

УДК 550.344

ПЛАНИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

© 2001 г. В. Ю. Бурмин, Нгуен Ван Фонг

Институт физики Земли РАН, Москва, 123810

Поступила в редакцию 27.07.98 г.

Рассмотрена задача численного построения оптимальной региональной сейсмологической сети Юго-Восточной Азии. Проведен анализ геометрии современной сети сейсмических наблюдений Юго-Восточной Азии и сделан вывод о том, что существующая сеть наблюдений не является оптимальной с точки зрения определения координат гипоцентров землетрясений. Задача построения оптимальной сети сейсмологических наблюдений Юго-Восточной Азии решена на основе нестатистического подхода к планированию физического эксперимента. Определена такая конфигурация сети, при которой регистрируются без пропуска землетрясения с $M = 4.0$ и выше, а ошибки в определении параметров гипоцентров при заданном уровне погрешностей во входных данных становятся минимальными.

Основа для детального и всестороннего изучения сейсмичности – совокупность надежных данных о параметрах гипоцентров землетрясений, произошедших в изучаемой области. При этом, для того чтобы эффективно решать многие задачи сейсмологии, такие, как определение скоростного строения по сейсмическим волнам от землетрясений, задачи детального сейсмораионирования, прогноза землетрясений и др., необходимо регистрировать достаточно слабые землетрясения, порядка $M \leq 4.0$.

Точность определения параметров гипоцентров землетрясений в значительной степени зависит от взаимного расположения сейсмических станций и их положения относительно гипоцентральной области, т.е. от геометрии сети [3].

До настоящего времени задача оптимизации сети сейсмологических станций для всей Юго-Восточной Азии никем не решалась. Подобные задачи с использованием иных подходов более или менее успешно решались различными авторами для разных регионов Земли [1, 3, 5–7, 9, 10].

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 [3].

Основные положения. Рассмотрим основные этапы решения задачи. Поскольку главная цель сейсмологической сети на территории Юго-Восточной Азии – регистрация близких землетрясений, то считаем, что при определении координат гипоцентров поверхность земли плоская и, следовательно, исходная система уравнений, связыва-

ющих координаты очага землетрясения и координаты регистрирующих станций, имеет вид

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

где $i = \overline{1, n}$; i – номер станции; n – количество станций; X, Y, H – координаты гипоцентра; t_0 – время возникновения землетрясения (время в очаге); x_i, y_i – координаты сейсмических станций, зарегистрировавших землетрясение; t_i – время прихода сейсмических волн на указанные станции; v_i – эффективные скорости распространения сейсмических волн, численно равные отношению расстояния по прямой от i -й станций до гипоцентра очага землетрясения ко времени пробега сейсмической волны по лучу.

Система (1) с помощью группирования переменных легко сводится к системе линейных уравнений [3]:

$$Xx_i + Yy_i + t_0 v_i^2 t_i - 0.5\eta = f_i, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, n \geq 4$; $f_i = 0.5(x_i^2 + y_i^2 - v_i^2 t_i^2)$.

Глубина H гипоцентра землетрясения определяется из соотношения

$$H^2 = \eta - X^2 - Y^2 + v^2 t_0^2. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) определяют координаты гипоцентра X, Y, H и t_0 при условии, что скорость распространения сейсмических волн постоянна. Чтобы учесть истинное распределение скорости, рассмотрим следующую итерационную процедуру. Пусть заданы v_i . Тогда систему нелинейных уравнений (1) можно преобразовать к виду

$$Xx_i + Yy_i - T_0 t_i v_i^2 - 0.5\xi = f_i, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $\xi = X^2 + Y^2 + H^2$; $f_i = 0.5[x_i^2 + y_i^2 - v_i^2(t_i^2 + t_0^2)]$.

Для решения системы (4) необходимо задать в правой части (4) значение t_0 . Первоначальное значение t_0 можно получить, решая систему (2). Полученное значение t_0 подставим в правую часть формулы (4) и решим систему. Значение t_0 , полученное в результате решения системы (4), опять подставим в правую часть формулы (4) и снова решим систему и т.д. Если итерационный процесс сходится, то рассмотренная процедура дает решение задачи определения координат гипоцентров для неоднородных сред. При этом погрешности искомым параметров будут определяться только свойствами матрицы системы и ошибками исходных данных. Нетрудно заметить, что матрицы систем (2) и (4) различаются только значениями множителей v и v_i .

Запишем системы линейных уравнений, связывающих координаты гипоцентра землетрясения, скорость распространения сейсмических волн и время в очаге, в матричном виде:

$$Kp = f, \quad (5)$$

где $K = \{k_{ij}\}$ – матрица системы, представляющая собой математическую модель изучаемой зависимости; $p^T = \{p_j\} = \{X, Y, T_0, \xi\}$ – вектор-столбец искомым параметров; $f^T = \{f_i\}$ – вектор-столбец наблюдаемых величин; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$; $n \geq m$.

Решение уравнения (5) находится методом наименьших квадратов и дается формулой

$$p = K^+f,$$

где K^+ – обобщенная обратная матрица, равная в данном случае $K^+ = (K^T K)^{-1} K^T$.

Для погрешности полного вектора неизвестных параметров системы справедлива оценка [3]

$$\|\Delta p\| = \left\{ \sum_{i=1}^n |\Delta p_i|^2 \right\}^{1/2} \leq \|\tilde{K}^+\| \|Rv\rho\| |\Delta t|, \quad (6)$$

где $\|Rv\rho\| = \left\{ \sum_{i=1}^n |R_i v_i \rho_i|^2 \right\}^{1/2}$; ρ_i – весовой множитель, характеризует качество измерений на i -й станции; R – вектор, компонентами которого являются соответствующие гипоцентральные расстояния; $|\Delta t|$ – абсолютное значение погрешности в определении времени прихода сейсмических волн на станции. Характер погрешностей может быть различным. Погрешности могут быть как случайные, так и систематические, обусловленные, например, отклонением значения эффективной скорости v_i сейсмической волны, принимаемой при расчетах, от реального значения. Целевая функция $J_0 = \|\tilde{K}^+\| \|Rv\rho\|$ определяет точность параметров гипоцентров землетрясений, т.е. по сути дела

характеризует качество системы наблюдений. Величина J_0 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_0 , можно показать, какая система обеспечивает наиболее высокую точность локализации землетрясений.

Очевидно, что эффективность сети наблюдений зависит не только от числа станций и их взаимного расположения между собой, а также всей сети относительно гипоцентра, но и от силы землетрясения. Достаточно подробно этот вопрос рассмотрен в работах [1, 2].

Если магнитуда землетрясения мала, то удаленные сейсмические станции или станции с малым увеличением не регистрируют его. В результате параметры гипоцентра будут определяться по данным станций не всей сети, а лишь ее части. В связи с этим при вычислении целевой функции необходимо иметь критерий, который позволил бы исключать из расчетов те станции, которые не регистрируют слабые сигналы.

Таким образом, минимальная сила землетрясения, которое регистрируется сейсмической станцией на определенном расстоянии, зависит от увеличения прибора. В свою очередь увеличение прибора зависит от уровня микросейсм (сейсмического шума) в точке регистрации и определяется как отношение амплитуды колебаний микросейсм на сейсмограмме, приведенной к 1 мм видимой записи, к соответствующей амплитуде колебаний почвы (в мм). При планировании сейсмологической сети естественно задать некоторый порог увеличения аппаратуры, меньше которого увеличение считается недопустимым. Следовательно, выбор мест установки станций должен быть таким, чтобы уровень микросейсм в точках наблюдений не превышал бы заданного значения. Если уровень шума в точке регистрации минимальный, то увеличение прибора будет максимальным. Оптимальные условия регистрации будут выполнены, если функция

$$J_1 = \left(\sum_{i=1}^n A_i^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

примет минимальное значение при условии $|A_i| \leq A_0$, где A_0 – порог шума.

В работе [3] показано, что если размеры области планирования существенно превышают размеры области регистрации землетрясений с заданными минимальными магнитудами, то оптимальная сеть представляет собой покрытие области правильными шестиугольниками (так называемая гексагональная решетка). Таким образом, при малых заданных магнитудах землетрясений задача оптимального расположения точек сейсмических наблюдений сводится к покрытию всей области

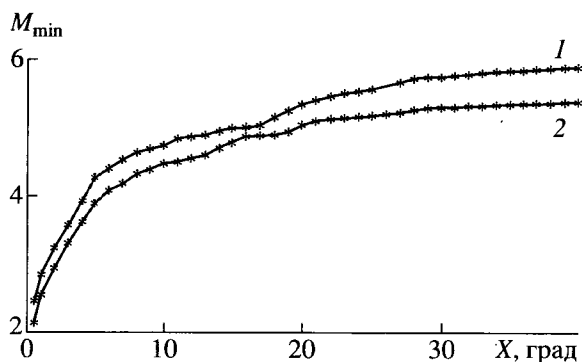


Рис. 1. Кривая зависимости минимальных магнитуд от эпицентральных расстояний для сейсмических станций с увеличением 40 тыс. и 100 тыс. (1, 2 соответственно).

максимальным числом правильных шестиугольников с заданной длиной стороны.

С экономической точки зрения целесообразно выбрать оптимальную систему наблюдений так, чтобы как можно больше точек системы совпало или по крайней мере было близко к существующим точкам наблюдений. В связи с этим будем минимизировать функцию от целочисленного аргумента:

$$J_2 = 1/(m + 1), \quad (8)$$

где m — число пар “совпадающих” точек ($m \geq 0$), т.е. точек наблюдений планируемой и существующей сетей, расстояния между которыми не превосходят некоторую заданную величину $\varepsilon > 0$. Значение ε выбирается в соответствии с масштабом планируемой сети.

В силу значительной изменчивости рельефа земной поверхности, сейсмические станции желательно размещать в наиболее доступных для наблюдений местах, что накладывает ограничения на высоты (глубины) точек наблюдений. В общем случае надо стремиться к тому, чтобы функция

$$J_3 = \left[\sum_{i=1}^n Z_i^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

принимала минимальное значение при условии ограничения высот (глубин) точек наблюдений, т.е.

$$|Z_i| \leq Z_0, \quad (10)$$

где $i = 1, \dots, n$; Z_i — высота (глубина) i -й станции относительно уровня моря; Z_0 — некоторое заданное положительное число.

Таким образом, данная задача сводится к задаче многокритериальной оптимизации (МО), в которой точки оптимальной системы наблюдений минимизируют функционал

$$\Theta = \Theta(J_0, J_1, J_2, J_3). \quad (11)$$

Один из наиболее эффективных методов решения задач подобного рода — метод взвешенных сумм с точечным оцениванием весов [8]. Метод состоит в том, что критериальные функции J_i ($i = 0, 1, 2, 3$) умножаются на строго положительные скалярные величины, называемые весами — ω_i ($i = 0, 1, 2, 3$); $\omega^T = \{\omega_i\}$ — весовые векторы нормализованы так, что сумма компонент каждого вектора равна единице. Затем все взвешенные функции суммируются и задача сводится к минимизации целевого функционала, в которой компоненты весовых векторов играют роль важности каждой отдельной критериальной функции, входящей в функционал Θ .

Функционал Θ в этом случае принимает вид

$$\Theta = \{\omega^T J\} = \omega_0 J_0 + \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3, \quad (12)$$

и задача сводится к минимизации целевого функционала (12) одновременно на множестве весовых векторов. Такой путь решения задачи определения оптимального плана является наиболее строгим, но, к сожалению, пока нет эффективных алгоритмов для ее решения, поэтому для упрощения задачи зафиксируем оптимальную квазиоднородную конфигурацию системы наблюдений, полученную в работе [3], и далее при поиске минимума целевого функционала не будем ее деформировать, но будем перемещать и вращать в необходимых направлениях.

Кроме этого, в ряде случаев для построения функционала Θ не всегда есть необходимая информация и приходится упрощать задачу так, чтобы, с одной стороны, алгоритм минимизации был достаточно эффективен, а с другой — результат был бы близок к оптимальному решению. В данном случае нет данных о распределении интенсивности микросейсм на территории Юго-Восточной Азии, что не позволяет априори учитывать условия регистрации в точках наблюдений, поэтому пока вынуждены не учитывать шумовой фактор и принять, что в каждой точке наблюдения должно быть обеспечено увеличение приборов ~ 100 тыс. Кроме этого, пока нет в цифровом виде данных о распределении высот. В связи с этим положили все $Z_j = 0$ и, следовательно, $J_3 = 0$.

Таким образом, вектор ω примет вид $\omega^T = \{\omega_0, 0, \omega_2, 0\}$, а функционал Θ запишется как

$$\Theta = \omega_0 J_0 + \omega_2 J_2. \quad (13)$$

Прежде чем минимизировать функционал (13), необходимо выбрать длину стороны шестиугольника или радиус соответствующей окружности. На рис. 1 приведены калибровочные кривые для сейсмических станций с увеличением 40 тыс. и 100 тыс., которые построены по номограмме для Дальнего Востока [4], ближайшего к изучаемой области. Для сейсмических станций с увеличением ~ 100 тыс., согласно зависимости минимальных

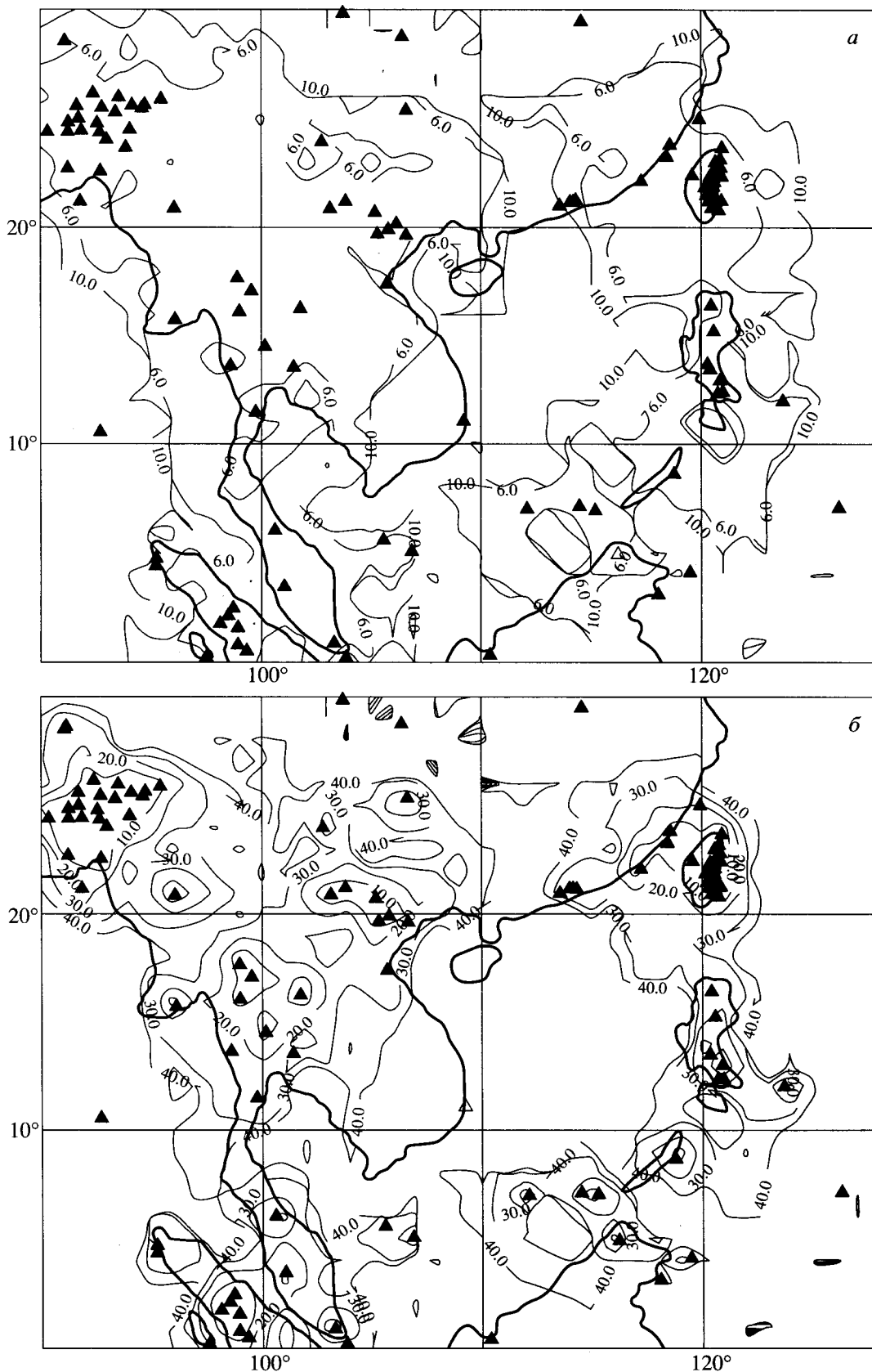


Рис. 2. Распределение ошибок в определении эпицентральных расстояний (а, а'), глубин (б, б') и времени в очаге (в, в') для современной (а-в) и оптимальной (а'-в') сейсмологической сети Юго-Восточной Азии при регистрации землетрясений магнитуды 4.0 и выше.

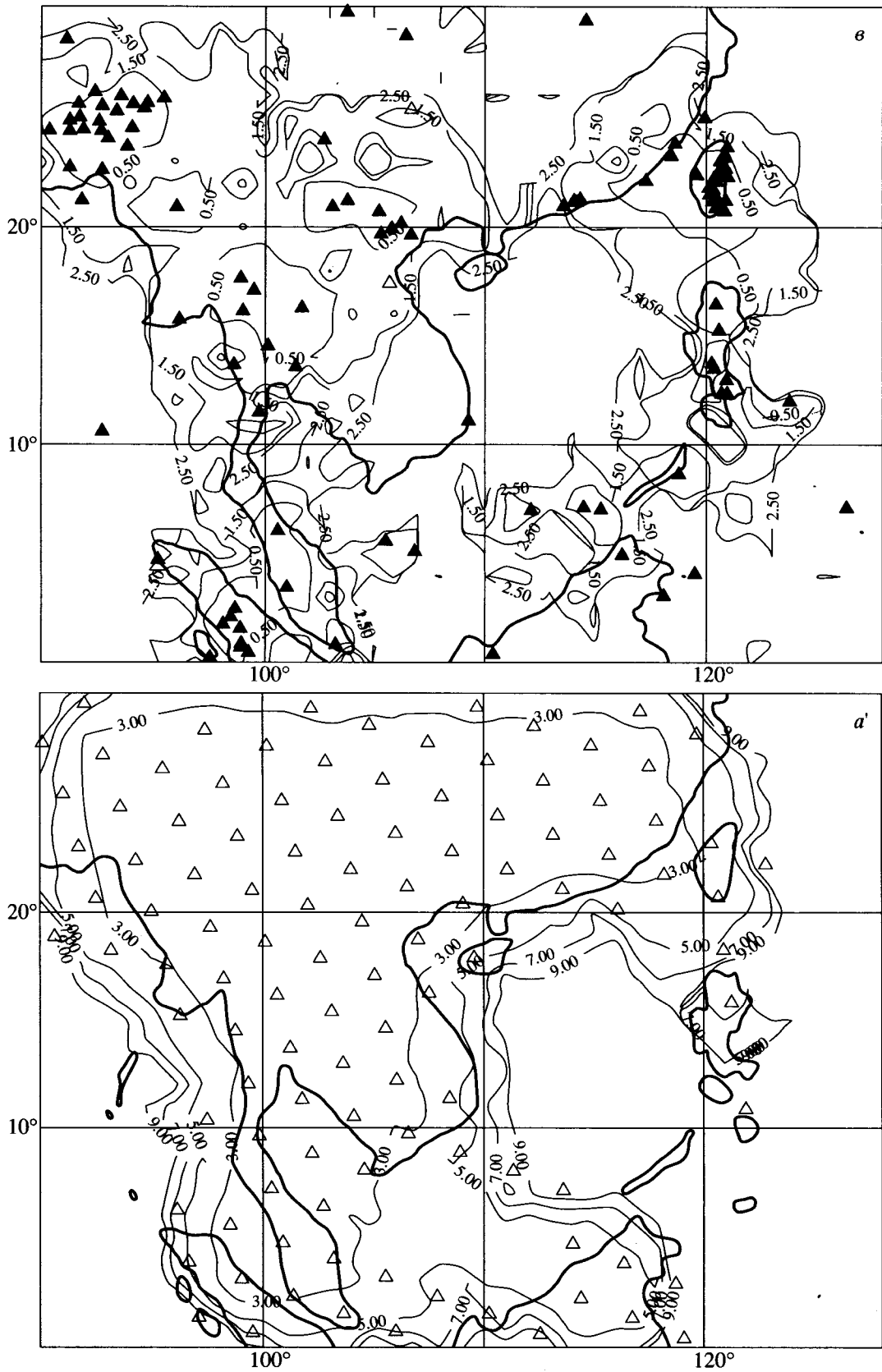


Рис. 2. Продолжение.

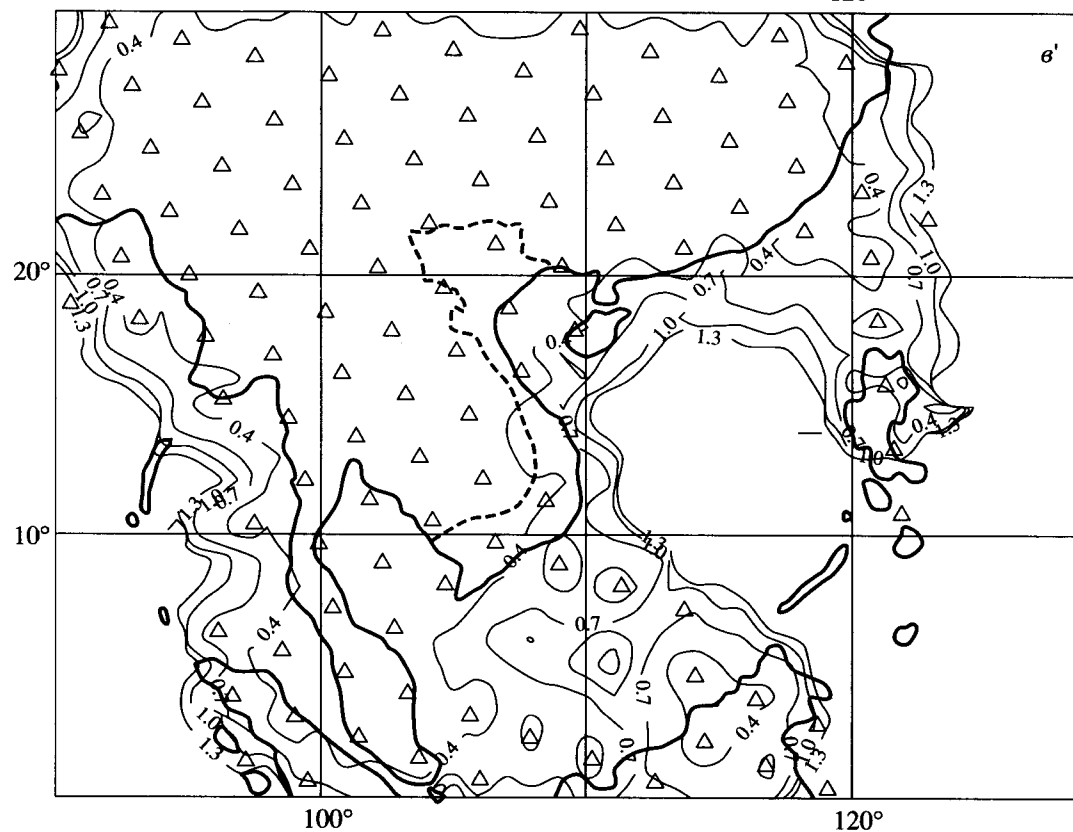
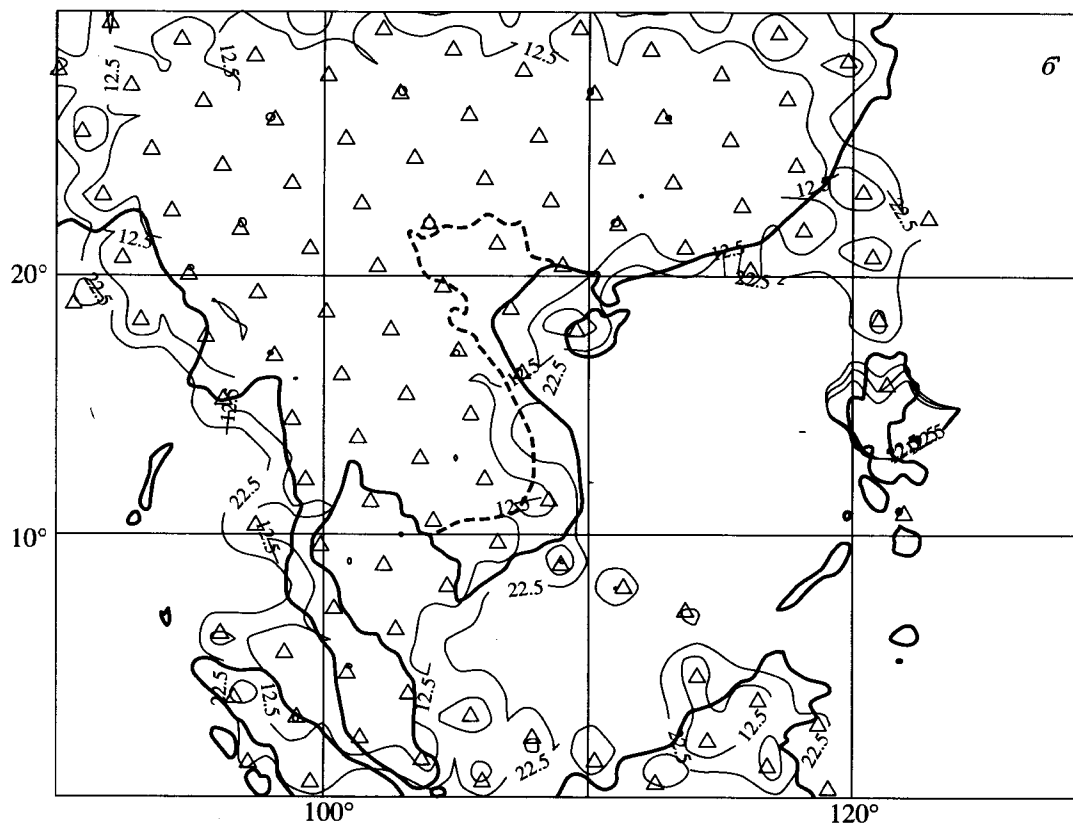


Рис. 2. Окончание.

магнитуд от расстояний, получим, что магнитуда 4.0 соответствует расстоянию 424 км (рис. 1). Можно найти [3], что для этого случая радиус окружности, в которую вписан шестиугольник, равен ~ 278 км.

Для определения минимума функции (13) рассмотрим следующую процедуру. Наложим сеть с оптимальной системой точек наблюдений на сеть существующих станций и будем варьировать положение всей оптимальной сети относительно существующей так, чтобы каждая точка оптимальной сети пробегала все значения в некоторой области Ω на поверхности земли. При каждом фиксированном положении оптимальной сети относительно существующей определяются расстояния d_i , удовлетворяющие условию $d_i \leq \epsilon$, и, следовательно, число m "совпадающих" точек. Поскольку в процессе поиска минимума функции Θ функционал J_0 меняется очень незначительно, то положили $\omega_0 = \omega_2 = 1$, а перебор точек из области Ω осуществляли дискретно с шагом ϵ . Величина ϵ выбрана равной $1/10$ расстояния между ближайшими точками оптимальной сети (~ 30 км).

Результаты расчетов. Территория Юго-Восточной Азии ограничена координатами $\varphi = 0 \dots 30^\circ \text{N}$ и $\lambda = 90 \dots 125^\circ \text{E}$ и включает в себя территорию Вьетнама, Лаоса, Камбоджи, Таиланда, Малайзии, Мьянмы (Бирмы) и часть территории Китая, Индии, Индонезии, Филиппин, Бангладеш и Бутана. На указанной территории расположены 121 сейсмические станции, причем очень неравномерно. Большинство станций лежит в интервале от 20° до 29°N и от 90° до 125°E (см. рис. 2).

Прежде всего для сейсмологической сети Юго-Восточной Азии оценена ее представительность в предположении, что увеличение каждой станции ~ 40 тыс. (к сожалению, нет данных о реальных значениях увеличения приборов на сейсмических станциях в Юго-Восточной Азии). Расчеты показали, что при этом условии современная сеть Юго-Восточной Азии регистрирует без пропусков землетрясения магнитуды 5.5 и выше. На рис. 2а–2в показаны распределения ошибок в определении эпицентрального расстояния, глубины и времени в очаге для землетрясений с магнитудой 5.5 и выше. Максимальные погрешности в определении времен вступления сейсмических волн задавались равными 0.5 с, глубины гипоцентров – 40 км. Из рис. 2а видно, что на большей части территории Юго-Восточной Азии ошибки в определении эпицентров не превышают 10 км и только в южной и северо-восточной частях ошибки резко увеличиваются из-за плохого расположения станций сети в этой эпицентральной области. Ошибки в определении глубины гипоцентров на большей части территории изменяются от 10 до 40 км (рис. 2б). Ошибки в определении времен

возникновения землетрясений лежат в пределах от 0.5 до 2.5 с (рис. 2в).

На рис. 2а'–2в' приведена схема расположения сейсмических станций оптимальной сети. Предполагается, что сейсмические станции планируемой сети имеют увеличение 100 тыс. В этом случае сеть регистрирует без пропусков землетрясения с магнитудой 4.0 и более. Поскольку расчеты проводились для прямоугольной области, приведенной на рисунке, то точки наблюдений оптимальной сети расположены не только на суше, но и в океане. Для расчетов погрешностей в определении гипоцентров и времени в очаге оставлены точки наблюдений, расположенные только на суше.

Погрешности в определении эпицентров, глубины и времени в очаге для оптимальной сети показаны на рис. 2а'–2в'. Видно, что максимальная погрешность в определении эпицентров на территории Юго-Восточной Азии для оптимальной сети в основном не превышает 3 км, глубины – 12.5 км, t_0 – 0.4 с.

Выводы. Полученная оптимальная конфигурация сейсмологической сети для территории Юго-Восточной Азии позволяет при увеличении сейсмических станций 100 тыс. регистрировать без пропусков землетрясения магнитуды 4.0 и определять параметры гипоцентров с минимальными погрешностями. В настоящее время на территории Юго-Восточной Азии нет сейсмических станций с увеличением > 40 тыс. Тем не менее, при расчетах приняли, что увеличение сейсмических станций должно быть не хуже 100 тыс. В противном случае для регистрации землетрясений с магнитудой 4.0 потребуется слишком много точек наблюдений, что нереально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аранович З.И. О методе выбора оптимального расположения станций в локальной системе наблюдений // Методика и результаты оценки эффективности региональных систем сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба, 1980. С. 150–157.
2. Аранович З.И., Ахалбадашвили 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.
3. Бурмин В.Ю. Оптимизация сейсмических сетей и определение координат землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 184 с.
4. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР / Под ред. Кондорской Н.В., Арановича З.И. М.: Наука, 1981. 272 с.
5. Нгуен Куй Хи, Фам Ван Тхук, Фам Лоу Ву и др. Оптимальное дополнение сейсмической сети на территории Вьетнама методом планирования сей-

- смического эксперимента // Результаты исследований Института "Науки о земле" 1977–1978 гг. Сер. Физика Земли. Ханой: Национальный исследовательский Центр наук Вьетнама, 1979. С. 9–31.
6. *Омельченко О.К., Гусяков В.К.* Планирование сети сейсмических станций для службы предупреждения о цунами // Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С. 68–85.
7. *Саваренский Е.Ф., Сафронов В.В., Пешков А.В. и др.* Оптимальное размещение сейсмических станций с позиции минимизации погрешности определения эпицентра // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 8. С. 64–71.
8. *Штойер Р.* Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
9. *Iosif T., Iosif S.* Optimization of seismic stations distribution in Romania // Studii si cercetari de geofisica. 1974. V. 12. P. 51.
10. *Sato J., Skoko D.* Optimum distribution of seismic distribution points. II // Bull. Earthq. Res. Inst. 1965. V. 43. № 3. P. 451–458.

Design of Optimal Regional Seismograph Network for Southeast Asia

V. Yu. Burmin, Nguen Van Fong

Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123810, Russia

Numerical design of the optimal regional seismograph network for Southeast Asia is considered. The geometry of the existing seismic network in Southeast Asia is analyzed to conclude that the network is not optimal for hypocenter location. This problem, the design of the optimal seismograph network for Southeast Asia, is solved using a nonstatistical approach to the design of physical experiments. A network configuration has been found such as to report all events of $M = 4.0$ or larger and to reduce to a minimum the hypocenter location uncertainty at a given data error level.