

ПОСТРОЕНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ КАРТ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО БОЛЬШИМ ПЛОЩАДКАМ ОСРЕДНЕНИЯ

А.А. Дергачев

Алтае-Саянский филиал ГС СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Представлена усовершенствованная методика вычисления величины сейсмической активности по площадкам осреднения произвольного размера. На примере Алтае-Саянской сейсмической зоны показано обоснование размера площадки осреднения 1° с.ш. \times 2° в.д. по сравнению с традиционно используемой площадкой 40×40 км². Для стыковки и сопоставления карт, построенных по площадкам осреднения различных размеров, используется коэффициент коррекции, величина которого может быть вычислена в различных вариантах.

Построена карта сейсмической активности Алтае-Саянского региона, которая охватывает более 90 % территории и генерализованно представляет сейсмическую активность региона по сравнению с традиционно используемой методикой. Это дает возможность более полного сопоставления сейсмичности региона с геологическими и тектоническими структурами области.

Использование больших площадок осреднения и, соответственно, большего числа данных на каждой площадке позволяет строить временные ряды сейсмической активности. Для анализа этих рядов можно использовать методы математической статистики с «выходом» на математические модели сейсмического процесса.

Землетрясение, сейсмическая активность, площадка осреднения, коэффициент корректировки, временной ряд сейсмической активности, Алтае-Саянский регион.

DETAILED SEISMICITY MAPPING OF THE ALTAI-SAYAN ZONE USING LARGE AVERAGING AREAS

A.A. Dergachev

An improved technique is suggested for quantifying seismic activity over averaging areas of an arbitrary size. The example of the Altai-Sayan seismic zone is used to substantiate the choice of a 1° N \times 2° E averaging area instead of the traditional one of 40×40 km². Maps compiled with averaging areas of different sizes can be spliced and correlated using a correction coefficient estimated in different models.

The new seismicity map of the Altai-Sayan area covers more than 90% of the territory and provides a generalized image of activity being advantageous over the classic maps as it allows better correlation of regional seismicity with the tectonic setting.

With larger averaging areas and, correspondingly, a greater amount of data in each area, one can obtain time series of seismic activity to be analyzed using mathematical statistics as a basis for mathematical modeling and simulation of the seismic process.

Earthquake, seismic activity, averaging area, correction coefficient, time series of seismic activity, Altai-Sayan seismic zone

ВВЕДЕНИЕ

Постоянно возрастающее со временем количество сейсмологической информации требует не только вести ее обработку существующими методами, но совершенствование и развитие этих методов.

Результатом анализа новых сейсмологических данных является корректировка карт сейсмического районирования территории Российской Федерации и других стран. При этом меняются как взгляды, так и подходы к районированию. Вместо детерминированных наиболее сильных сотрясений почвы от местных и транзитных землетрясений возможны (вероятны) любые, самые сильные сотрясения во всех точках рассматриваемой территории. Основанием этого постулата могут быть геологические разломы различных порядков, наблюдающиеся на поверхности Земли. Поэтому новые карты сейсмического районирования основаны на вероятности возникновения землетрясений.

Карты сейсмического районирования, являющиеся законом для строителей [СНиП II-7-81*, 2000], предполагают долгосрочный прогноз землетрясений. Однако проблема выработки стратегии среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений постоянно остается актуальной. В настоящее время унифицированный подход к решению этой проблемы пока один: поиск признаков предвестников землетрясений в динамике геофизических полей.

Увеличивающийся ряд данных сейсмологических наблюдений является одним из таких полей. Одному из направлений совершенствования обработки и развитию анализа динамики сейсмического процесса посвящена настоящая статья.

В работе изложена методика построения карт сейсмической активности способом постоянной детальности по большим площадкам осреднения с целью генерализации результатов всей изучаемой территории. Предложен способ определения оптимального размера площадки осреднения по используемым данным, коэффициента коррекции при вычислении значений сейсмической активности для площадок осреднения разных размеров. Приведен пример расчета карты сейсмической активности Алтае-Саянской области.

ТЕОРИЯ

Под сейсмической активностью — A в данной точке понимается среднее число очагов землетрясений в определенном диапазоне энергетической величины, которые возникают в окрестности этой точки в единице пространства — объема или площади (если диапазон глубин обусловлен) — и в единицу времени. Активность отображает определенным образом нормированную и пропущенную через фильтр представительности землетрясений пространственно-временную плотность гипоцентров или эпицентров землетрясений в окрестности любой данной точки или же среднюю в области [Сейсмическое районирование..., 1980; Ризниченко, 1985]. В этих работах достаточно хорошо изложен процесс вычисления величины активности. Будем следовать ему, так как он является основой дальнейшего развития методики построения карт сейсмической активности, рассматриваемой в настоящей статье.

Сейсмическая активность — $A = A_{10}$ представляет число очагов землетрясений в диапазоне энергетических классов — $K = 10 \pm 0.5$ ($M = 3.3 \pm 0.3$), отнесенное к площади 1000 км^2 и времени 1 год. Такой мерой активности пользуются в областях с умеренной сейсмичностью континентального типа, к которым относится большая часть территории России. В областях особенно высокой активности окраинно-континентального типа удобнее пользоваться активностью — $A = A_{15}$, которая относится к диапазону $K = 15 \pm 0.5$, площади — $10^{5.5} \text{ км}^2$ и времени 1 год. Площадь отнесения выбрана с таким расчетом, чтобы при обычной средней величине степенного показателя в законе повторяемости землетрясений $\gamma = 0.5$ численные значения A_{10} и A_{15} совпадали. Это позволяет состыковывать участки карт активности, построенные в единицах A_{10} и A_{15} , без специального пересчета.

Практически величина сейсмической активности определяется путем учета землетрясений не только стандартного класса K : величины, например, $K = 10$ или $K = 15$, но и всей совокупности представительных землетрясений $K_i \geq K_{\min}$, попадающих в рассматриваемую пространственно-временную область. Если для этой области можно построить поклассовый график повторяемости землетрясений $N(K)$, то, как уже говорилось, величина A определяется ординатой кривой (обычно прямой) при $K_i = K_0$, осредняющей все точки графика.

Величину активности можно определить методом суммирования по формуле

$$A_j = \frac{1 - 10^{-\gamma}}{10^{-\gamma(K_{\min} - K_0)}} \frac{SN_{\Sigma}(T_j)}{\Delta ST}, \quad (1)$$

где $N_{\Sigma}(T_j)$ — общее число землетрясений, начиная с класса K_{\min} и выше, которые попадают в данную пространственно-временную область; K_0 — энергетический класс землетрясений, по которому определяется активность A : $K_0 = 10$ для $A = A_{10}$ или $K_0 = 15$ для $A = A_{15}$; S — соответствующая фиксированная «единичная» площадь нормирования; ΔS — площадь осреднения, на которой определено $N_{\Sigma}(T_j)$, км^2 ; T — время наблюдения в годах.

В частных случаях A_{10} и A_{15} имеем соответственно

$$A_{10} = \frac{1 - 10^{-\gamma}}{10^{-\gamma(K_{\min} - 10)}} \frac{1000N_{\Sigma}(T_j)}{\Delta ST}, \quad (1a)$$

$$A_{15} = \frac{1 - 10^{-\gamma}}{10^{-\gamma(K_{\min} - 15)}} \frac{10^{5.5}N_{\Sigma}(T_j)}{\Delta ST}. \quad (16)$$

Если площадка осреднения круговая, то $\Delta S = \pi R^2$, R — радиус, км.

Ранее часто применявшиеся приемы расчета сейсмической активности с отдельным учетом чисел землетрясений, попадающих в каждый из энергетических классов $K = K_i \pm 0.5$, в настоящее время полностью уступили место применению метода суммирования [Сейсмическое районирование..., 1980].

МЕТОДИКА

Главный методический вопрос при изображении пространственного распределения сейсмической активности A — вопрос о точности и детальности картирования этой величины. В основном для построения карт активности используют три способа. Первый — способ суммирования при постоянной точности, в котором фиксируется число N_{Σ} , определяющее погрешность величины активности A — $1/N_{\Sigma}$. Вторым — способ постоянной детальности с $\Delta S = \text{const}$. При этом способе обычно ΔS выбирают равной $0.1 \times 0.1^{\circ}$ — $0.4 \times 0.4^{\circ}$, так, чтобы на нее приходилось не менее трех эпицентров. Третий — способ установленного качества, в котором в зависимости от плотности эпицентров заранее устанавливают подходящее соотношение между точностью (N) и детальностью ($1/\Delta S$).

Точность и детальность делают возрастающими с увеличением плотности эпицентров на карте [Сейсмическое районирование..., 1980].

Изолинии A_{10} принято проводить по системе ... 1, 2, 5, 10, ...

Площадь осреднения ΔS вычисляется по формуле

$$\Delta S = (1000/9)^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \cos \varphi_c, \quad (2)$$

где $(1000/9)^2$ — числовой коэффициент, выражающий длину дуги в 1° по экватору Земли: $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$; $\varphi_1, \varphi_2, \lambda_1, \lambda_2$ — границы участка; φ_c — широта географического центра участка, $\varphi_c = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$.

При маленькой площадке осреднения величина A относится к географическому центру участка. При большой площадке осреднения эпицентры землетрясений располагаются, как правило, неравномерно. Районы наиболее сильных землетрясений принято считать потенциально более активными. Для учета этих обстоятельств при больших площадках осреднения величину A логично относить к центру эпицентрального поля участка с учетом энергии землетрясений. Координаты центра эпицентрального поля φ_{c_0} , λ_{c_0} в этом случае вычисляются по формулам

$$\varphi_{c_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \varphi_i 10^{-\gamma(K_i - K_0)}}{\sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} 10^{-\gamma(K_i - K_0)}}, \quad (3)$$

$$\lambda_{c_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \lambda_i 10^{-\gamma(K_i - K_0)}}{\sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} 10^{-\gamma(K_i - K_0)}},$$

где φ_i, λ_i — координаты землетрясения с энергетическим классом K_i на площади осреднения. Степенной множитель в числителе является весом землетрясения. Знаменатель — число событий, приведенное к числу землетрясений класса K_0 .

Для построения карты активности территория разбивается на целое число участков размером $\Delta \varphi \cdot \Delta \lambda$. Если территория, например, имеет вид четырехугольника, нижняя и верхняя границы которого соответственно φ_S, φ_N , западная и восточная — λ_W, λ_O , то число участков равно $p \cdot q$, где $p = |(\varphi_N - \varphi_S) / \Delta \varphi|$; $q = |(\lambda_O - \lambda_W) / \Delta \lambda|$.

При 25%-м перекрытии соседних участков по диагонали общее число расчетных величин A и, соответственно, $\Delta S, \varphi_{c_0}, \lambda_{c_0}$ равно

$$n = 2pq + 1 - p - q. \quad (4)$$

В настоящее время с внедрением стандартных программ построения карт изолиний отпала необходимость ручных операций. Достаточно правильно сформировать соответствующие таблицы исходных или промежуточных данных и использовать имеющиеся стандартные средства. В данной работе была сформирована таблица данных $\varphi_{c_0}, \lambda_{c_0}, A_{10}$, которая затем была использована в стандартной программе Surfer.

Применение методики построения карт сейсмической активности способом постоянной детальности по большим площадкам осреднения имеет два положительных момента. Первый заключается в том, что величина активности A_{10} определяется по большому числу N_{Σ} . Второй — при очень большом N_{Σ} появляется возможность проследить изменение активности A_{10} во времени.

При построении карт сейсмической активности способом постоянной детальности по большим площадкам осреднения, как представляется, имеются две проблемы. Первая — состыковка, сопоставление карт, построенных по площадкам осреднения разных размеров. Вторая — выбор оптимального размера площадки осреднения.

Если бы эпицентры землетрясений были распределены по области, для которой строится карта активности, более-менее равномерно, первой проблемы не существовало. Но поскольку эпицентры расположены неравномерно, значения A наиболее активных участков будут «размазываться» по большим площадкам осреднения, в результате карты будет трудно сопоставлять друг с другом.

Обычно размер площадки осреднения ΔS выбирают $\sim 40 \pm 40$ км². Так как большинство карт построено по таким площадкам осреднения, используем в качестве опорных этот размер площадки осреднения и число землетрясений на таких площадках, расположенных в наиболее активных районах рассматриваемой области. Центры опорных площадок должны совпадать с центрами эпицентральных полей, координаты которых вычисляются по формулам (3). Таким образом, для каждого размера площадки осреднения будет своя фиксированная «единичная» площадь нормирования, S .

Для вышеизложенных условий техника вычислений S будет следующей. Выбираются наиболее активные площадки осреднения ΔS . Относительно центра эпицентрального поля φ_{c_0} , λ_{c_0} каждой из выбранных площадок определяются координаты опорных площадок

$$\varphi_S = \varphi_{c_0} - 0.2; \quad \varphi_N = \varphi_{c_0} + 0.2; \quad \lambda_W = \lambda_{c_0} - 0.3; \quad \lambda_O = \lambda_{c_0} + 0.3. \quad (5)$$

На широтах Алтае-Саянской области размер опорной площадки будет составлять $\sim 44 \pm 42$ км². Для опорной площадки вычисляются число землетрясений N_0 , начиная от энергетического класса K_i и выше, и площадь

$$\Delta S_0 = (1000/9)^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \cos \varphi_c. \quad (6)$$

Соотношение между большой площадкой осреднения и опорной площадкой равно $\Delta S / \Delta S_0$. Такое же соотношение должно было бы быть при равномерной плотности эпицентров и между N_{Σ} и N_0 . Однако в действительности оно меньше в несколько

$$P = \frac{\Delta S N_{\Sigma}}{\Delta S_0 N_0} \quad (7)$$

раз. Коэффициент P будет поправочным к фиксированной «единичной» площади нормирования, новый размер которой при использовании формулы (1а) будет равен $1000P$ км².

Далее необходимо решить, какой из коэффициентов P , вычисленных для разных наиболее активных площадок осреднения, выбрать, или использовать осредненное значение P . При выборе наиболее активных площадок для оценки P принято соображение, что статистически они более реально отображают сейсмическую обстановку в изучаемой области, чем площадки с малым числом землетрясений. Для последних можно ожидать случаи, когда $\frac{N_{\Sigma}}{N_0} = 1$, тогда $P = \frac{\Delta S}{\Delta S_0}$ и рассматриваемая задача не будет иметь

смысла. Значения P наиболее активных площадок также могут иметь большие различия из-за неравномерности расположения эпицентров землетрясений. Поэтому в качестве первого варианта используется осредненное значение P , полученное для наиболее активных площадок, имеющих, например, приблизительно одинаковое число (порядок) землетрясений N_{Σ} . Дальнейшие коррективы внесет практика.

Решение второй проблемы, как представляется, зависит от условия, какое минимальное число землетрясений будет выбрано или зафиксировано на площадках осреднения ΔS . Обычно, как указывалось выше, рекомендуется число 3. Для областей с перепадом количества эпицентров на несколько порядков, с единичными очагами землетрясений в окраинных районах такой критерий вряд ли подходит. Вероятно, «золотой» серединой при изменении размера площадки осреднения ΔS от больших размеров в сторону меньших является момент, когда генерализованная карта активности начинает распадаться на большое число отдельных элементов, оконтуриваемых изолиниями, которые отражают эпицентральные области единичных землетрясений.

Уловить момент и оценить степень распада карты активности на эпицентральные области можно с помощью графиков, один из которых показан на рис. 1. На каждой из $\Sigma n_{\Delta S}$ площадок осреднения, которые

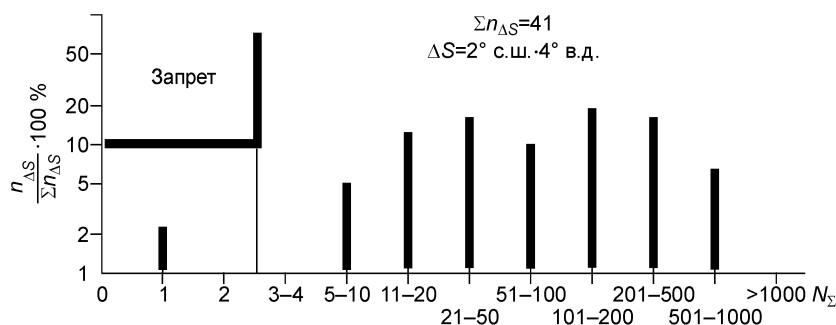


Рис. 1. Распределение площадок осреднения $n_{\Delta S}$ в процентах в зависимости от числа попавших на них эпицентров землетрясений N_{Σ} при построении карты сейсмической активности (на примере Алтае-Саянского региона за период 1963—2001 гг.; размер площадки осреднения 2° с.ш. \times 4° в.д.).

используются при построении карты сейсмической активности, подсчитывается число попавших на нее землетрясений N_{Σ} ; считается число площадок для единичных значений или диапазона значений N_{Σ} , указанных по оси абсцисс (см. рис. 1); затем строится график. Представляют интерес малые значения N_{Σ} , поэтому выбран подобный горизонтальный масштаб. Распределение числа площадок $n_{\Delta S}$ будет зависеть от размера площадки ΔS . Чем меньше он будет, тем больше появится площадок с малыми значениями N_{Σ} . Исходя из этого, можно задать пороговое значение числа площадок, например, 10 % от общего количества площадок, на каждую из которых приходится менее трех землетрясений. Пороговое значение будет достигнуто при некотором значении размера площадки осреднения ΔS , который для рассматриваемой области и имеющихся исходных данных можно считать оптимальным. Уменьшение размера ΔS повлечет за собой появление точек графика (см. рис. 1) в условной зоне запрета. Изложенный способ позволяет не только оценить оптимальный размер площадки осреднения ΔS , но и на количественном уровне сравнить карты активности, построенные по площадкам осреднения разных размеров, по степени их генерализации.

При вычислении сейсмической активности необходимо использовать представительно зарегистрированные землетрясения. При этом понятно, что чем больше используется землетрясений, тем более надежно определяется величина A . Экспертную оценку представительности можно сделать, используя график повторяемости землетрясений (рис. 2). Осредняющая прямая имеет вид

$$\lg N = c + \gamma K, \quad (8)$$

где γ — степенной показатель повторяемости землетрясений. Начиная с некоторого значения K , экспериментальные точки графика повторяемости в левой части отклоняются от осредняющей прямой. Первое целое значение K вблизи прямой можно принять за наименьший энергетический класс представительно зарегистрированных землетрясений. На рис. 2 $K = 7.6$. С этого значения K можно считать число землетрясений на площадках осреднения при вычислении сейсмической активности.

Для территории с заведомо различной плотностью сейсмических событий и неравномерно расположенными станциями наблюдения представительно землетрясения на различных площадках осреднения будут начинаться с разных K . При вычислении сейсмической активности по формуле (1) не имеет значения

представительный уровень K . Важно, чтобы общее число землетрясений, начиная с класса K и выше, было достаточным. Поэтому на различных площадках осреднения можно использовать различные по уровню K представительно землетрясения. Степенной показатель $\gamma(K_{\min} - K_0)$ в знаменателе формулы (1) «автоматически» учтет различный подсчет $N_{\Sigma}(T_j)$.

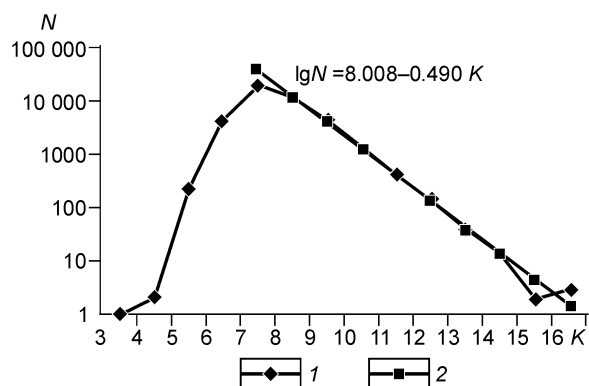


Рис. 2. График повторяемости землетрясений для Алтае-Саянского региона за период 1963—2001 гг. 1 — данные из регионального каталога; 2 — осредняющая прямая (МНК).

По крайней мере имеется два пути учета представительно зарегистрированных землетрясений. Первый: для каждой площадки осреднения строится график повторяемости землетрясений; используются округленные до целых чисел значения K . На линейном участке методом наименьших квадратов вычисляются коэффициенты c и γ формулы (8). Прямая наносится на график экспериментальных данных. Первое наименьшее значение K_p , после которого в сторону еще меньших значений экспериментальные данные начинают отклоняться вниз от прямой, принимается за K_{\min} в формуле (1). От него в сторону больших значений K подсчитывается общее число землетрясений N . Вероятно, в этом случае будет более разумным использовать вычисленное значение γ .

Второй путь: аппроксимировать экспериментальные точки графиков повторяемости на всех площадках осреднения прямой (8) с $\gamma = 0.5$ (средняя величина для всех землетрясений на Земле). Последующие операции такие же, как и в первом пути.

Вариантами первого и второго путей может быть использование после аппроксимации нецелого значения K_{\min} . В этом случае по формуле (8) вычисляются соответствующие значения N (через один класс K), суммируются и подставляются с выбранными K_{\min} в формулу (1).

ПРАКТИКА

Построение карт сейсмической активности по изложенной выше методике проводилось для Алтае-Саянской сейсмической зоны. Границы территории, для которой имеются данные наблюдений: 46° — 56° с.ш., 80° — 100° в.д. Период наблюдений 1963—2003 гг. Представительными за весь период наблюдений являются данные о землетрясениях с $K \geq 8$ [Дергачев, Данциг, 1989]. С этого класса брались в расчет все землетрясения.

В начале была проанализирована имеющаяся карта активности A_{10} [Жалковский и др., 1995], построенная по площадкам осреднения 40×40 км². Для удобства повторения была выбрана площадка размером 0.4° по широте, 0.6° по долготе, что на широтах Алтае-Саянской зоны составляет $\sim 44 \times 42$ км². Перекрытие площадок было выбрано по диагонали на 0.2° по широте и 0.3° по долготе, что определило число площадок, равным 1593. На каждой площадке считалось число попавших на нее эпицентров землетрясений, затем строился график, подобный графику на рис. 1. Он представлен на рис. 3, а. График показывает, что от общего числа площадок на 37 % эпицентров землетрясений нет, на 27 % есть один-два эпицентра. По сути, карта активности при таких размерах площадки осреднения является для преобладающей части территории картой эпицентров землетрясений, изображенной изолиниями сейсмической активности. Статистическая активность A_{10} существует только для части (около 35 %) Алтае-Саянской зоны. Оценки активности этой части территории могут служить «репером» при переходе к расчетам A_{10} по площадкам осреднения других размеров. Для оценки распределения сейсмической активности всей Алтае-Саянской зоны необходимо использовать площадки осреднения больших размеров.

Следующей была выбрана площадка осреднения размером 1° по широте, 2° по долготе или $\sim 110 \times 140$ км². Число площадок с тройным перекрытием: на 0.5° по широте, на 1° по долготе и по диагонали на 0.5° по широте и на 1° по долготе составило 361. Такое перекрытие было выбрано исходя из сильной

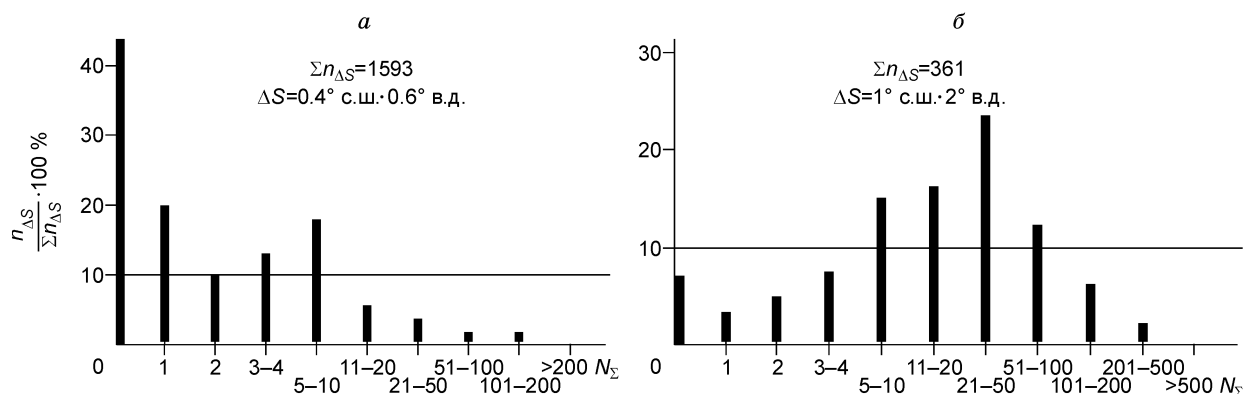


Рис. 3. Распределение числа площадок осреднения $n_{\Delta S}$ в процентах в зависимости от числа попавших на них эпицентров землетрясений N_{Σ} при построении карты сейсмической активности Алтае-Саянской зоны.

Размеры площадок осреднения: а — 0.4° с.ш. \times 0.6° в.д.; б — 1° с.ш. \times 2° в.д. Данные за период 1963—2001 гг.

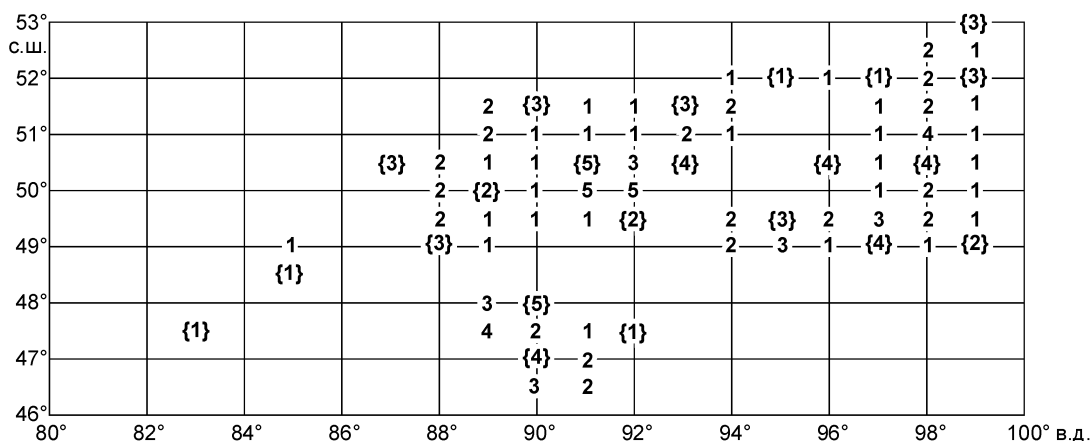


Рис. 4. Карта-схема Алтае-Саянской сейсмической зоны с нанесенными на нее значениями корректировочного коэффициента P при построении карты сейсмической активности по площадкам осреднения размером 1° с.ш. \times 2° в.д.

Значения P помещены в центры площадок. Число землетрясений с $K \geq 9$ на площадках осреднения ≥ 50 . Перекрытие площадок тройное (см. текст). Скобками выделены площадки осреднения, значения P которых рассматривались при определении среднего P .

неравномерности распределения и малой плотности эпицентров землетрясений. Кроме того, оно способствовало более уверенному определению поправочного коэффициента P при использовании площадок осреднения большого размера. График распределения площадок в зависимости от попавших на них эпицентров землетрясений представлен на рис. 3, б. Из него видно, что число площадок с малым числом землетрясений по сравнению с предыдущим распределением на рис. 3, а для площадок размером 0.4° широты \times 0.6° долготы сократилось с 64 до 16 %, и его можно считать приемлемым для выбранного порога 10 %. Таким образом, размер площадки осреднения 1° широты \times 2° долготы обеспечивает статистически значимые оценки сейсмической активности для преобладающей части территории Алтае-Саянской области при использовании представительных землетрясений с $K \geq 9$.

Далее решалась практическая задача оценки поправочного коэффициента P при переходе к большему размеру площадки осреднения по сравнению с опорной (0.4° широты \times 0.6° долготы). Были отобраны площадки с числом землетрясений ≥ 50 . Для каждой из них по формулам (3), (5)—(7) вычислен коэффициент P . Распределение значений P , округленных до целых чисел (значение P меньше единицы принималось за 1), показано в табл. 1.

Из 361 площадки наиболее активными являются 79. Производить оценку среднего значения P по всем площадкам было некорректной операцией, так как площадки перекрываются. Поэтому было рассмотрено взаимное расположение отобранных площадок. Оно представлено на рис. 4. Округленное до целого числа значение P находится в центре площадки осреднения. Для оценки среднего коэффициента P было намечено 22 площадки. Принципы отбора площадок осреднения на данном этапе: 1) площадки с наибольшим значением P ; 2) неперекрытие площадок; 3) использование всех отобранных площадок осреднения. Отмеченные фигурными скобками (см. рис. 4) 22 площадки являются одним из вариантов, отвечающих этим принципам. Критерием оптимального варианта может быть максимальная сумма значений P намеченных площадок. Вычисленные значения P этих площадок приведены в табл. 2. Из-за неудачного расположения площадок осреднения относительно эпицентров землетрясений значения P на трех площадках оказались меньше единицы. Расчеты средней величины поправочного коэффициента P по всем площадкам табл. 2 и без площадок с $P \leq 1$ дали значения соответственно 2.64 и 3.14. Отдавая приоритет

Таблица 1. Распределение значений коэффициента P для площадок осреднения с числом эпицентров землетрясений ≥ 50

P	1	2	3	4	5	
n	34	22	12	7	4	$\Sigma n = 79$

Таблица 2. Отобранные величины коэффициента P для оценки его среднего значения

P	1	2	3	4	5	
n	5	3	7	5	2	$\Sigma n = 22$

наиболее активным площадкам, средняя величина P была принята равной 3. Как видим, для определения необходимого размера площадки осреднения и корректирующего множителя P , чтобы получить характеристики преобладающей части рассматриваемой территории, потребовалось сделать ряд вычислений, построений, внимательного анализа ситуаций в процессе решения задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выбор размера площадки осреднения для построения карты активности Алтае-Саянской сейсмической зоны был сделан после рассмотрения результатов расчетов по ряду площадок с размерами $1^\circ \times 2^\circ$, $1.2^\circ \times 2.4^\circ$, $1.4^\circ \times 2.8^\circ$, $1.6^\circ \times 3.2^\circ$, $2^\circ \times 4^\circ$ соответственно по широте и долготе. С увеличением размеров площадок, во-первых, уменьшается детальность и, во-вторых, начинает сильно сказываться неравномерность расположения эпицентров землетрясений в районах с их небольшим количеством — данные об активности начинают стягиваться к наиболее активным участкам.

После предваряющего анализа была выбрана площадка осреднения размерами 1° по широте и 2° по долготе. При тройном перекрытии по широте, долготе, диагонали число площадок осреднения составило 361. Для каждой площадки вычислялись значения A_{10} и соответствующие ей координаты φ_{c_0} , λ_{c_0} . Полученные данные оформлялись в виде таблицы (Excel) и затем по программе Surfer строилась карта сейсмической активности.

Полученная карта активности показана на рис. 5. Средний разброс в положении изолиний составляет ± 25 км. Карта представляет генерализованный вариант карты на рис. 6 [Жалковский и др., 1995] с

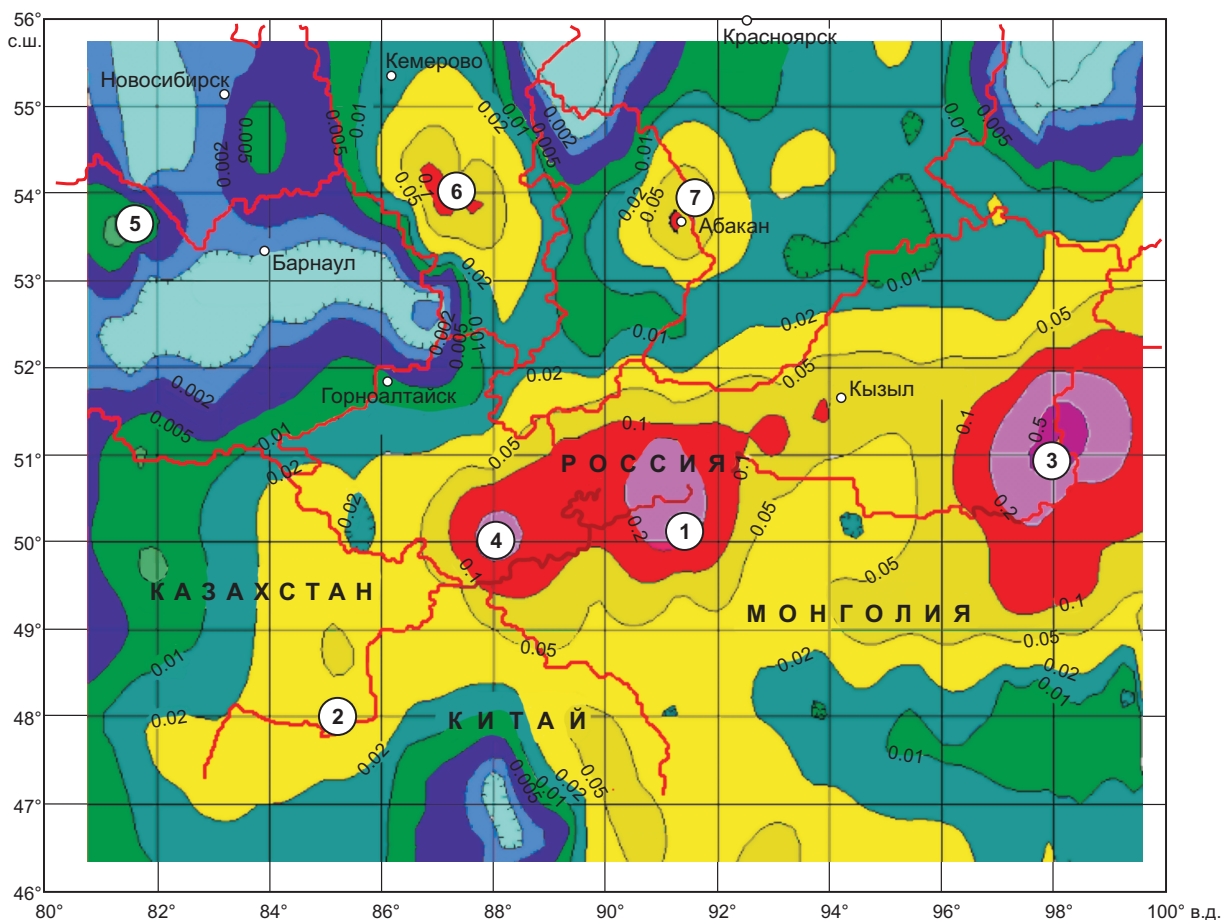


Рис. 5. Карта сейсмической активности Алтае-Саянской области по большим площадкам осреднения за период 1963—2003 гг.

Уровень активности обозначен цифрами в изолиниях и соответствующим цветом. Цифрами обозначены места сильнейших землетрясений: 1 — в районе оз. Урэг-Нур (Монголия, 1970) — $M = 7$; 2 — в районе оз. Зайсан (Казахстан, 1990) — $M = 6.9$; 3 — в районе оз. Хубсугул (Монголия, 1991) — $M = 6.5$; 4 — на Алтае (Республика Алтай, РФ) — $M = 7.3$.

Зоны сейсмической активизации: 5 — район г. Камень-на-Оби; 6 — район г. Новокузнецк; 7 — район г. Абакан.

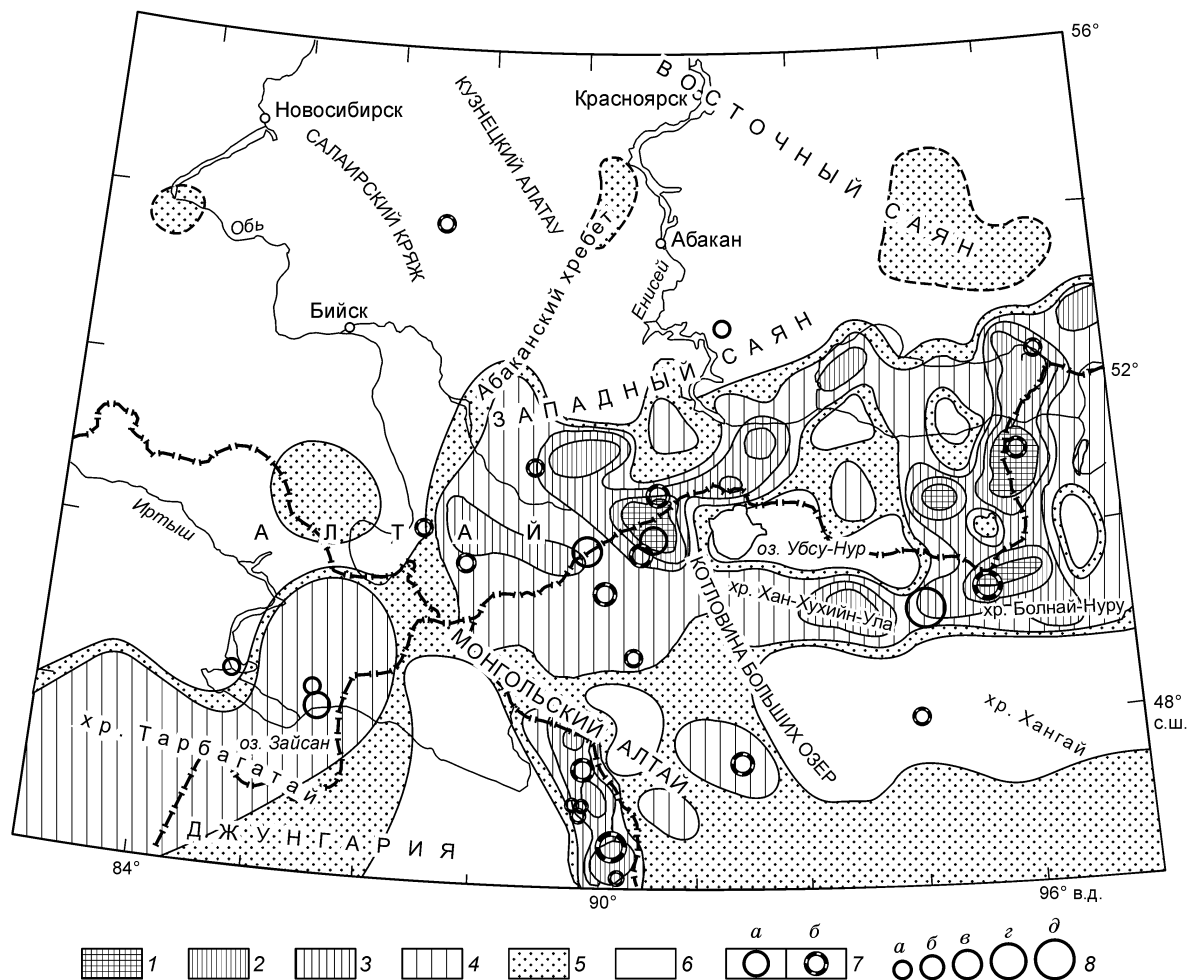


Рис. 6. Карта сейсмической активности A_{10} и эпицентров сильных ($M \geq 6$) землетрясений Алтае-Саянской области [Жалковский и др., 1995] по площадкам осреднения $40 \times 40 \text{ км}^2$.

1 — $A_{10} \geq 0.2$; 2 — $0.2 > A_{10} \geq 0.1$; 3 — $0.1 > A_{10} \geq 0.05$; 4 — $0.05 > A_{10} \geq 0.02$; 5 — $0.02 > A_{10} \geq 0.01$; 6 — $A_{10} < 0.01$; 7: а — эпицентры землетрясений по инструментальным и макросейсмическим данным за период до 1963 г., б — по инструментальным и макросейсмическим данным за 1963—1991 гг.; 8 — магнитуда землетрясений: а — $6.0 \leq M < 6.5$; б — $6.5 \leq M < 7.0$; в — $6.0 \leq M < 7.5$; г — $7.5 \leq M < 8.0$; д — $M \geq 8.0$.

сохранением того же уровня активности в наиболее активных местах. Детальность в этих местах уменьшилась, но для всей Алтае-Саянской области исчезла фрагментарность карты, она приобрела обобщенный вид, удобный для использования.

В 90-х годах XX века в Алтае-Саянском регионе в три раза возросло число сейсмических станций. Это позволило представителью регистрировать сейсмические события с энергетического класса $K = 8$. С этого уровня были использованы землетрясения при построении карты на рис. 5. Всего в каталоге за период 1963—2003 гг. имеются данные более 50 тыс. сейсмических событий, включая Чуйское землетрясение на Алтае и его афтершоки 2003 г. В региональный каталог, начиная с 1997 г., представлялись все сейсмические события, в том числе промышленные взрывы. При использовании данных каталога они фильтровались. Но исключить их попадание во множество отобранного материала гарантировать нельзя.

ОБСУЖДЕНИЕ

В средней части рис. 5, примерно по линии государственных границ Казахстана, Китая, Монголии, России выделяется зона высокой сейсмической активности. Она приурочена к наиболее сильным землетрясениям, наблюдавшимся в регионе. В этой зоне за время непрерывных инструментальных сейсмических наблюдений в Алтае-Саянском регионе с 1963 г. произошли четыре сильнейшие землетрясения: в 1970 г. в районе оз. Урэг-Нур (Монголия) — $M = 7$; в 1990 г. в районе оз. Зайсан (Казахстан) — $M = 6.9$; в

1991 г. в районе оз. Хубсугул (Монголия) — $M = 6.5$; в 2003 г. на Алтае (Республика Алтай, РФ) — $M = 7.3$.

Все произошедшие сильнейшие землетрясения соизмеримы по энергетическому классу. Но сопровождались различным количеством афтершоков. Отсюда различная величина сейсмической активности в районе этих землетрясений.

Имеет ли место какая-то закономерность — вопрос. Но фактически наблюдаем: в регионе по мере возникновения сильнейших землетрясений с запада на восток наблюдается увеличение числа их афтершоков. Несомненно, это отражает динамику геологических объектов региона во времени.

Сравнение построенной карты сейсмической активности (см. рис. 5) с таковой в работе [Жалковский и др., 1995] (см. рис. 6) приводит к выводу об их соответствии в наиболее активной центральной субширотной зоне Алтае-Саянского региона. При этом общая конфигурация и уровень сейсмической активности находятся в сопоставимых пределах. Но карта на рис. 6 фрагментарно отражает сейсмическую активность региона только в центральной части. Карта на рис. 5 представляет сейсмическую активность в обобщенном виде как центральной части, так и остальной территории Алтае-Саянского региона. Это позволяет проводить сопоставление проявлений сейсмической активности с основными геологическими структурами региона.

Коэффициент коррекции величины активности A_{10} при использовании предложенной в работе методики расчета сейсмической активности по большим площадкам осреднения для площадки 1° широты \times 2° долготы был вычислен равным 3 по отношению к стандартной площадке 40×40 км². Квадратный корень отношения используемых площадей на широтах Алтае-Саянского региона примерно равен 3. Это отношение в дальнейшем можно использовать в качестве корректирующего коэффициента при сопоставлении карт сейсмической активности, построенных по площадкам осреднения разных размеров.

Полученная карта сейсмической активности (см. рис. 5) позволяет качественно оценить ее распределение в Алтае-Саянской складчатой области. В центральной части находится полоса наиболее высокой сейсмической активности, которая является фрагментом среднеазиатского сейсмического пояса. На западе его продолжение находится в республиках Средней Азии, на востоке — в Монголии, Прибайкалье, Забайкалье с выходом к Тихоокеанскому сейсмическому поясу. К югу и северу от рассматриваемой полосы расположены отдельные зоны повышенной сейсмической активности. К югу: районы Внутренней Монголии, где в историческом прошлом происходили довольно сильные землетрясения; к северу: район г. Камень-на-Оби (5) (юго-западная часть Томь-Колыванской складчатой зоны), район г. Новокузнецк (6) (Кузнецкий Алатау), район г. Абакан (7) (Абаканский хребет).

Карты на рис. 5, 6 дают представление как о величине сейсмической активности Алтае-Саянского региона, так и о ее географическом распределении. Однако есть один аспект, который необходимо учитывать при использовании полученной карты. В районах 6 и 7 (см. рис. 5) ежегодно проводится большое количество промышленных взрывов до 800 т тротилового эквивалента. Несмотря на то, что при камеральной обработке явные взрывы отмечаются, какая-то их часть (более низких энергетических классов) могла при фильтрации данных попасть в число землетрясений и соответствующим образом «скорректировать» получаемые карты сейсмической активности. Под большим вопросом находится район активизации (7) на рис. 5 в окрестностях г. Абакан, где расположено много угольных карьеров, в которых проводятся мощные взрывы. «Взрывные» районы проявляются северо-восточнее г. Абакан и восточнее г. Красноярск. Особое место занимает Кемеровская область (район 6 на рис. 5). Вероятно, здесь в значительной степени произошел процесс «соединения» природной и техногенной сейсмичности. По мере возрастания масштабов добычи угля и руды с применением промышленных взрывов увеличилось число проявлений естественной сейсмичности при том, что в прошлом здесь происходили относительно сильные землетрясения. Это надо иметь в виду при использовании полученной в настоящей работе карты сейсмической активности.

Использование предлагаемой методики построения карт сейсмической активности по большим площадкам осреднения позволяет перейти к построению рядов сейсмической активности и их математическому анализу. Число землетрясений на площадках лежит в пределах 1—4809. На 219 площадках из 361, которые были использованы при построении карты на рис. 5, число сейсмических событий более 50. Только на 5 площадках число событий менее 3.

Ряды сейсмической активности дадут возможность оценки пиковых значений активности и других ее характеристик, соответствующих математическим распределениям этой величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснован выбор площадки осреднения при построении карт сейсмической активности.

Предложен способ оценки корректирующего коэффициента при построении карт сейсмической активности по площадкам осреднения разных размеров с целью их стыковки, сопоставления.

На примере Алтае-Саянской области сделано построение карты сейсмической активности A_{10} по большим площадкам осреднения размерами 1° широты \times 2° долготы. Полученная карта дает генерализованное представление о сейсмической активности региона, охватывая более 90 % территории по сравнению с 30 % при применении стандартной методики оценки сейсмической активности.

Применение методики оценки сейсмической активности по большим (или оцениваемым) площадкам осреднения дает возможность построения рядов сейсмической активности и их анализа методами математической статистики, а также построения математических моделей сейсмических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

Дергачев А.А., Данциг Л.Г. О представительной регистрации и глубинах очагов землетрясений Алтае-Саянской области // Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири. Вып. 3. Иркутск, 1989, с. 34—37.

Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 20—30.

Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М., Наука, 1985, 407 с.

Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. М., Наука, 1980, 307 с.

СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. Госстрой России. М., ГУП ЦПП, 2000, 44 с. + прил. 2: 10 карт.

*Рекомендована к печати 31 января 2008 г.
В.С. Селезевым*

*Поступила в редакцию
14 сентября 2007 г.*