

DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-36-42

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
УДК 550.34:519.2

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ КАТАЛОГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

В. В. Богданов, А. В. Павлов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: vbogd@ikir.ru pavlov@ikir.ru

По формулам, полученным на основе вероятностной интерпретации закона повторяемости землетрясений Камчатского региона, вычислено число событий, которые должны попасть в непредставительный интервал энергетического класса, а также произведена оценка времени ожидания землетрясения с магнитудой превышающей за период инструментальных наблюдений максимально зарегистрированное значение.

Ключевые слова: вероятность, сейсмический режим, закон повторяемости землетрясений

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2016

INFORMATION AND COMPUTATION TECHNOLOGIES
MSC 86A15

CALCULATION OF SEISMIC REGIME PARAMETERS ON THE BASIS OF A PROBABILISTIC MODEL OF KAMCHATKA REGION EARTHQUAKE CATALOG

V. V. Bogdanov, A. V. Pavlov

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034,
Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

E-mail: vbogd@ikir.ru pavlov@ikir.ru

Simple formulas were obtained on the basis of a probabilistic interpretation of Kamchatka region earthquake repetition law. Using these formulas the number of seismic events falling within an unrepresentative interval energy class (magnitude) was calculated and the expected time of an earthquake with a magnitude exceeding the maximum registered values for the period of instrumental observations was estimated.

Key words: probability, seismic regime, earthquake repetition law.

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2016

Введение

Характер сейсмичности Камчатки определяется взаимодействием нескольких литосферных плит: Тихоокеанской, Охотской, Евразийской, Северо-Американской и Берингии. При этом наибольшее количество землетрясений и самые крупные события связаны с субдукцией Тихоокеанской плиты. Землетрясения, происходящие на Камчатке, имеют различную тектоническую природу [1].

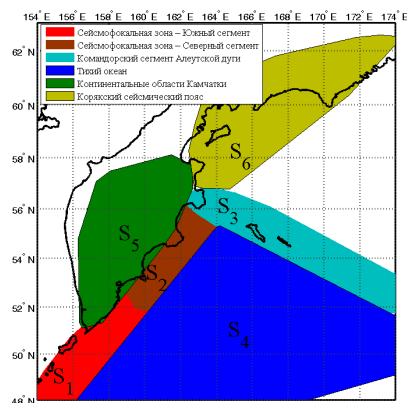


Рис. 1. Поверхностное сечение зон сейсмичности Камчатского региона

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. Для представленных на рис. 1 тектоно-географических зон можно провести анализ сейсмического режима на основе вероятностного подхода, предложенного в [2, 3]. На основе вероятностной интерпретации графика закона повторяемости землетрясений, предложенной в [2] и более подробно развитой в [3, 4], 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

$$\lg f(K^{1,2}) = \lg f(K_0^{1,2}) - \gamma_{1,2}(K^{1,2} - K_0^{1,2}) \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) записаны для следующих диапазонов изменения K : $9.5 \leq K_1 < 12.5$ с γ_1 ($K_0^1 = 9.5$) и $12.5 \leq K_1 < 15.5$ с γ_2 ($K_0^2 = 12.5$). При этом $f(K_0)$ обозначает начальную плотность распределения, вычисляемую в середине интервала $K_0 \pm \Delta K/2$.

Оценка числа событий непредставительного энергетического класса

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 осреднённые по областям S_1, S_2, \dots, S_6 для неочищенного каталога камчатских землетрясений [5]. Для различных начальных K_0 получены следующие значения $P(K_0)$ при $\Delta K = 1$ (Таб-

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

лица 1): $P(K_0 = 9.5 \pm 0.5) = 0.658$, $P(K_0 = 10.5 \pm 0.5) = 0.692$, $P(K_0 = 11.5 \pm 0.5) = 0.713$, $P(K_0 = 12.5 \pm 0.5) = 0.716$. Среднее значение вероятности $P(K_0)$ 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 .

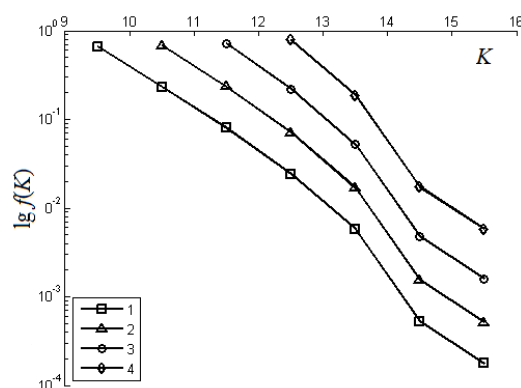


Рис. 2. Зависимость $f(K)$ в двойном логарифмическом масштабе, для области S_2 при различных начальных значениях K_0 : 1) $K_0 = 9.5 \pm 0.5$; 2) $K_0 = 10.5 \pm 0.5$; 3) $K_0 = 11.5 \pm 0.5$; 4) $K_0 = 12.5 \pm 0.5$.

На основе зависимости (1) были вычислены (Таблица 2) значения углов наклона η_1 и η_2 графика закона повторяемости землетрясений для двух диапазонов энерге-

тического класса $9 \leq K < 13$ и $12 \leq K < 16$ соответственно. Значения γ (Таблица 2) представленные в работе [1] и значения γ_1 , вычисленные на основе распределений вероятностей, практически совпадают.

Таблица 2

Значения углов наклона графика закона повторяемости землетрясений

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$\gamma, 9 \leq K < 13$	-0.5	-0.43	-0.45	-0.7	-0.53	–
$\gamma_1, 9 \leq K < 13$	-0.476	-0.425	-0.456	-0.623	-0.589	-0.434
$\gamma_2, 12 \leq K < 16$	-0.745	-0.726	-0.595	–	–	-0.309

Сравнив различные значения вероятностей, представленных в Таблице 1, можно отметить, что с ростом начальных K_0 значения полученных вероятностей имеют тенденцию 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 расхождению. 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 [4] 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 при $K_{-1} < K_0$ в непредставительный интервал $K_{-1} \pm \Delta K/2$.

$$n_{-1} = \frac{N_{\Sigma} \cdot P_0(K_0 \pm \Delta K/2)}{1 - P_0(K_0 \pm \Delta K/2)} \quad (3)$$

В уравнении (3) N_{Σ} – это общее число событий, зарегистрированных на площади S за период времени T 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 на глубинах до 100 км 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 ± 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 ± 0.5 , равно 16893. Аналогичным образом на основе соотношения (3) было вычислено число событий, попадающих в интервал энергетического класса 8.5 ± 0.5 для остальных рассматриваемых областей S_i . Результаты вычислений представлены в Таблице 3.

Таблица 3

Число событий в непредставительном интервале энергетического класса

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$n(8.5 \pm 0.5)$, по каталогу	7308	11323	3177	1534	2348	710
$n(8.5 \pm 0.5)$, по формуле (3)	10566	21805	6361	3912	3698	1000

Оценка периода ожидания сильного землетрясения

В работе [2] на основе соотношения (1) было получено выражение

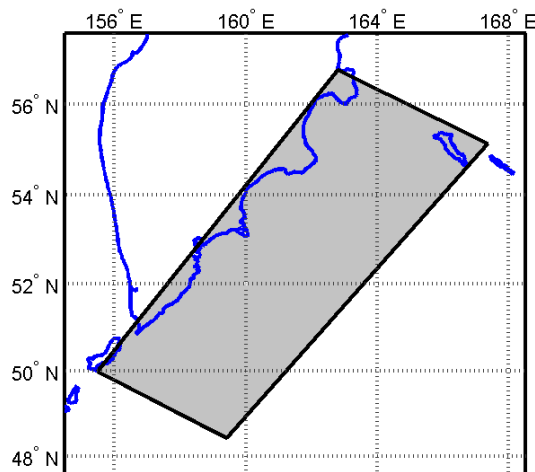
$$\lg N = A - bM \quad (4)$$

где $A = \lg N(M_0) + bM_0 = \lg[10^{bM_0} \cdot N(M_0)]$ 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 $K = 4.5 + 1.5M$ [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, на основе соотношения (4) в работе [4] 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 $T_{\text{инс}} = 54$ 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 ± 0.5 до 15.5 ± 0.5 (для магнитуд от 3.27 ± 0.335 до 7.27 ± 0.335); $P(5.27 \pm 0.335) = 0.024$ – вероятность попадания сейсмических событий в интервал $M_0^2 \pm 0.335$; $N(M_0^2) = P(5.27 \pm 0.335) \times N_{\Sigma} = 0.024 \times 27117 = 662$ – число событий, зарегистрированных на площади S_7 за период $T_{\text{инс}} = 54$ года в интервале магнитуд $M_0^2 \pm 0.335$; $|\gamma| = 0.64$ – 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.

Рис. 3. Область S_7

Заключение

Показано, что для рассматриваемых областей S_1, S_2, \dots, S_6 и различных значений начального интервала энергетического класса $K_0 \pm 0.5$, где $K_0 = 9.5, 10.5, 11.5$ и 12.5 , значения вероятности $P(K_0 \pm 0.5)$ мало отличаются друг от друга и стремятся к среднему значению 0.6947.

На основе рекуррентного соотношения (3) произведена оценка числа событий, которые должны произойти в непредставительном интервале энергетического класса 8.5 ± 0.5 в областях S_1, S_2, \dots, S_6 .

На основе соотношения (5), для области S_7 произведена оценка времени ожидания сильного землетрясения. Периоды ожидания сейсмических событий с магнитудами 8.5, 9.0 и 9.5, составили соответственно 100, 300 и 960 лет.

Список литературы

- [1] Левина В.И. и др., “Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг”, *Вулканология и сейсмология*, 2013, № 1, 41–64; English transl.:Levina V.I. et al., “The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011”, *Journal of Volcanology and Seismology*, **7**:1 (2013), 37–57.
- [2] Богданов В.В., “Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона”, *ДАН*, **408**:3 (2006), 393–397; English transl.:Bogdanov V.V., “Veroyatnostnaya interpretatsiya zakona povtoryaemosti zemletryaseniy na primere Kamchatskogo regiona”, *Doklady Akademii Nauk*, **408**:3 (2006), 393–397 (in Russian).
- [3] Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., “Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений”, *Вулканология и сейсмология*, 2010, № 6, 52–64; English transl.:Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., “Probabilistic Model of Seismicity: Kamchatka Earthquakes”, *Journal of Volcanology and Seismology*, **4**:6 (2010), 412–422.
- [4] 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, 44–48; English transl.:Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., “Rekurrentnye sootnosheniya rascheta parametrov seysmicheskogo rezhima na osnove veroyatnostnoy interpretatsii zakona povtoryaemosti”, *Izvestiya*

vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki, 2012, № 1, 44–48 (in Russian).

[5] <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.

[6] Федотов С.А., *Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд*, Наука, М., 1972, 115 с.; English transl.: Fedotov S.A., *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskikh zemletryaseniye i problema magnitud*, Nauka, M., 1972 (in Russian), 115 pp.

Для цитирования: Богданов В. В., Павлов А. В. Расчет параметров сейсмического режима на основе вероятностной модели каталога землетрясений Камчатского региона // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2016. № 4(15). С. 36-42. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-36-42

For citation: Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Calculation of seismic regime parameters on the basis of a probabilistic model of Kamchatka region earthquake catalog, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2016, **15**: 4, 36-42. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-36-42

Поступила в редакцию / Original article submitted: 13.06.2016