

Расчет параметров сейсмического режима на основе вероятностной модели каталога землетрясений Камчатского региона

Богданов В. В., Павлов А. В.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с.
Паратунка, Россия
e-mail: vbogd@ikir.ru pavlov@ikir.ru

Характер сейсмичности Камчатки определяется взаимодействием нескольких литосферных плит: Тихоокеанской, Охотской, Евразийской, Северо-Американской и Берингии. Землетрясения, происходящие на Камчатке, имеют различную тектоническую природу. На рис.1 представлены шесть из десяти тектоно-географических зон (структур) Камчатского региона, имеющих существенно различные характеристики сейсмичности. Зоны S_1 , S_2 , S_3 и S_4 имеют сложную трехмерную конфигурацию и наклонные по глубине границы. Зоны S_5 и S_6 не содержат глубоких землетрясений и имеют вертикальные границы. На Сейсмофокальную зону Курил и Южной Камчатки (зона S_1) и Северную часть Камчатской сейсмофокальной зоны (зона S_2) приходится 75% землетрясений региона, глубины которых лежат в интервале $h=0-700$ км, причём доля поверхностных землетрясений ($h \leq 70$ км) составляет 93% [1].

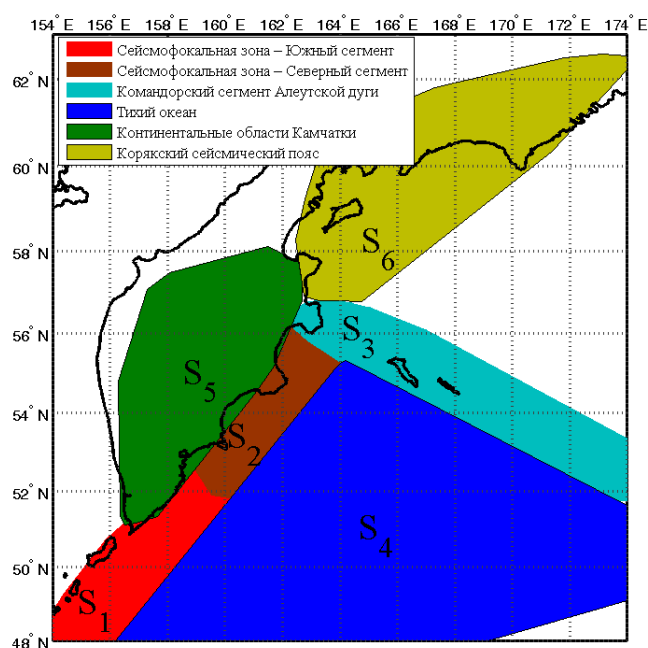


Рис. 1. Поверхностное сечение зон сейсмичности Камчатского региона.

Проведём анализ сейсмического режима представленных на рис.1 тектоно-географических зон Камчатского региона на основе вероятностного представления, предложенного в [2,3,5]. На основе вероятностной интерпретации графика повторяемости землетрясений, предложенной в [2] и более подробно развитой в [3,5], можно получить простые соотношения, позволяющие:

- по известному числу землетрясений в представительном интервале энергетического класса (магнитуды) рассчитать количество событий, попадающих в непредставительный интервал;

- на рассматриваемой площади оценить время ожидания землетрясения с магнитудой, превышающей за период инструментальных наблюдений максимально зарегистрированное значение.

Закон повторяемости землетрясений в вероятностном представлении для плотности распределения сейсмических событий по энергетическому классу k имеет следующий вид [2]

$$f(k^{1,2}) = f(k_0^{1,2}) \cdot 10^{-\gamma_{1,2}(k^{1,2}-k_0^{1,2})} \quad (1)$$

или в двойном логарифмическом масштабе зависимость (1) можно представить

$$lgf(k^{1,2}) = lgf(k_0^{1,2}) - \gamma_{1,2}(k^{1,2} - k_0^{1,2}) \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) записаны для следующих диапазонов изменения k : $9,5 \leq k_1 < 12,5$ с $\gamma_1(k_0^1 = 9,5)$ и $12,5 \leq k_2 < 16$ с $\gamma_2(k_0^2 = 12,5)$. При этом $f(k_0)$ обозначает начальную плотность распределения, вычисляемую в середине интервала $k_0 \pm \Delta k/2$.

Расчетами на примере каталога камчатских землетрясений в [3] показано, что независимо от того очищен каталог от афтершоков или не очищен, для фиксированного периода времени T и заданного начального интервала $k_0 \pm \Delta k/2$ плотности распределения $f(k)$, определяемые (1), практически не зависят от рассматриваемой площади, на которой расположены эпицентры событий. В Таблице 1 представлены значения вероятностей попадания землетрясений в интервалы энергетического класса k , вычисленные для периода T с 01.01.1962 г. по 01.01.2008 г. и осредненные по областям S_1, S_2, \dots, S_6 для неочищенного каталога камчатских землетрясений [4].

Таблица 1. Усредненные распределения вероятностей $P(k_i)$ по областям S_1, S_2, \dots, S_6 для различных начальных значений k_0

Интервалы энергетического класса k_i	Средние $P(k_i) \ k \geq 9$	Средние $P(k_i) \ k \geq 10$	Средние $P(k_i) \ k \geq 11$	Средние $P(k_i) \ k \geq 12$
9,5±0,5	0,658			
10,5±0,5	0,234	0,692		
11,5±0,5	0,076	0,218	0,713	
12,5±0,5	0,023	0,064	0,205	0,716
13,5±0,5	0,007	0,019	0,059 0,208	
14,5±0,5	0,0017	0,005	0,017	0,0602
15,5±0,5	0,00072	0,002	0,00523	0,016

Полученное на основе данных Таблицы 1 среднее значение вероятности $P_{cp}(k_0)$ для различных начальных k_0 равно 0,6947.

На рис.2 представлены зависимости (2) для различных k_0 , равных 9, 10, 11 и 12, вычисленные для тектоно-географической зоны S_2 . На основе зависимости (2) были вычислены (Таблица 2) значения углов наклона γ_1 и γ_2 графика закона повторяемости землетрясений для двух диапазонов энергетического класса $9 \leq k < 13$ и $12 \leq k < 16$ соответственно. Значения γ (Таблица 2) представленное в работе [1] и значения γ_1 , вычисленное на основе распределений вероятностей, практически совпадают.

Сравнив различные значения вероятностей, представленных в Таблице 1, можно отметить, что с ростом начальных k_0 значения полученных вероятностей имеют тенденцию

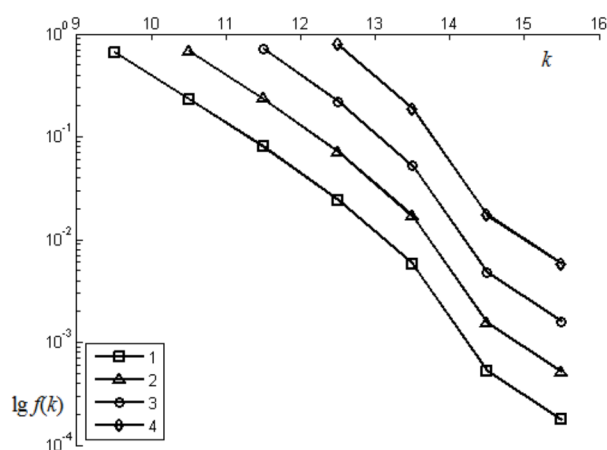


Рис. 2. Зависимость $f(k)$ в двойном логарифмическом масштабе, для области S_2 при различных начальных значениях k_0 : 1) $k_0=9$; 2) $k_0=10$; 3) $k_0=11$; 4) $k_0=12$.

постепенного возрастания. Это объясняется тем, что с уменьшением k_0 возникают трудности с регистрацией событий, обусловленные наличием неразветвленной сети сейсмических станций, внешними возмущающими факторами и т.п., что, в конечном счете, приводит к пропуску произошедших землетрясений. Таким образом, реальный завал графика закона повторяемости при малых значениях k , а соответственно и уменьшение вероятности, происходит за счет уменьшения зарегистрированного числа событий, попадающих в непредставительную область значений энергетического класса. С другой стороны, с ростом начального значения k_0 полная группа реальных событий уменьшается, а доля событий в начальном выбранном интервале $k_0 \pm \Delta k/2$ увеличивается, и вероятность в частотном представлении растет.

Расчет плотности распределения на основе реально зарегистрированных событий с энергетическим классом меньшим представительного и ее сравнение с $f(k_i)$, рассчитанной на основе формулы (1), приводит к расхождениям. Поэтому возникает задача о получении рекуррентного соотношения расчета числа событий в непредставительном интервале энергетического класса на основе знания числа событий и, следовательно, плотности распределения в представительном классе. В работе [5] была получена формула (3) позволяющая по известному числу землетрясений n_0 в представительном интервале энергетического класса $k_0 \pm \Delta k/2$, произошедших за период времени T на площади S , рассчитать количество событий n_{-1} , попадающих в непредставительный интервал $k_{-1} \pm \Delta k/2$, при $k_{-1} < k_0$

Таблица 2. Значения углов наклона графика закона повторяемости землетрясений

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
γ ($9 \leq K < 13$)	-0,5	-0,43	-0,45	-0,7	-0,53	-
$-0,726-0,595-0,309\gamma_1$ ($9 \leq K < 13$)	-0,476	-0,425	-0,456	-0,623	-0,589	-0,434
-0,745 γ_2 ($12 \leq K < 16$)						

$$n_{-1} = \frac{N_{\Sigma} \cdot P_0(k_0 \pm \Delta k/2)}{1 - P_0(k_0 \pm \Delta k/2)} \quad (3)$$

где N_{Σ} общее число зарегистрированных на площади S за период времени T событий в интервалах энергетического класса от k_0 до k_{max} , $P_0(k_0 \pm \Delta k/2) = n_0(k_0 \pm \Delta k/2)/N_{\Sigma}$. При этом предполагается, что с уменьшением значений k в область непредставительного класса, коэффициент γ_1 не изменяется.

Определим число землетрясений, произошедших в Северной части Камчатской сейсмофокальной зоны (область S_2) за период T (с 01.01.1962 г. по 01.01.2008 г.) и попавших в непредставительный интервал энергетического класса $8,5 \pm 0,5$. Поскольку общее число событий с $k \geq 9$, произошедших в области S_2 за период T , составляет $N_{\Sigma} = 11323$, а вероятность попадания в начальный интервал $P(9,5 \pm 0,5) = 0,6582$, то согласно рекуррентному соотношению (3) получаем $n_{-1} = 21805$. В то же время согласно каталогу землетрясений общее число зарегистрированных за период $T = 46$ лет на площади S_2 событий, попавших в интервал $8,5 \pm 0,5$, равно 16893.

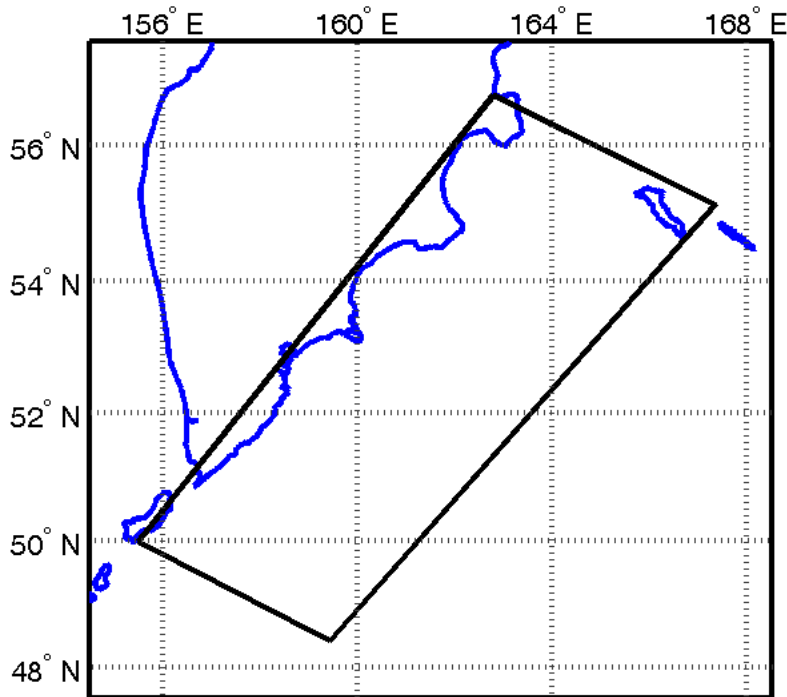


Рис. 3. Область S_7 .

В работе [1] на основе соотношения (1) было получено выражение

$$\lg N = A - bM \quad (4)$$

где $A = \lg N(M_0) + bM_0 = \lg[10^{bM_0} N(M_0)]$ и $b = 1.5\gamma$, $N(M_0)$ – число событий, попадающих в интервал $M_0 \pm \Delta M/2$, $M_0 = (k_0 - 4.6)/1.5$ ($M_0^1 = 3.27$ при $k_0 = 9.5$, $M_0^2 = 5.27$ при $k_0 = 12.5$, $\Delta M = 0.67$ при $\Delta k = 1$). Связь между классом k и магнитудой M для Курило-Камчатских землетрясений задавалась соотношением $k = 4.6 + 1.5M$ [6]. При отсутствии достаточной статистики в области больших значений M , когда $\lg N$ становится отрицательным, а время ожидания превышает период инструментальных наблюдений, по формуле (4) можно произвести оценку этого времени и для более высоких значений магнитуд, в сравнении с уже зарегистрированными за период инструментальных наблюдений. Полагая, что пространственные и энергетические характеристики землетрясений

Камчатского региона за период инструментальных наблюдений $T_{\text{инс}}$ отражают в среднем его сейсмический режим [7], на основе соотношения (4) в работе [5] была получена формула, позволяющая оценить период ожидаемого времени $T_{\text{иск}}$ в течение которого может произойти одно событие с максимальной магнитудой M_{max}

$$T_{\text{иск}} = \frac{10^{1.5\gamma(M_{\text{max}} - M_0^2)}}{N(M_0^2)} T_{\text{инс}} \quad (5)$$

Выполним по формуле (5) оценку ожидаемого времени $T_{\text{иск}}$ землетрясений с магнитудами $M_{\text{max}}^1 = 8,5$, $M_{\text{max}}^2 = 9,0$ и $M_{\text{max}}^3 = 9,5$ для области S_7 (рис.3). Воспользуемся результатами обработки данных каталога камчатского региона для этой области за период $T_{\text{инс}}=52$ года (с 01.01.1962 г. по 01.04.2016 г.): $N_{\Sigma} = 27117$ – суммарное число событий каталога с энергетическим классом в интервале от $9,5 \pm 0,5$ до $15,5 \pm 0,5$ (для магнитуд от $3,27 \pm 0,335$ до $7,27 \pm 0,335$); $P(5,27 \pm 0,335) = 0,024$ – вероятность попадания сейсмических событий в интервал $M_0^2 \pm 0.335$; $N_0(M_0^2) = P(5,27 \pm 0,335) \times N_{\Sigma} = 0,024 \times 27117 = 662$ – число событий, зарегистрированных на площади S_7 за период $T_{\text{инс}}$ в интервале магнитуд $M_0^2 \pm 0,335$; $|\gamma_2| = 0,64$ – коэффициент наклона, рассчитанный методом наименьших квадратов. Расчеты на основе приведенных данных дают следующие значения ожидаемых периодов с соответствующими магнитудами событий: для $M_{\text{max}}^1 = 8,5$ ожидаемый период $T_{\text{иск}}^{8,5} \approx 100$ лет; для $M_{\text{max}}^2 = 9,0$ ожидаемый период $T_{\text{иск}}^{9,0} \approx 300$ лет; для $M_{\text{max}}^3 = 9,5$ ожидаемый период $T_{\text{иск}}^{9,5} \approx 960$ лет.

Литература

1. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962-2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41-64,
2. Богданов В.В. Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // ДАН. 2006. том 3. С.393–397.
3. Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л. Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С.52–64.
4. <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>
5. Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л. Рекуррентные соотношения расчёта параметров сейсмического режима на основе вероятностной интерпретации закона повторяемости // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2012. № 1. С. 44-48.
6. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука. 1972. 115 с.
7. Болдырев С.А. Отражение структуры и свойств литосферы в сейсмическом поле Камчатского региона // Физика Земли. 2002. № 6. С. 5–28.