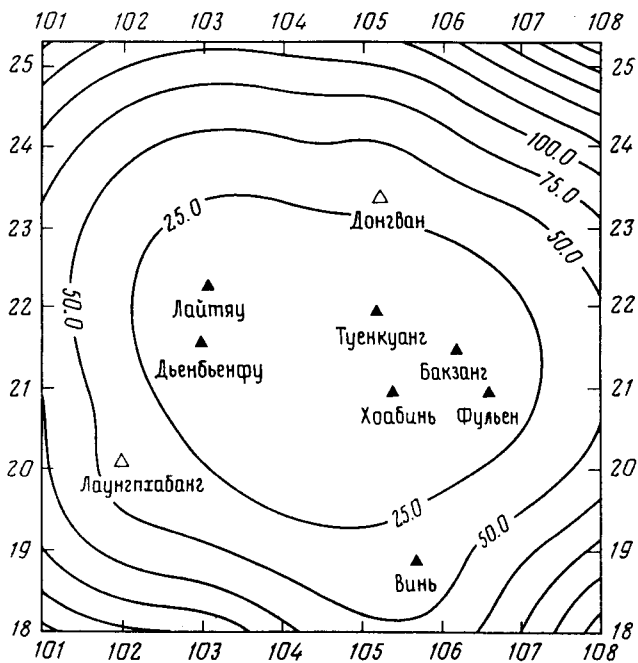


Рис. 1, б. Изолинии значений целевой функции для 9 сейсмических станций. Условные обозначения те же, что на рис. 1, а, треугольник полный – дополнительные сейсмические станции

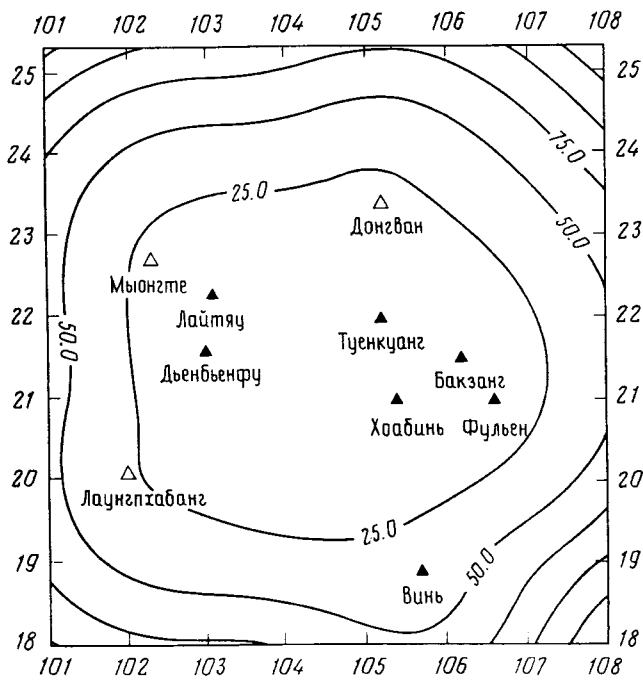


Рис. 1, в. Изолинии значений целевой функции для 10 сейсмических станций. Условные обозначения те же, что на рис. 1, б

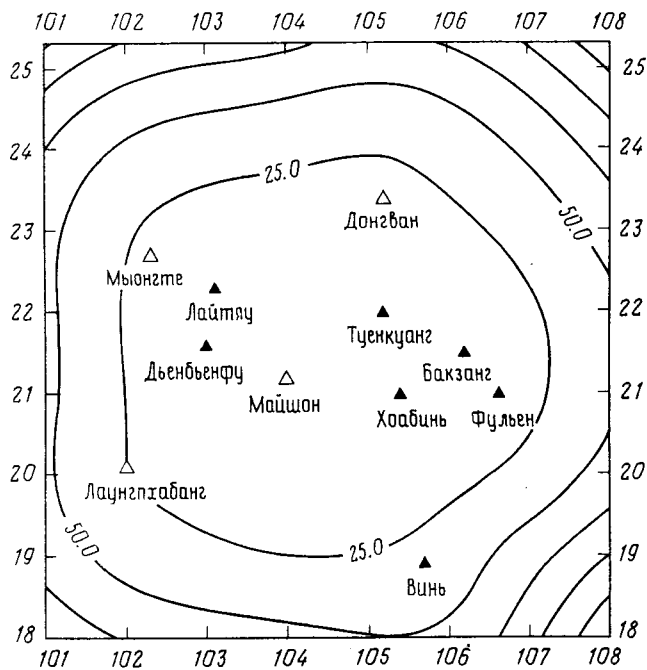


Рис. 1, г. Изолинии значений целевой функции для 11 сейсмических станций. Условные обозначения те же, что на рис. 1, б

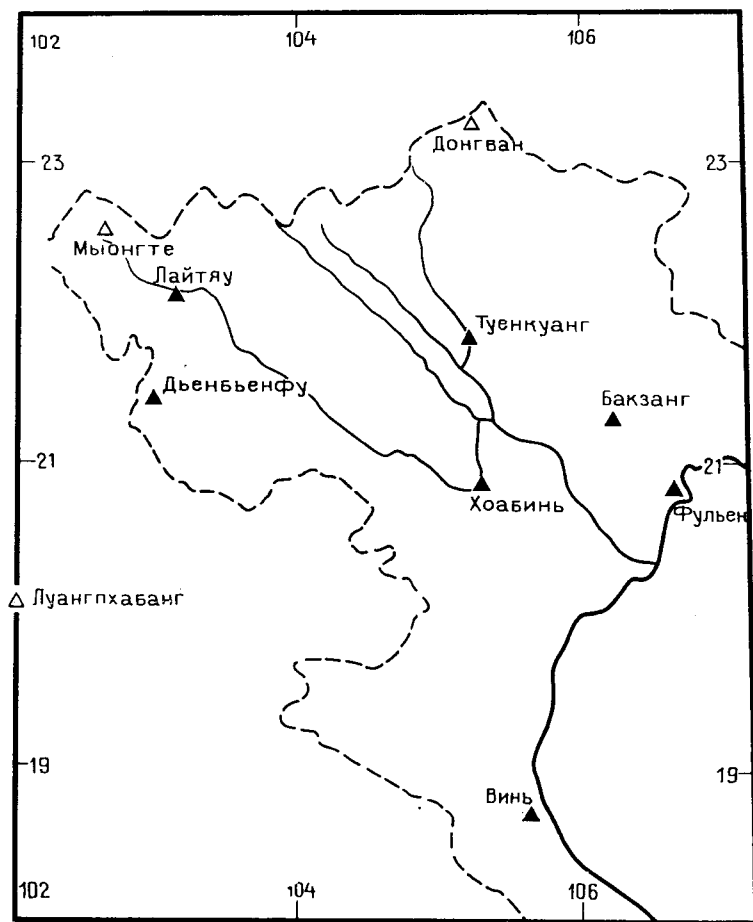


Рис. 2. Схема оптимального расположения сейсмических станций для территории Северного Вьетнама. Условные обозначения те же, что на рис. 1, б, но изолинии значений целевой функции отсутствуют

жени системы наблюдений были добавлены две станции в следующих местах: в Донгване ( $23,20^{\circ}\text{N}$ ,  $105,20^{\circ}\text{E}$ ) и в Луангхабанге ( $20,10^{\circ}\text{N}$ ,  $102,0^{\circ}\text{E}$ ). Следует отметить, что второе место (Луангхабанг) находится на территории Лаоса. Данное место было выбрано в связи с тем, что при определении местоположения дополнительной станции в юго-западной части рассматриваемой области на территории СРВ картина распределения изолиний целевой функции и их значения почти не менялись по сравнению с первым вариантом.

Результаты расчетов показаны на рис. 1, б. Из этого рисунка видно, что изолинии целевой функции имеют более низкие значения и более равномерно и симметрично расположены по сравнению с первым случаем. Это означает, что в данном случае система лучше, чем в первом случае. Однако в северо-восточном углу изучаемой площади значения целевой функции растут еще достаточно быстро.

*В. Три сейсмические станции добавлены к современной сети.* На следующем этапе к современной сети и двум ранее добавленным станциям была добавлена еще одна с координатами:  $22,6^{\circ}\text{N}$  и  $102,3^{\circ}\text{E}$ . Распределение изолиний ошибок показано на рис. 1, в. Как видно, изолинии целевой функции наиболее равномерно и симметрично расположены во всех направлениях со значениями существенно меньшими, чем в двух предыдущих вариантах. В то же время значения целевой функции растут значительно медленнее.

Г. Четыре станции добавлены к современной сети. Еще одна дополнительная станция была добавлена в точку с координатами  $21,20^{\circ}\text{N}$ ,  $104,0^{\circ}\text{E}$  и проведен расчет значений целевой функции. Полученный результат показан на рис. 1, 2. Видно, что картина распределения изолиний целевой функции и их значения почти не изменились по сравнению с предыдущим случаем. Если принимать во внимание затраты на каждую точку наблюдений, то более предпочтительной следует считать систему, состоящую из минимального числа точек. Следовательно, из всех рассмотренных выше систем наблюдений наиболее подходящей является система сейсмических станций, предложенная в предыдущем пункте и состоящая из семи действующих и трех дополнительных станций (см. разд. В).

Таким образом, расчеты и анализ поля значений целевой функции для различных случаев расположения новых сейсмических станций, дополняющих современную сеть наблюдений, позволили получить схему наилучшего их расположения на изучаемой территории (рис. 2).

**3. Выводы.** 1. Был применен новый, нестатистический подход к анализу геометрии сети сейсмических станций, расположенной на территории Северного Вьетнама.

2. Предложена схема оптимального размещения дополнительных сейсмических станций на территории Северного Вьетнама, которая позволяет регистрировать землетрясения с магнитудой  $M \geq 3$  и с большой точностью определять основные параметры их гипоцентров.

#### Список литературы

1. *Iosif T., Iosif S.* Optimization of seismic stations distribution in Romania // Studii si cercetari de geofisica. 1974. V. 12. P. 51.
2. *Kijko A.* Optimal extensions of regional networks of seismic stations // Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. 1975. V. 96. P. 57–119.
3. *Sato J., Skoko D.* Optimum distribution of seismic distribution points, II // Bull. Earthq. Res. Inst. 1965. V. 43. № 3. P. 451–458.
4. *Аранович З.И., Ахалбедашвили А.М., Гоцадзе О.Д. и др.* Методика расчета эффективности сети региональных сейсмических станций на примере Кавказа // Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба. 1977. С. 27–57.
5. *Аранович З.И.* О методе выбора оптимального расположения станций в локальной системе наблюдений // Методика и результаты оценки эффективности систем сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба, 1980. С. 150–157.
6. *Бурмин В.Ю.* Задача планирования эксперимента и обусловленность систем линейных алгебраических уравнений // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1976. № 2. С. 195–200.
7. *Бурмин В.Ю.* Оптимальное расположение сейсмических станций при регистрации близких землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 5. С. 34–42.
8. *Кийко А.* Методы оптимального планирования региональных сетей сейсмических станций // Вычислительные методы в геофизике. М.: Наука, 1981. С. 82–84.

Российская академия наук  
Институт физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта

Поступила в редакцию  
1.04.91

Зав. редакцией *Л.Л. Стороженко*

Технический редактор *Е.А. Красина*

---

Сдано в набор 05.04.92. Подписано к печати 07.05.92. Формат бумаги 70x100 1/16  
Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,4 Усл.кр-отт. 8,7 тыс. Уч.-изд.л. 12,5 Бум.л. 4,0  
Тираж 816 экз. Зак. 2702 Цена 2 р.

---

Адрес редакции: 123242 Москва, Д-242, Б. Грузинская, 10. Тел. 254-93-41  
2-я типография издательства "Наука", 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6