

DOI: 10.18454/2079-6641-2017-17-1-54-67

ФИЗИКА

УДК 550.34:519.2

**ОЦЕНКА ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ
ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

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

На основе теоретико-вероятностного подхода к каталогу Камчатских землетрясений было задано подмножество случайных событий и вычислены их вероятности. Рассматривая полученные вероятности случайных событий как прогностические признаки сильных землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 14$, была произведена оценка их эффективности V , надёжности R и информативности J как в периоды сейсмической активизации, так и в периоды сейсмического затишья.

Ключевые слова: вероятность, сейсмический режим, эффективность прогноза

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2017

PHYSICS

MSC 86A15

**ESTIMATION OF PREDICTION EFFICIENCY OF SEISMIC REGIME
PROBABILISTIC MODEL PARAMETERS**

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

On the basis of theoretical-probabilistic approach to the Kamchatka earthquakes catalog the subset of random events was specified and their probabilities were calculated. The received probabilities of random events considered as predictors of strong earthquakes with energy class $K_S \geq 14$. Their effectiveness V , reliability R and prediction efficiency (informative) J were calculated for periods of seismic activity and seismic calm.

Key words: probability, seismicity, forecasting effectiveness

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2017

Введение

В работах [1, 2, 3] был применён вероятностный подход к каталогу Камчатских землетрясений. Данный подход позволяет, рассматривая каждое землетрясение как элементарное событие, а весь каталог или его часть как пространство элементарных событий, задать множество подмножеств случайных событий. Путём статистической обработки каталога землетрясений можно определить распределения вероятностей для заданных случайных событий. Вариации в распределениях вероятностей случайных событий за разные временные периоды позволяют отслеживать изменения в сейсмическом режиме региона и, следовательно, дают возможность определять области и периоды повышенной сейсмической активности.

В алгоритме прогноза сильных землетрясений Карта Ожидаемых Землетрясений (КОЗ) [4] проводился анализ совокупности прогностических признаков (плотность сейсмогенных разрывов, угол наклона график повторяемости землетрясений, выделившаяся сейсмическая энергия, число событий в единицу времени), временные ряды которых вычисляются по каталогу землетрясений для заданных сейсмоактивных ячеек. С целью отбора прогностических признаков для расчёта условной вероятности возникновения сильного землетрясения проводилась оценка их прогностической эффективности (информативности) J . Прогностическая эффективность каждого признака оценивалась ретроспективно в виде отношения средней плотности потока сильных землетрясений во время тревог (или на площади тревог) к их средней плотности за время наблюдения (или на площади наблюдения).

В работах [6, 7] для оценки сеймопрогностической информативности аномалий сейсмического затишья, являющиеся предвестником сильного землетрясения, были использованы понятия эффективности предвестника V и надёжности предвестника R .

В данной работе для шести сейсмоактивных областей Камчатского региона были вычислены вероятности P заданных случайных событий, определённых на основе каталога землетрясений Камчатки. Рассматривая аномальные значения вероятностей P в периоды сейсмической активизации и сейсмического затишья как прогностические признаки, предшествующие сильным землетрясениям с энергетическим классом $K_S \geq 14$, произведена оценка их эффективности V , надёжности R а также эффективности прогноза J .

Вероятностная модель сейсмического режима

При теоретико-вероятностном подходе каталог землетрясений можно представить в виде вероятностного пространства трех математических объектов, а именно: Ω – пространство элементарных событий, \tilde{F} – множество подмножеств случайных событий, P – вероятности этих событий [1, 2]. При этом каждое землетрясение рассматривается как точка в пространстве Ω . Каждый исход ω_i определяется системой случайных непрерывных величин: широтой φ_i , долготой λ_i , глубиной h_i , энергетическим классом $K_i = \lg E$ и временем t_i . Время единичного события как случайная величина из дальнейшего анализа в предлагаемой модели будет исключено. Так как случайные величины φ_i , λ_i , h_i и K_i заключены в соответствующие интервалы между минимальными и максимальными значениями, то для пространства элементарных

событий справедливо

$$\Omega = \{\omega : \varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}; \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}; h_{min} \leq h \leq h_{max}; K_{min} \leq K \leq K_{max}\} \quad (1)$$

Максимальные и минимальные значения входящих в (1) случайных величин задаются геометрией реального сейсмического региона, а также его внутренними свойствами, определяющими энергетику события. Чтобы перейти от идеализированного вероятностного пространства к реальному эксперименту, необходимо границы пространства элементарных событий Ω и сами вероятности P определять из каталога землетрясений на основе его статистической обработки. Для непрерывных величин, определяющих сейсмическое событие, плотность распределения $f(\varphi, \lambda, h, K)$ можно представить следующим соотношением

$$f(\varphi, \lambda, h, K) = f(\varphi) \cdot f(\lambda|\varphi) \cdot f(h|\varphi, \lambda) \cdot f(K|\varphi, \lambda, h) \quad (2)$$

В (2) приняты обозначения: $f(\varphi)$ – безусловная плотность распределения сейсмических событий в зависимости от φ ; $f(\lambda|\varphi)$ – плотность распределения сейсмических событий по λ при условии, что их широта равна φ ; $f(h|\varphi, \lambda)$ – плотность распределения сейсмических событий по h при условии, что их широта и долгота соответственно равны φ и λ ; $f(K|\varphi, \lambda, h)$ – плотность распределения сейсмических событий по K при условии, что их долгота, широта и глубина соответственно равны φ , λ и h . Зная аналитический вид плотности распределения (2), можно вычислить вероятность того, что сейсмическое событие попадет в заданные интервалы: по широте $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i-1}$, долготе $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_{j-1}$, глубине $\Delta h = h_m - h_{m-1}$ и по энергетическому классу $\Delta K = K_n - K_{n-1}$

$$\begin{aligned} P(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m, \Delta K_n) &= \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} d\varphi \int_{\lambda_{j-1}}^{\lambda_j} d\lambda \int_{h_{m-1}}^{h_m} dh \int_{K_{n-1}}^{K_n} f(\varphi, \lambda, h, K) dK = \\ &= F(\varphi_i, \lambda_j, h_m, K_n) - F(\varphi_{i-1}, \lambda_{j-1}, h_{m-1}, K_{n-1}) = \\ &= P(\Delta\varphi_i)P(\Delta\lambda_j|\Delta\varphi_i)P(h_m|\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j)P(K_n|\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, h_m) \end{aligned} \quad (3)$$

где i, j, m и n – индексы, соответствующих интервалов случайных величин.

Статистическая обработка каталога по формуле (3) дает возможность не только ответить на вопрос о средней вероятности возникновения сейсмического события в том или ином заданном интервале географических координат, глубины и энергетического класса, но и получить численные значения ступенчатой функции распределения $F(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta K)$. С ростом числа событий n и уменьшением интервала Δ относительная частота случайного события стремится к своему математическому аналогу P , а $F(\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta K)$ – к устойчивому непрерывному распределению $F(\varphi, \lambda, h, K)$. При вычислении функции F за некоторый интервал времени T в выбранном объеме V , происходит усреднение комплекса условий, приводящих к реализации того или иного случайного события, и, следовательно, F в среднем описывает сейсмический режим. Таким образом, функция F за рассматриваемый период в среднем определяет потенциальные возможности сейсмического режима выбранного объема в терминах теории вероятностей. При таком подходе каталог землетрясений за весь инструментальный период наблюдений $T_{инст}$, представленный в виде математического объекта трех элементов $\{\Omega, \tilde{F}, P\}$, может рассматриваться в качестве опорной модели. На её

фоне можно отслеживать изменения в сейсмической активности, т.е. регистрировать вариации в распределении вероятностей в локальных областях сейсмического региона, обусловленные изменением активности того или иного объема, за различные интервалы времени T ($T < T_{\text{инст}}$).

На основе каталога землетрясений Камчатского региона, составленного КФ ФИЦ ЕГС РАН [9] можно определить следующие случайные события:

Событие А : Попадание сейсмических событий, произошедших в некотором сейсмоактивном объеме V , в заданные области S_i ;

Событие В: Попадание сейсмических событий, произошедших в некотором сейсмоактивном объеме V , в заданные интервалы глубины Δh_m ;

Событие С: Попадание сейсмических событий, произошедших в некотором сейсмоактивном объеме V , в интервалы энергетического класса ΔK_n .

Вероятности случайных событий A , B и C вычислялись для каждой из шести областей S_i с размерами 150×250 км, расположенных вдоль восточного побережья Камчатки (рис.1). В таблице 1 представлено число событий с энергетическим классом $K_S \geq 14$, произошедших в областях S_i за интервал инструментальных наблюдений $T_{\text{инст}}=01.01.1962 - 01.10.2016$ гг. Исследуемые области находятся в Южном и Северном сегменте Камчатской сейсмофокальной зоны, а также частично в Командорском сегменте Алеутской дуги и зоне Тихого океана. На указанные зоны приходится примерно 93% землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 8.6$ и примерно 79% выделенной сейсмической энергии $\sum E$ [8]. При вычислении вероятностей случайного события B рассматривались три интервала случайной величины Δh , которые имели значения $0 \leq \Delta h_1 < 25$ км, $25 \leq \Delta h_2 < 50$ км и $50 \leq \Delta h_3 < 100$ км. Вероятности случайного события C вычислялись для интервалов энергетического класса $9 \leq \Delta K_1 < 10$, $9 \leq \Delta K_2 < 11$, $10 \leq \Delta K_3 < 11$, $10 \leq \Delta K_4 < 14$, $11 \leq \Delta K_5 < 14$ и $12 \leq \Delta K_6 < 14$. Вычисления вероятностей случайных событий проводились для землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 9$ и глубиной гипоцентров $h \leq 100$ км. Временное окно, в котором вычислялись вероятности, было выбрано равным $\Delta T = 3$ года. Шаг, с которым смещалось временное окно вдоль исследуемого интервала $T_{\text{инст}}$, равен $\Delta t = 1$ месяц.

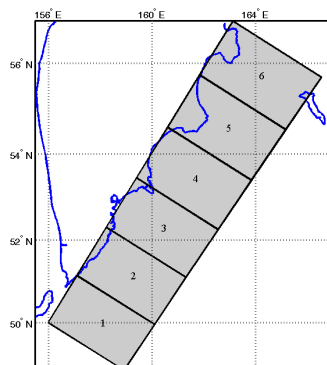


Рис. 1. Исследуемые области S_i

В качестве примера на рис.2-4 приведены графики значений вероятностей P , вычисленных для случайных событий A , B , C для области S_1 .

Таблица 1

Число сейсмических событий с энергетическим классом $K_S \geq 14$, произошедших в областях S_i на глубинах до 100 км за период 01.01.1962 – 01.10.2016 гг.

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
Число землетрясений	11	3	7	1	5	6

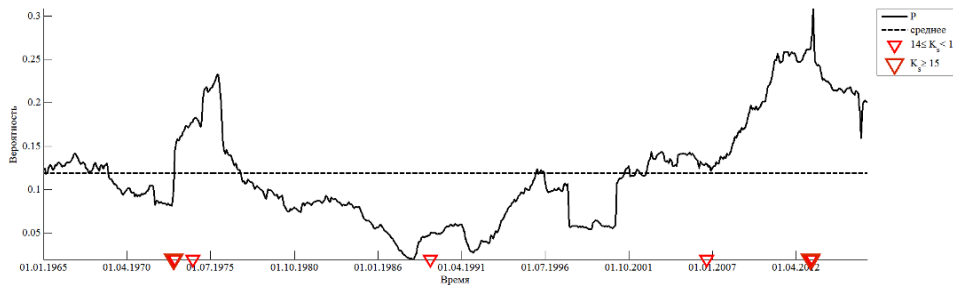


Рис. 2. Временной ряд значений вероятности $P(A)$ для области S_1 . Сейсмические события с энергетическим классом $K_S \geq 14$, произошедшие в данной области, отмечены треугольниками.

Информативность прогностических признаков

Рассматривая вычисленные временные ряды вероятностей как прогностические признаки, аномальные значения которых могут быть предвестниками сильных сейсмических событий Камчатского региона, для каждой области S_i была произведена оценка их прогностической эффективности J , которая определялась по следующей формуле [5]:

$$J = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{общ}} \cdot (T_{\text{ож}}/T_{\text{н}})} \quad (4)$$

где $N_{\text{пр}}$ - количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу; $N_{\text{общ}}$ - общее количество произошедших землетрясений, которые должны были быть спрогнозированы; $T_{\text{ож}}$ - общее время ожидания (тревог); $T_{\text{н}}$ - общее время наблюдения. Эффективность J показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число землетрясений, попавших в тревожное время случайным образом. При случайном угадывании эффективность $J = 1$. В работе [7] был представлен видоизменённый вариант формулы (4), который позволяет вычислить J для прогнозов (по одному и тому же методу), значения пространственно-энергетических параметров которых не совпадают:

$$J = \frac{N_{\text{пр}}}{\sum_i^I N_{\text{общ}}(i) \cdot (T_{\text{ож}}(i)/T_{\text{н}})} \quad (5)$$

где i - один из I различных вариантов «пространственно-энергетической» формулировки прогноза. Соответственно все величины с индексом i относятся именно к этому варианту. Тогда выражение под знаком суммы даст среднее число "случайно"успешных реализаций прогноза с данными параметрами, а их суммирование по i - общее число случайных угадываний. Смысл J и $N_{\text{пр}}$ остаётся при этом без изменений.

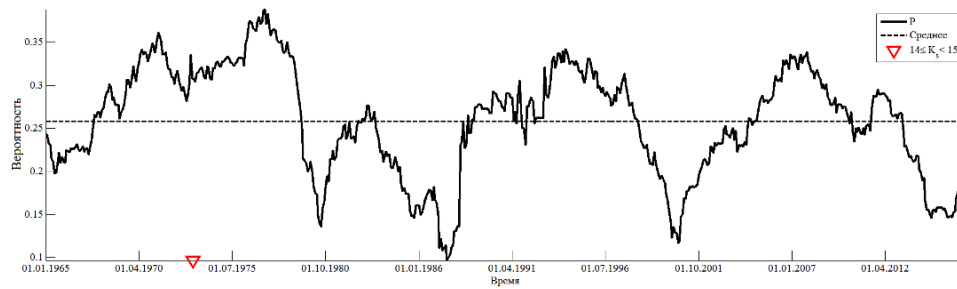


Рис. 3. Временной ряд значений вероятности $P(B)$ при $0 \leq \Delta h_1 < 25$ км для области S_1 .

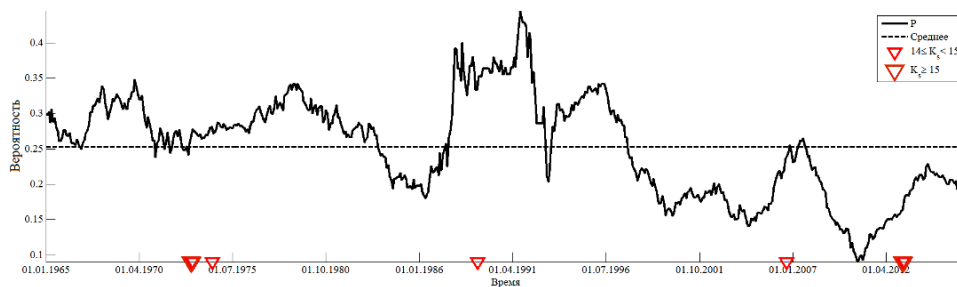


Рис. 4. Временной ряд значений вероятности $P(C)$ при $10 \leq \Delta K_3 < 11$ для области S_1 .

В таблице 2 представлены характеристики информативности прогностических признаков [4].

Таблица 2

Характеристика информативности прогностического признака

Характеристика информативности прогностического признака	Эффективность, J
Бесполезный (использование данного признака не приведёт к заметному улучшению прогноза)	< 1.2
Не очень полезный (признак не очень информативен, но его не следует сразу отбрасывать, т.к. он окажется эффективным в сочетании с другими признаками)	$\cong 1.2$
Полезный	$1.5 - 2.0$
Весьма полезный	> 2.7

Для оценки сейсмопрогностической информативности предвестника сильного землетрясения, в работах [6, 7] были использованы понятия его эффективности и надёжности. Эффективностью предвестника V называют соотношение

$$V = \frac{n(sA)}{n(A)} \quad (6)$$

где $n(sA)$ - количество аномалий, предваряющих землетрясение, $n(A)$ - количество выделенных аномалий. Надёжностью предвестника R называют соотношение

$$R = \frac{n(sE)}{n(E)} \quad (7)$$

где $n(sE)$ - число землетрясений, которые были спрогнозированы с помощью рассматриваемого предвестника, $n(E)$ - общее количество землетрясений, которые должны были быть спрогнозированы.

В данном исследовании эффективность прогностических признаков вычислялась как для аномалий в периоды сейсмической активизации, так и для аномалий в периоды сейсмического затишья, которые могли бы предшествовать сильным землетрясениям с энергетическим классом $K_S \geq 14$. Периодами сейсмической активизации, при анализе значений временных рядов вероятностей P , считались интервалы времени, в течение которых значения вероятностей превышали уровень тревоги $P_{\text{тр.1}} = M(P) + \sigma(P)$. Периодами сейсмического затишья считались интервалы времени, в которых значения временных рядов вероятностей были ниже уровня тревоги $P_{\text{тр.2}} = M(P) - \sigma(P)$. При этом величины $M(P)$ и $\sigma(P)$ являются математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением вероятностей рассматриваемых случайных событий. Согласно работе [10] время проявления предвестников с энергетическим классом $K = 12.5 \div 16.5$ составляет $T = 0.6 \div 12$ лет. В качестве времени ожидания $T_{\text{ож}}$ сильного землетрясения с $K_S \geq 14$ рассматривались интервалы времени, которые принимали значения от 1 года до 10 лет с шагом в 1 год. Начало периода тревоги выбиралось таким образом, чтобы оно совпадало с моментом превышения исследуемым прогностическим признаком уровня тревог $P_{\text{тр.1}}$ в случае сейсмической активизации, или в случае сейсмического затишья совпадало с моментом, когда значения прогностического признака становились ниже уровня тревоги $P_{\text{тр.2}}$. Из всех полученных значений параметра J , вычисленных для всех периодов ожидания $T_{\text{ож}}$, для дальнейшего анализа выбиралось только максимальное значение.

Результаты исследования

В таблицах 3-7 представлены результаты вычислений по соотношению (4) значений эффективности прогноза J для вероятностей P случайных событий A , B и C .

В таблице 3 представлены максимальные значения прогностической эффективности J для параметра $P(A)$, вычисленных как для периодов сейсмической активизации так и для периодов сейсмических затиший. Наибольшей эффективностью J

Таблица 3

Информативность J прогностического признака $P(A)$ в периоды сейсмической активизации и сейсмического затишья.

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
J (сейсмическая активизация)	2.7	7.7	1.1	0	5	3.6
J (сейсмическое затишье)	0.8	0.9	2.2	0	2.9	0.6

прогностический параметр $P(A)$ в периоды сейсмической активизации обладает для

областей S_1 , S_2 , S_5 и S_6 в периоды ожидания $T_{ож}$ равные 5, 1, 1 и 5 лет соответственно. Для областей S_3 и S_4 информативность J параметра $P(A)$ бесполезная для всех рассматриваемых периодов ожидания $T_{ож}$. Во всех шести областях было выявлено 18 аномалий сейсмической активизации, 10 из которых предшествовало 16 землетрясениям с $K_S \geq 14$. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.55$, а надёжность предвестника равна $R = 0.48$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(A)$ во всех рассматриваемых областях согласно (5) составила 2.2, следовательно данный прогностический параметр в периоды сейсмической активизации обладает полезной информативностью.

При аномалиях сейсмического затишья параметр $P(A)$, как прогностический признак, полезен для области S_3 при $T_{ож} = 3$ года и весьма полезен для области S_5 при $T_{ож} = 5$ лет. Для областей S_1 , S_2 , S_4 и S_6 параметр $P(A)$ прогностической информативностью не обладает. Во всех шести областях было выявлено 19 аномалий сейсмического затишья, 11 из которых предшествовало 12 землетрясениям с $K_S \geq 14$, следовательно эффективность предвестника составила $V = 0.57$, а надёжность предвестника равна $R = 0.36$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(A)$ для всех областей, вычисленная по формуле (5) составила 1.4, т.е. данный параметр для прогноза является не очень полезным. Таким образом, прогностическая эффективность параметра $P(A)$ в периоды сейсмической активизации выше, чем в периоды сейсмического затишья.

В таблице 4 представлены максимальные значения прогностической эффективности J для прогностического признака $P(B)$ в периоды сейсмической активизации, вычисленного для интервалов глубины Δh_1 , Δh_2 и Δh_3 в областях S_1, S_2, \dots, S_6 .

Таблица 4

Информативность J прогностического признака $P(B)$ в периоды сейсмической активизации.

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$J, 0 \leq \Delta h_1 < 25$ км	17.6	–	5.1	4.1	0	2.2
$J, 25 \leq \Delta h_2 < 50$ км	1.7	5	3.1	–	5.2	3.6
$J, 50 \leq \Delta h_3 < 100$ км	6.3	–	–	–	8.3	0

Как видно из таблицы 4, прогностический признак $P(B)$ для интервала глубины Δh_1 обладает наибольшей прогностической информативностью для областей S_1 и S_3 при периодах ожидания $T_{ож}=1$ год и для областей S_4 и S_6 при $T_{ож}$ равных 7 и 9 лет соответственно. Для областей S_2 и S_5 данный прогностический признак не информативен. Во всех областях было выявлено 19 аномалий, 6-ти из которых можно сопоставить 5 землетрясений из 9 произошедших в интервале глубины Δh_1 . Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.26$, а надёжность предвестника равна $R = 0.55$. Эффективность прогноза J для параметра $P(B)$ в интервале Δh_1 для всех рассматриваемых областей согласно формуле (5) составила 2.15.

Прогностический признак $P(B)$ для интервала глубины Δh_2 наиболее информативен в областях S_1, S_2, S_3, S_5 и S_6 для периодов ожидания 9, 2, 5, 1 и 10 лет соответственно. Для S_5 данный признак бесполезным. Во всех областях было выявлено 26 аномалий, 9 из которых предшествовали 12 землетрясениям с $K_S \geq 14$. При этом в интервале глубины Δh_2 было зафиксировано 15 землетрясений с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность данного предвестника составила $V = 0.35$, а его надёжность

равна $R = 0.8$. Эффективность прогноза J для параметра $P(B)$ в интервале глубины Δh_2 для всех рассматриваемых областей, вычисленная по формуле (5) составила 2.9.

Прогностический признак $P(B)$ для интервала глубины Δh_3 наиболее информативен в областях S_1 и S_5 для периодов ожидания 4 года. Для областей S_2 , S_3 , S_4 и S_6 данный признак оказался бесполезным. Всего было обнаружено 8 аномалий, 3 из которых предшествовали 7-ми землетрясениям с $K_S \geq 14$. Всего в интервале глубины Δh_3 было зафиксировано 9 землетрясений с $K_S \geq 14$. Таким образом эффективность предвестника составила $V=0.375$, а надёжность предвестника равна $R=0.78$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(B)$ в интервале Δh_3 для всех областей, вычисленная по формуле (5) составила 6.2.

Анализ прогностической эффективности параметра $P(B)$ показал, что при аномалиях сейсмической активизации для всех рассматриваемых интервалов глубины Δh_1 , Δh_2 и Δh_3 данный прогностический параметр является полезным.

В таблице 5 представлены максимальные значения прогностической эффективности J для параметра $P(B)$ в периоды сейсмического затишья, вычисленного для интервалов глубины Δh_1 , Δh_2 и Δh_3 в областях S_1, S_2, \dots, S_6 .

Таблица 5

Информативность J прогностического признака $P(B)$ в периоды сейсмического затишья.

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$J, 0 \leq \Delta h_1 < 25$ км	0	–	0.5	0	14.9	1
$J, 25 \leq \Delta h_2 < 50$ км	8	4.3	2.4	–	5.7	2.4
$J, 50 \leq \Delta h_3 < 100$ км	0	–	–	–	0	0

Из таблицы 5 следует, что параметр $P(B)$ для интервала глубины Δh_1 имеет наибольшую прогностическую эффективность только для области S_5 при периоде ожидания $T_{ож} = 2$ года. Для областей S_1, S_2, S_3, S_4, S_6 данный параметр бесполезен. Всего было выявлено 19 аномалий, 3 из которых можно сопоставить 3 землетрясениям из 9 произошедших в интервале Δh_1 . Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.16$, а надёжность предвестника равна $R = 0.33$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(B)$ в интервале глубины Δh_1 для всех областей согласно формуле (5) составила 0.8.

Прогностический признак $P(B)$ для интервала глубины Δh_2 наиболее информативен в областях S_1, S_2, S_3, S_5 и S_6 для периодов ожидания 5, 1, 2, 1 и 3 года соответственно. Для S_5 данный признак оказался бесполезным. Всего было обнаружено 24 аномалий затишья, 6 из которых предшествовали 7 из 15 землетрясений с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность предвестника составила $V=0.25$, а надёжность предвестника равна $R=0.47$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(B)$ в интервале Δh_2 для всех областей, вычисленная по формуле (5) составила 4.3.

Прогностический признак $P(B)$ для интервала глубины Δh_3 бесполезен для прогноза во всех рассматриваемых областях S_i . Для этого параметра было обнаружено 7 ложных аномалий затишья. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0$, надёжность предвестника $R = 0$ и эффективность прогноза $J = 0$.

Анализ прогностической эффективности параметра $P(B)$ при аномалиях сейсмического затишья показал, что для интервала глубины Δh_2 данный параметр является весьма полезным, а для интервалов Δh_1 и Δh_3 он является бесполезным.

В таблице 6 представлены максимальные значения эффективности J для прогностического признака $P(C)$ в периоды сейсмической активизации, вычисленного для интервалов энергетического класса $\Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3, \Delta K_4, \Delta K_5$ и ΔK_6 в областях S_1, S_2, \dots, S_6 .

Таблица 6

Информативность J прогностического признака $P(C)$ в периоды сейсмической активизации.

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$J, 9 \leq \Delta K_1 < 10$	2	5.2	0.9	6.4	1.2	2.3
$J, 9 \leq \Delta K_2 < 11$	1.8	6.6	0.6	9.5	1.2	1.5
$J, 10 \leq \Delta K_3 < 11$	1.1	0.6	2	0	4.2	1
$J, 10 \leq \Delta K_4 < 14$	1.5	0.7	2.8	0	3.1	0.6
$J, 11 \leq \Delta K_5 < 14$	2.4	0.9	0.7	1.9	0.9	2.9
$J, 12 \leq \Delta K_6 < 14$	5	2.5	1.4	0	1.4	1.1

Как видно из таблицы 6, прогностический параметр $P(C)$ для ΔK_1 наиболее информативен для областей S_1, S_2, S_4 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 5, 2, 1 и 2 года соответственно. Для областей S_3 и S_5 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 38 аномалий, 14 из которых можно сопоставить 19 землетрясениям. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.36$, а надёжность предвестника равна $R = 0.58$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_1 по всем областям согласно формуле (5) составила 1.9.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_2 информативен для областей S_1, S_2, S_4 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 8, 2, 1 и 2 года соответственно. Для областей S_3 и S_5 данный прогностический признак бесполезен. Всего было выявлено 32 аномалий, 12 из которых можно сопоставить 17 землетрясениям из 33 произошедших. Следовательно, эффективность предвестника составила $V = 0.29$, а надёжность предвестника равна $R = 0.33$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_2 по всем областям, вычисленная по формуле (5), составила 1.6.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_3 информативен для областей S_3 и S_5 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 2 и 1 год соответственно. В областях S_1, S_2, S_4 и S_6 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 29 аномалий, 9 из которых можно сопоставить 12 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.3$, а надёжность предвестника равна $R = 0.36$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_3 по всем областям, вычисленная по формуле (5), составила 1.2.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_4 информативен для областей S_1, S_3 и S_5 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 5, 1 и 1 год соответственно. В областей S_2, S_4 и S_6 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 27 аномалий, 7 из которых можно сопоставить 10 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность предвестника составила $V = 0.26$, а надёжность предвестника равна $R = 0.3$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_4 по всем областям, вычисленная по формуле (5), равна 1.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_5 информативен для областей S_1, S_4 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 1, 9 и 1 год соответственно. В областей S_2, S_3 и S_5 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 26 аномалий, 6 из которых можно сопоставить 7 землетрясениям из 33 произошедших

с $K_S \geq 14$. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.23$, а надёжность предвестника равна $R = 0.21$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_5 по всем областям, вычисленная по формуле (5), составила 1.3.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_6 информативен для областей S_1 и S_2 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 1 и 5 лет соответственно. В областей S_3, S_4, S_5 и S_6 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 32 аномалий, 10 из которых можно сопоставить 13 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность предвестника составила $V = 0.31$, а надёжность предвестника равна $R = 0.39$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_6 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 1.7.

Анализ прогностической эффективности параметра $P(C)$ в периоды сейсмической активизации показал, что данный параметр информативен для интервалов энергетического класса $9 \leq \Delta K_1 < 10$, $9 \leq \Delta K_2 < 11$ и $12 \leq \Delta K_1 < 14$. При этом наибольшие значения параметры V , R и J принимают для интервала $9 \leq \Delta K_1 < 10$.

В таблице 7 представлены максимальные значения эффективности J для прогностического признака $P(C)$ в периоды сейсмической активизации, вычисленного для интервалов энергетического класса $\Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3, \Delta K_4, \Delta K_5$ и ΔK_6 в областях S_1, S_2, \dots, S_6 .

Таблица 7

Информативность J прогностического признака $P(C)$ в периоды сейсмического затишья.

Область	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$J, 9 \leq \Delta K_1 < 10$	1.5	0.7	2.8	0	3.1	0.6
$J, 9 \leq \Delta K_2 < 11$	2.4	0.9	0.7	2	0.9	2.9
$J, 10 \leq \Delta K_3 < 11$	2.2	4.8	1.7	7.3	1.6	2.5
$J, 10 \leq \Delta K_4 < 14$	2	5.2	0.9	6.4	1.3	2.3
$J, 11 \leq \Delta K_5 < 14$	1.8	6.6	0.6	9.5	1.2	1.5
$J, 12 \leq \Delta K_6 < 14$	1.9	1	1.2	0.8	2.3	2.5

Как видно из таблицы 7, в периоды сейсмического затишья прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_1 наиболее полезен для областей S_1, S_3 , и S_5 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 5, 1 и 1 год соответственно. Для областей S_2, S_4 и S_6 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 27 аномалий, 7 из которых можно сопоставить 10 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.26$, а надёжность предвестника равна $R = 0.3$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_1 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 1.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_2 наиболее информативен для областей S_1, S_4 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 1, 9 и 1 год соответственно. В областей S_2, S_3 и S_5 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 26 аномалий, 6 из которых можно сопоставить 7 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность предвестника составила $V = 0.23$, а надёжность предвестника равна $R = 0.21$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_2 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 1.3.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_3 информативен для всех областей S_1, S_2, \dots, S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 5, 2, 6, 1, 6 и 2 года соответственно.

Всего было выявлено 35 аномалий, 15 из которых можно сопоставить 21 землетрясению из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.43$, а надёжность предвестника равна $R = 0.64$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_3 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 2.17.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_4 информативна для областей S_1, S_2, S_4 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 5, 2, 1 и 2 года соответственно. В областей S_3 и S_5 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 38 аномалий, 14 из которых можно сопоставить 19 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность предвестника составила $V = 0.37$, а надёжность предвестника равна $R = 0.58$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_4 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 1.9.

Прогностический параметр $P(C)$ при ΔK_5 информативен для областей S_1, S_2, S_4 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 8, 2, 1 и 2 год соответственно. В областей S_3 и S_5 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 32 аномалий, 12 из которых можно сопоставить 17 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Таким образом, эффективность предвестника составила $V = 0.38$, а надёжность предвестника равна $R = 0.52$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_5 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 1.57.

Прогностический параметр $P(C)$ при для ΔK_6 информативен для областей S_1, S_5 и S_6 при периодах ожидания $T_{ож}$ равных 4, 4 и 2 года соответственно. В областей S_2, S_3, S_4 данный прогностический признак не информативен. Всего было выявлено 41 аномалия, 12 из которых можно сопоставить 19 землетрясениям из 33 произошедших с $K_S \geq 14$. Следовательно, эффективность предвестника составила $V = 0.29$, а надёжность предвестника равна $R = 0.58$. Эффективность прогноза J с помощью параметра $P(C)$ для ΔK_6 по всем областям, вычисленная по формуле (5) составила 1.7.

Из всех рассмотренных интервалов энергетического класса ΔK , в периоды сейсмического затишья прогностический параметр $P(C)$ информативен для интервалов энергетического класса $10 \leq \Delta K_3 < 11$, $10 \leq \Delta K_4 < 14$, $11 \leq \Delta K_5 < 14$ и $12 \leq \Delta K_6 < 14$. При этом наибольшие значения параметры V , R и J принимают для интервала $10 \leq \Delta K_3 < 11$.

Заключение

Применение вероятностных методов к каталогу Камчатских землетрясений позволило задать подмножество случайных событий A , B и C . В ходе статистической обработки каталога, для шести областей, во временном окне $\Delta T = 3$ года с шагом $\Delta t = 1$ месяц на интервале 01.01.1962 – 01.10.2016 гг. были вычислены распределения вероятностей P этих случайных событий. Рассматривая параметры $P(A)$, $P(B)$ и $P(C)$ как прогностические признаки, была произведена оценка их эффективности V , надёжности R и информативности J для землетрясений с $K_S \geq 14$. Согласно полученным результатам, прогностические признак $P(A)$ в периоды сейсмической активизации оценивается как полезный. Прогностический параметр $P(B)$ оценивается как полезный для всех рассмотренных интервалов глубины $0 \leq \Delta h_1 < 25$ км, $25 \leq \Delta h_2 < 50$ км и $50 \leq \Delta h_3 < 100$ км в периоды сейсмической активизации, и для интервала глубины $25 \leq \Delta h_2 < 50$ км в периоды сейсмического затишья. Прогностический параметр $P(C)$, вычисленный в периоды сейсмической активизации показал наилучшую прогности-

ческую эффективность в интервале энергетического класса $9 \leq \Delta K_1 < 10$, а в периоды сейсмического затишья – в интервале $10 \leq \Delta K_3 < 14$. Таким образом, применение вероятностного подхода к каталогу землетрясений позволяет исследовать динамику сейсмического режима и выделять в нём аномальные изменения, предшествующие сильным землетрясениям.

Список литературы

- [1] Богданов В.В., “Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона”, *ДАН*, **408**:3 (2006), 393–397. [Bogdanov V.V., “Verojatnostnaja interpretacija zakona povtorjaemosti zemletrjasenij na primere Kamchatskogo regiona”, *DAN*, 408:3 (2006), 393–397].
- [2] Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., “Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений”, *Вулканология и сейсмология*, 2010, № 6, 52–64. [Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Poljuhova A.L., “Verojatnostnaja model’ sejsmichnosti na primere kataloga Kamchatskih zemletrjasenij”, *Vulkanologija i sejsmologija*, 2010, no 6, 52–64].
- [3] 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. [Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Poljuhova A.L., “Rekurrentnye sootnoshenija raschjota parametrov sejsmicheskogo rezhima na osnove verojatnostnoj interpretacii zakona povtorjaemosti”, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Estestvennye nauki*, 2012, №1, 44–48].
- [4] Завьялов А.Д., *Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация*, Наука, М., 2006, 254 с. [Zav’jalov A.D., *Srednesrochnyj prognoz zemletrjasenij: osnovy, metodika, realizacija*, Nauka, Moskva, 2006, 254].
- [5] Гусев А.А., “Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности”, *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом Камчатки*, Наука, Новосибирск, 1974, 109–119. [Gusev A.A., “Prognoz zemletrjasenij po statistike sejsmichnosti”, *Sejsmichnost’ i sejsmicheskij prognoz, svojstva verhnjej mantii i ih svjaz’ s vulkanizmom Kamchatki*, Nauka, Novosibirsk, 1974, 109–119].
- [6] Кравченко Н.М., “Оценка прогнозной эффективности аномалий сейсмического затишья, выделяемого Z-функцией”, *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*, Труды Четвертой научно-технической конференции (Петропавловск-Камчатский, 29 сентября-05 октября 2013 г.), ФГБУН ГС РАН, Обнинск, 2013, 177–181. [Kravchenko N.M., “Ocenka prognoznoj jeffektivnosti anomalij sejsmicheskogo zatish’ja, vydeljaemogo Z-funkciej”, *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal’nego Vostoka Rossii, Trudy Chetvertoj nauchno-tehnicheskoi konferencii (Petropavlovsk-Kamchatskij, 29 sentjabrja-05 oktjabrja 2013 g.)*, FGBUN GS RAN, Obninsk, 2013, 177–181].
- [7] Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., *Прогнозирование землетрясений на Камчатке*, Светоч Плюс, М., 2011, 304 с. [Chebrov V.N., Saltykov V.A., Serafimova Ju.K., *Prognozirovanie zemletrjasenij na Kamchatke*, Svetoch Pljus, M., 2011, 304].
- [8] Левина В.И. и др., “Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг”, *Вулканология и сейсмология*, 2013, № 1, 41–64. [Levina V.I. i dr., “Sejsmichnost’ Kamchatskogo regiona 1962–2011 gg”, *Vulkanologija i sejsmologija*, 2013, №1, 41–64].
- [9] <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.
- [10] Садовский М.А., Писаренко В.Ф., “Зависимость времени проявления предвестников от силы землетрясения”, *Докл. АН СССР*, **285**:6 (1985), 1359–1361. [Sadovskij M.A., Pisarenko V.F., “Zavisimost’ vremeni projavlenija predvestnikov ot sily zemletrjasenija”, *Dokl. AN SSSR*, 285:6 (1985), 1359–1361].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Богданов В.В. Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // ДАН. 2006. Т. 408. №3. С. 393–397
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
- [5] Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом Камчатки. Новосибирск: Наука, 1974. С.109–119
- [6] Кравченко Н.М. Оценка прогнозной эффективности аномалий сейсмического затихья, выделяемого Z-функцией. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, ФГБУН ГС РАН 29 сентября-05 октября 2013 г. 2013. С. 177–181
- [7] Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. М.: Светоч Плюс. 2011. 304 с.
- [8] Левина В.И. и др. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64
- [9] url: <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>
- [10] Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Зависимость времени проявления предвестников от силы землетрясения // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285. №6. С. 1359–1361

Для цитирования: Богданов В. В., Павлов А. В. Оценка прогностической эффективности параметров вероятностной модели сейсмического режима // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2017. № 1(17). С. 54-67. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-17-1-54-67

For citation: Bogdanov V. V., Pavlov A.V. Estimation of prediction efficiency of seismic regime probabilistic model parameters, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2017, **17**: 1, 54-67. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-17-1-54-67

Поступила в редакцию / Original article submitted: 02.11.2016