

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-59-78

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 551.510.535:519.2:550.34

ПОСТРОЕНИЕ НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ИОНОСФЕРНЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОБЛАСТИ И ВРЕМЕННОГО ПЕРИОДА ОЖИДАНИЯ СИЛЬНЫХ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ *

В. В. Богданов, А. В. Павлов

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

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

В данной работе предпринята попытка объединить сейсмологические и ионосферные прогностические признаки, сопутствующие формированию землетрясений, с целью разработки методики оценки области и временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$). В качестве среднесрочного предвестника предложен сейсмологический параметр, определённый на основе вероятностной модели сейсмического режима Камчатского режима и позволяющий оценить область и вероятность наступления в ней сильного землетрясения. В качестве краткосрочного предвестника с периодом ожидания землетрясений до 5 суток рассмотрен комплекс ионосферных возмущений. Для рассматриваемых предвестников проведена оценка их прогностической эффективности по методикам А.А. Гусева и Г.М. Молчана, а также произведён их совместный анализ перед наступлением землетрясений с $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$), произошедших за период 2009–2018 гг.

Ключевые слова: ионосфера, литосфера, вертикальное радиозондирование, землетрясение, предвестник землетрясений

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2020

*Работа выполнена при частичной поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН "Дальний Восток" на 2018-2020 гг.: проект 18-5-095 "Разработка новых методов комплексного геофизического мониторинга в целях прогноза сильных тектонических землетрясений и предупреждения аварий в промышленных электроэнергетических системах (Раздел 1)"

Введение

В работах [1, 2], были приведены результаты ионосферных наблюдений с целью краткосрочной (3-5 дней) оценки периода ожидания камчатских землетрясений. Одновременно применение теоретико-вероятностного подхода к каталогу Камчатских землетрясений [3, 4] позволило вычислить вероятности попадания сейсмических событий в сейсмофокальную зону Курил и Южной Камчатки и установить для нее рост сейсмической активности (в два раза), происшедший на протяжении 2007–2010 гг. Это позволило определить область ожидания (среднесрочный прогноз) крупных землетрясений. За период с 2011–2013 гг. в этой области произошло 11 сейсмических событий с $K_S \geq 14.0$. Возникает естественная задача объединить сейсмологические и ионосферные предвестниковые прогностические признаки, формирующиеся накануне землетрясений, оценить их прогностическую эффективность с целью разработки методики оценки области и временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$). Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Методика расчёта сейсмического параметра

Исследуемая сейсмоактивная область, расположенная вдоль восточного побережья Камчатки, включающая в себя Южную и Северную сейсмофокальные зоны, разбивается на $m = 12$ неперекрывающихся площадей с размерами $S_i = 150 \times 150$ км (рис. 1). Так как в качестве прогнозируемых землетрясений в данной работе рассматриваются сейсмические события с энергетическим классом $K_S^{пр} \geq 13.5$, следовательно согласно [6] длина разрыва в очагах таких землетрясений $L \geq 11$. Полагая, что линейный размер области подготовки землетрясения составляет порядка 10 длин разрыва, т.е. ~ 110 км, то для расчётов в качестве базового варианта можно выбрать размер пространственной ячейки равным 150×150 км.

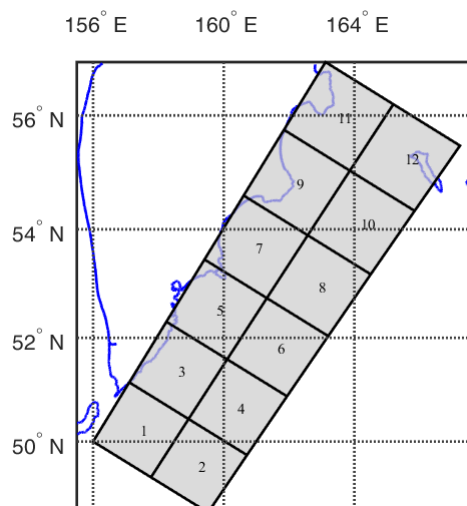


Рис. 1. Разбиение исследуемого сейсмоактивного района на элементарные ячейки с размерами 150×150 км

Сейсмический прогностический параметр, представленный в данной работе, вычисляется на основе распределения вероятностей $P(A)$ случайного события A : «По-

падение эпицентров сейсмических событий, произошедших в выбранном в объёме V , в заданные интервалы широты $\Delta\varphi$ и долготы $\Delta\lambda$. Для расчётов использован каталог землетрясений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" [5] за 1962–2018 гг.

Для каждой площади S_i ($i = \overline{1, m}$) в скользящем временном окне ΔT_k , проходящем с шагом Δt временной интервал T , вычисляется вероятность попадания сейсмических событий $P_k(S_i) = n_{ik}/N_k$, где n_{ik} – число сейсмических событий с энергетическим классом $K_S \geq 9.0$, произошедших в области S_i за период ΔT_k , $N_k = \sum_{k=1}^m n_{ik}$ – суммарное число землетрясений с $K_S \geq 9.0$, произошедших на площади $S = \sum_{i=1}^m S_i$ за время ΔT_k . Также в каждой области S_i вычисляются долговременные (фоновые) значения вероятности попадания сейсмических событий $P_T(S_i) = n_{iT}/N_T$, где n_{iT} – число сейсмических событий с энергетическим классом $K_S \geq 9.0$, произошедших за время T , $N_T = \sum_{k=1}^m n_{Tk}$ – суммарное число землетрясений с $K_S \geq 9.0$, произошедших за T на площади S . В данной работе размер временного окна и шаг его смещения установлены равным соответственно $\Delta T_k = 1$ год и $\Delta t = 1$ месяц, а временной интервал, на котором проводится исследование сейсмического режима, равен $T = 01.01.1962 - 01.01.2019$ гг. На рис. 2, в качестве примера, представлены значения вероятностей попадания сейсмических событий в область S_{12}

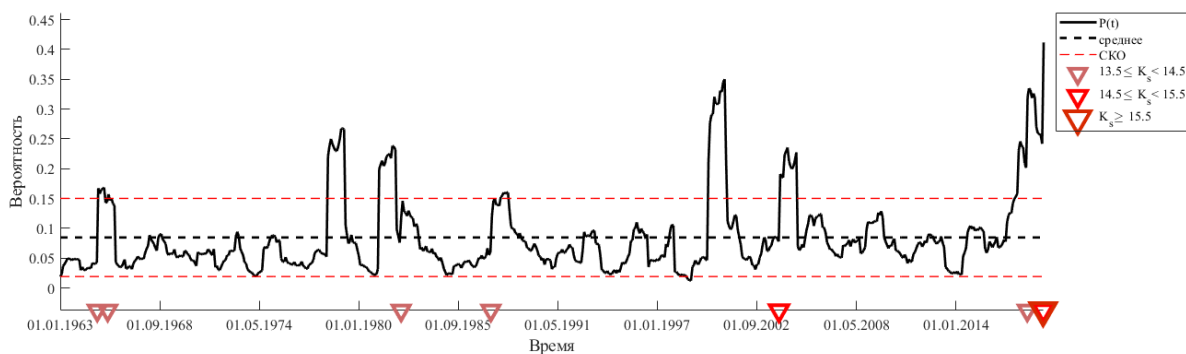


Рис. 2. Временной ряд значений вероятности $P_k(S_{12})$

Для получения статистически значимых отклонений текущих значений вероятностей $P_k(S_i)$ от их долговременных (фоновых) значений $P_T(S_i)$ используется параметр ξ_P , определённый на основе [7] и представленный в виде:

$$\xi_P = \begin{cases} \frac{\Delta P_k - \text{sign}(\Delta P_k) \cdot |\sigma_{P_k}|}{|\sigma_{P_T}|}, & \text{если } |\Delta P_k| > |\sigma_{P_k}| \\ 0, & \text{если } 0 \leq |\Delta P_k| \leq |\sigma_{P_k}| \end{cases} \quad (1)$$

где P_k и $\sigma_{P_k} = \sqrt{(P_k(1 - P_k))/n_k}$ текущие значения вероятности и её стандартное отклонение в скользящем временном окне ΔT_k ; P_T и $\sigma_{P_T} = \sqrt{P_T(1 - P_T)/n_T}$ долговременные значения вероятности и её стандартное отклонение окне $T > \Delta T_k$; n_i и n_T – число сейсмических событий, произошедших соответственно за временные периоды ΔT_k и T ; $\Delta P_k = P_k - P_T$ разность между текущим значением вероятности P_k и долговременным значением P_T .

Сильным землетрясениям могут предшествовать как периоды с усилением сейсмической активности (увеличение числа фоновых событий), так и периоды ослабления сейсмической активности (уменьшение числа фоновых событий). При поиске

периодов активизации сейсмичности за начало аномалии по параметру ξ_P принимается момент появления значений $\xi_P \geq \xi_P^{\text{тр.1}}$, где $\xi_P^{\text{тр.1}}$ – уровень тревоги, выбираемый экспериментально. В случае поиска периодов сейсмических затишья, начало аномалии идентифицируется по моменту появления значений $\xi_P \leq \xi_P^{\text{тр.2}}$, где $\xi_P^{\text{тр.2}}$ уровень тревоги, также выбираемый экспериментально. Соответственно, при $\xi_P^{\text{тр.2}} < \xi_P < \xi_P^{\text{тр.1}}$ полагается, что текущие значения вероятностей существенно не отклоняются от фоновых значений. В данной работе значения критериев для периодов активизации и затишья были установлены соответственно $\xi_P^{\text{тр.1}} = 2$ и $\xi_P^{\text{тр.2}} = -2$.

Для каждой площади S_i , определяется среднее время ожидания землетрясения с прогнозируемым энергетическим классом $K_S \geq K_S^{\text{пп}}$ как для аномалий сейсмической активизации, так и для аномалий сейсмического затишья. Если в области S_i за период наблюдения T произошло N землетрясений с $K_S \geq K_S^{\text{пп}}$, из которых n_a событиям предшествовали аномалии сейсмической активизации и время ожидания от начала j -ой аномалии до наступления землетрясения составило T_{aj} ($j = \overline{1, n_a}$), то среднее время ожидания по данной аномалии составит $\tilde{T}_a = \frac{1}{n_a} \sum_{j=1}^{n_a} T_{aj}$. Аналогично среднее время ожидания по аномалии сейсмического затишья можно определить как $\tilde{T}_c = \frac{1}{n_c} \sum_{l=1}^{n_c} T_{cl}$, где n_c – число землетрясений с $K_S \geq K_S^{\text{пп}}$, произошедших после сейсмического затишья; T_{cl} – время ожидания от начала l -ой аномалии до наступления землетрясения ($l = \overline{1, n_c}$). При вычислении среднего времени ожидания ложные аномалии (не завершившиеся землетрясениями) не учитываются, а периоды ожидания от аномалий разного типа не перекрываются. Таким образом, время ожидания по аномалиям активизации и затишья с учётом среднеквадратичного отклонения можно соответственно представить в виде: $T_a^{\text{ож}} = \tilde{T}_a \pm \sigma_{T_a}$ и $T_c^{\text{ож}} = \tilde{T}_c \pm \sigma_{T_c}$. Средний период ожидания землетрясения по всем аномалиям как по активизации, так и затишья: $\tilde{T}_{\text{ож}} = \frac{1}{n_a + n_c} (\sum_{j=1}^{n_a} T_{aj} + \sum_{l=1}^{n_c} T_{cl})$. На рисунке 3 представлены временные значения параметра ξ_P для области S_{12} и отмечены периоды, на основе которых вычислялись $T_a^{\text{ож}}$ и $T_c^{\text{ож}}$.

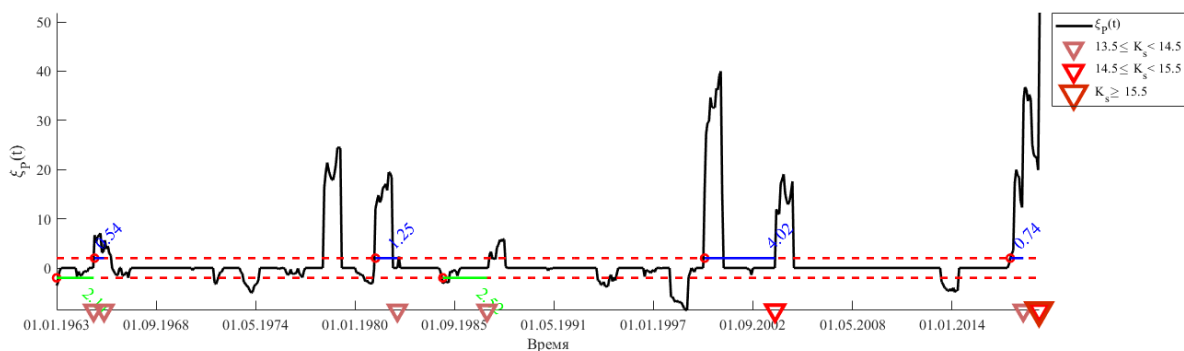


Рис. 3. Временные значения параметра ξ_P для области S_{12} . Красными треугольниками на временной оси отмечены землетрясения с $K_S \geq 13.5$. Синим цветом отмечены длительность периодов ожидания ЗТ $K_S \geq 13.5$ при идентификации аномалии активизация сейсмического режима, зелёным цветом – длительность периодов ожидания землетрясений при идентификации аномалии затишья сейсмического режима

Оценка эффективности прогностического признака ξ_P

Согласно предыдущему параграфу периоды ожидания землетрясения с $K_S \geq K_S^{pp}$ в каждой из рассматриваемых областей S_i принимаются равным $T_a^{ож} = \tilde{T}_a \pm \sigma_{T_a}$ (сейсмическая активизация) и $T_c^{ож} = \tilde{T}_c \pm \sigma_{T_c}$ (сейсмическое затишье). Для каждого типа аномалии на площади S_i производится подсчёт числа событий n_a и n_c , попавших соответственно в периоды ожидания $T_a^{ож}$ и $T_c^{ож}$. Если сейсмическое событие прогнозируемого энергетического класса произошло в течение периода ожидания, то аномалия считается реализованной и землетрясение считается спрогнозированным. Если в течение периода ожидания не произошло ни одного события, то аномалия считается ложной. Если временной промежуток между несколькими аномалиями одного типа не превышал одного года, то они рассматривались в качестве единой аномалии. Для каждого типа аномалии для каждой площади вычисляется общее время ожидания прогнозируемого землетрясения, включающее в себя как периоды ожидания от реализованных аномалий, так и периоды ожидания от ложных аномалий. Например, если в исследуемой области за периода наблюдения T произошло n_i сейсмических событий, z из которых было спрогнозировано и при этом было выявлено a аномалий сейсмического режима, то общее время ожидания землетрясений можно представить в виде: $T_i^{ож} = \sum_{j=1}^z T_j^{pp} + \sum_{u=1}^{a-z} T_u^{fa}$, где T_j^{pp} – длительность периода от начала аномалии до j -го спрогнозированного землетрясения, T_u^{fa} – длительность периода ложных тревог. На основе определённых для каждой площади S_i периодов ожидания $T_i^{ож}$ вычисляется среднее время ожидания для всех рассматриваемых областей: $\tilde{T}_{ож} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m T_k^{ож}$, где m – число площадей.

Для оценки прогностической эффективности прогностического признака ξ_P применялись следующие параметры: надёжность R , достоверность V , эффективность по методикам А.А. Гусева и Г.М. Молчана.

Надёжность предвестника R определяется как отношения количества землетрясений $n(E_A)$, для которых был выделен предвестник, к числу всех землетрясений $n(E)$ [8]:

$$R = \frac{n(E_A)}{n(E)}. \quad (2)$$

Достоверность предвестника V определяется как отношение числа предвестниковых аномалий $n(A_E)$ к общему числу выделенных аномалий $n(A)$ [8]:

$$V = \frac{n(A_E)}{n(A)}. \quad (3)$$

Эффективность прогностического признака ξ_P (по отдельности для аномалий сейсмической активизации или затишья) на основе методики А.А. Гусева [9] вычисляется по формуле:

$$J_G = \frac{n/T_{тр}}{N/T}, \quad (4)$$

где $n = \sum_{i=1}^m n_i$ – суммарное число спрогнозированных землетрясений с $K_S \geq K_S^{pp}$, $N = \sum_{i=1}^m N_i$ – суммарное число землетрясений с $K_S \geq K_S^{pp}$, $T_{тр}$ – общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга), T – период наблюдения, m – число площадей. В случае отсутствия связи "землетрясение-предвестник т.е. при случайном угадывании, эффективность J_G равна 1.

Эффективность прогностического признака ξ_P на основе методики Г.М. Молчана [10] вычисляется по формуле:

$$J_M = 1 - \nu - \tau, \quad (5)$$

где $\nu = 1 - n/N$ – доля пропусков цели, $\tau = T_{\text{тр}}/T$ – относительный объём тревог.

Результаты оценки прогностической эффективности параметра ξ_P для землетрясений $K_S \geq 13.5$, вычисленные по формулам (2-5) представлены в таблице 1 и на диаграмме ошибок (рис. 4).

Таблица 1

Прогностическая эффективность параметра ξ_P

Тип аномалий сейсмического режима	V	R	J_G	J_M
Сейсмическая активизация ($\xi_P \geq 2$)	0.53	0.5	1.68	0.2
Сейсмическое затишье ($\xi_P \leq 2$)	0.43	0.48	1.87	0.22
Сейсмическая активизация и затишье	0.42	0.8	1.62	0.48

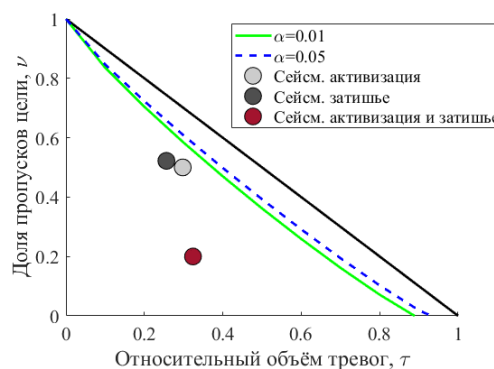


Рис. 4. Диаграмма ошибок для параметра ξ_P при прогнозировании землетрясений с $K_S \geq 13.5$

Как видно из таблицы 1, доля аномалий активизации сейсмического режима, идентифицированных по параметру ξ_P и предшествовавших наступлению землетрясений с $K_S \geq 13.5$ (параметр V), составила 53%, а доля аномалий затишья – 43%. Относительное число аномалий сейсмического режима обоих типов, предшествовавших наступлению землетрясений с $K_S \geq 13.5$, составило 42%. При этом активизация сейсмического режима предшествовала 50% землетрясений, а затишье – 48%. Эффективность прогноза J_G при прогнозировании по обоим типам аномалий составила 1.62. Так как $J_G > 1.5$, то прогностический признак считается информативным и может использоваться в алгоритмах прогноза землетрясений. Эффективность прогноза J_M при прогнозировании по обоим типам аномалий составила 0.53 и как видно по диаграмме ошибок (рис. 4) значения (τ, ν) лежат под нижней границей 99% доверительного интервала (зелёная кривая), что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи между идентифицированными аномалиями сейсмического режима с помощью параметра ξ_P и прогнозируемыми землетрясениями с рассматриваемого диапазона энергетического класса.

Оценка области ожидания, временного периода и вероятности наступления землетрясения с энергетическим классом $K_S \geq K_S^{np}$

Пусть исследуемый сейсмоактивный район разбит на m элементарных ячеек S_i , где $i = \overline{1, m}$, которые образуют область S . Областью ожидания сильного ЗТ будет считаться область $S_{ож}$, включающая в себя элементарные ячейки, в которых были идентифицированы аномалии сейсмического режима по параметру ξ_P : $S_{ож} = \sum_{j=1}^l S_j$, где $l \leq m$ – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_P .

Периодом ожидания сильного ЗТ будет считаться период $\tilde{T}_{ож} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l T_j^{ож}$, где l – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_P , $T_j^{ож} = \tilde{T}_j^{ож} + \sigma_T$ – период ожидания ЗТ в ячейке S_j при идентификации аномальных значений ξ_P , $j = \overline{1, l}$.

Вероятность наступления ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$, вычислялся на основе формулы Байеса, аналогично подходу, принятому в работе [7]. Пусть событие D_1 – наступление землетрясения прогнозируемого класса $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$. Вероятность этого события определяется как $P(D_1) = \frac{n_l}{N}$, где $n_l = \sum_{j=1}^l n_j$ – число ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$, произошедших в области $S_{ож}$ за период наблюдения T , N – число ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$, произошедших в области S за период наблюдения. Тогда событие D_2 – отсутствие ЗТ с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$, вероятность которого $P(D_2) = 1 - P(D_1)$.

Пусть событие E – появление аномальных значений параметра ξ_P . Тогда наступление события E можно представить в виде:

$$E = D_1E + D_2E. \quad (6)$$

Событие D_1E – наступление землетрясения с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$ при идентификации аномалии сейсмического режима (активизации или затишья). Вероятность данного события определяется как $P(D_1E) = P(D_1) \cdot P(E|D_1)$, где $P(E|D_1) = \frac{n_{np}}{N_{S_{ож}}}$ – вероятность наступления сейсмического события при идентификации аномалии сейсмического режима в области $S_{ож}$; n_{np} – число событий с $K_S \geq K_S^{np}$, спрогнозированных при появлении аномалии за период наблюдения T ; $N_{S_{ож}}$ – общее число событий с $K_S \geq K_S^{np}$, произошедших в области $S_{ож}$ за период T .

Событие D_2E – отсутствие землетрясения с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$ при идентификации аномалии сейсмического режима (активизации или затишья). Вероятность данного события определяется как $P(D_2E) = P(D_2) \cdot P(E|D_2)$, где $P(E|D_2) = \frac{n_{fa}}{N_{ta}}$ – вероятность появления аномальных значений параметра ξ_P (ложные тревоги) в области $S_{ож}$, которые не завершились землетрясениями; n_{fa} – число ложных тревог за период наблюдения T ; N_{ta} – общее число случаев аномального поведения параметра ξ_P в области $S_{ож}$ за период T .

Вероятность наступления сейсмического события с $K_S \geq K_S^{np}$ в области $S_{ож}$ (случайное событие D_1), при условии, что в ней идентифицирована аномалия сейсмического режима и объявлен режим тревоги (случайное событие E), вычисляется на основе формулы Байеса:

$$P(D_1|E) = \frac{P(D_1) \cdot P(E|D_1)}{P(D_1) \cdot P(E|D_1) + P(D_2) \cdot P(E|D_2)}. \quad (7)$$

В качестве примера, на рис. 5 представлена карта ожидания землетрясения с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, построенная на начало суток 28.02.2013 г. Цве-

том на карте отмечены области, в которых были идентифицированы аномалии сейсмического режима на основе параметра ξ_P и которые образуют область ожидания $S_{ож}$ сейсмического события. По формуле (7) вероятность наступления землетрясения с $K_S \geq 13.5$ в области $S_{ож}$ составила $P(D_1|E) = 0.7$, период ожидания составил $T_{ож} = 2.3 \pm 1.6$ года. В области S_1 , входящей в область $S_{ож}$, 28.02.2013 г. в 14:05:48 на глубине $h=61$ км произошло сейсмическое событие с энергетическим классом $K_S = 15.2$.

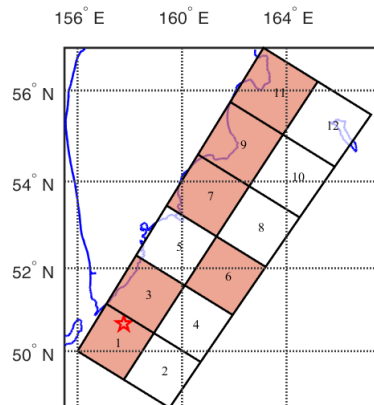


Рис. 5. Карта ожидания землетрясения с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, вычисленная на начало суток 28.02.2013 г

На рис. 6а представлен временной ряд вероятностей $P(D_1|E)$, вычисленных по формуле (7) в скользящем временном окне $\Delta T_k = 1$ год, проходящем с шагом $\Delta t = 1$ месяц временной интервал 2009–2018 гг. На рис. 6б показано относительное число областей, в которых были идентифицированы аномалии сейсмического режима находившихся в режиме ожидания землетрясений. На рис. 6в представлены периоды ожидания $\tilde{T}_{ож} \pm \sigma_T$ землетрясений $K_S \geq 13.5$ в области ожидания $S_{ож}$.

Эффективность прогноза землетрясений с $K_S \geq 13.5$ при выборе в качестве уровней тревоги значений условной вероятности $P(D_1|E) = 0.5$, $P(D_1|E) = 0.7$ и $P(D_1|E) = 0.9$ представлена в таблице 2 и на диаграммах ошибок (рис.7).

Таблица 2

Эффективность прогноза наступления землетрясений с $K_S \geq 13.5$ для различных уровней условной вероятности $P(D_1|E)$.

Уровни условной вероятности $P(D_1 E)$	V	R	J_G	J_M
$P(D_1 E) = 0.5$	1	0.5	1.43	0.15
$P(D_1 E) = 0.7$	1	0.77	1.78	0.34
$P(D_1 E) = 0.9$	1	0.35	0.82	-0.08

Из всех рассмотренных уровней условной вероятности $P(D_1|E)$, наилучшие показатели эффективности достигаются при значении $P(D_1|E) = 0.7$ (рис.7б).

За период наблюдения 2009–2018 гг. в рассматриваемом сейсмоактивном районе произошло 24 землетрясений и их групп с $K_S \geq 13.5$, при этом в область ожидания $S_{ож}$, определённой на основе параметра ξ_P попало 20 сейсмическое событие рассматриваемого диапазона энергий. Вероятность $P(D_1|E)$ наступления землетрясений в области $S_{ож}$ составила 0.79 ± 0.1 .

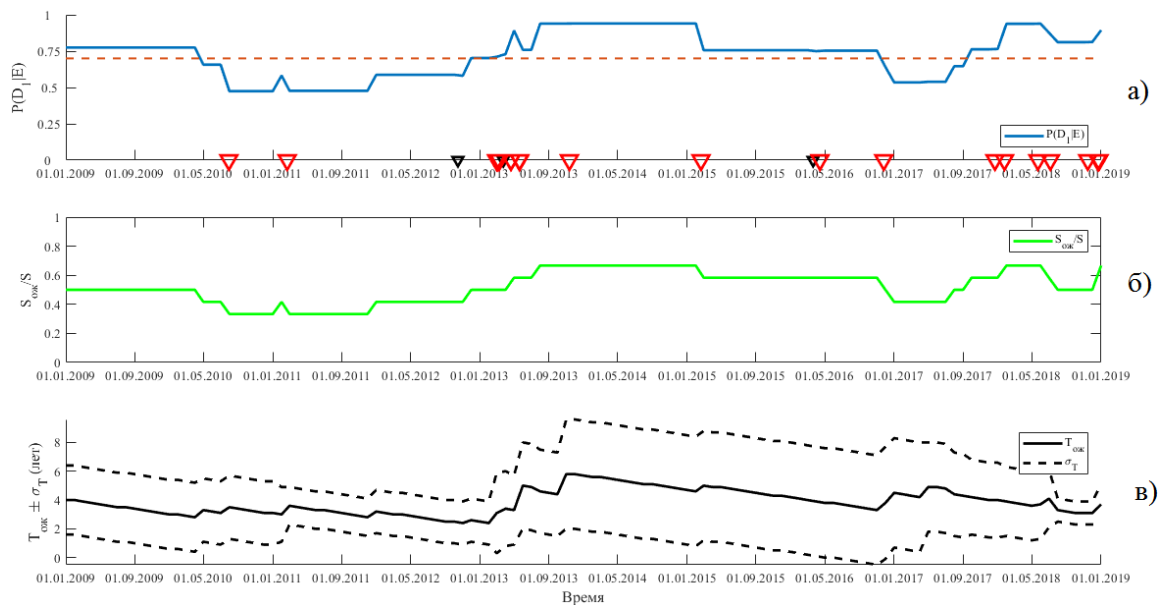


Рис. 6. а) Временной ряд вероятностей $P(D_1|E)$, вычисленных в скользящем временном окне $\Delta T_k = 1$ год, проходящем с шагом $\Delta t = 1$ месяц временной интервал 2009–2018 гг; б) относительное число областей, находившихся в режиме ожидания землетрясений; с) периоды ожидания $\tilde{T}_{ож} \pm \sigma_T$

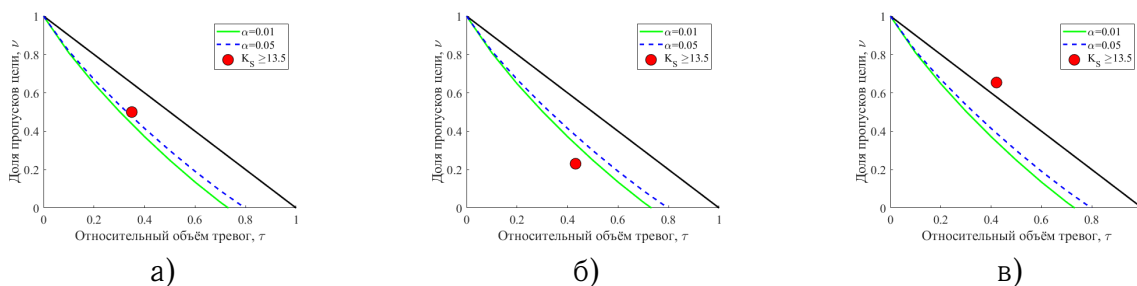


Рис. 7. Диаграммы ошибок при прогнозировании землетрясений с $K_S \geq 13.5$ для различных уровней условной вероятности $P(D_1|E)$: а) $P(D_1|E) = 0.5$; б) $P(D_1|E) = 0.7$; в) $P(D_1|E) = 0.9$

Так как сейсмологический параметр ξ_R является среднесрочным предвестником, для уточнения периода наступления прогнозируемого землетрясения были привлечены краткосрочные ионосферные предвестники с периодом ожидания землетрясения до нескольких суток.

Ионосферные предвестники землетрясений Камчатского региона

Современными исследованиями установлено, что земная кора оказывает влияние на физические процессы, протекающие в верхних геосферных оболочках. Следовательно, в сейсмоактивных регионах любые аномальные изменения в поведении параметров ионосферы, формирующееся на фоне регулярного суточного изменения характеристик ионосферы, обусловленного влиянием Солнца, могут дать информацию о процессах подготовки землетрясений [11–14]. В свою очередь, каждый сейсмоактивный регион характеризуется своими, наиболее информативными особенностями

(аномалиями) в поведении параметров ионосферы, которые могут быть отождествлены с предвестниками землетрясений. В Камчатском регионе к таким особенностям, как показывают многолетние исследования динамики ионосферных параметров накануне землетрясения, можно отнести следующие [1, 2, 15, 16]:

- 1) высыпание от нескольких часов до нескольких суток до землетрясения заряженных частиц из радиационных поясов в ионосферу (образование К-слоя);
- 2) формирование за 1-3 суток до землетрясения диффузионного спорадического слоя Es (Es-spread);
- 3) формирование за 1-5 суток до землетрясения спорадического слоя Es типа г.
- 4) за 1-5 суток на фоне развития магнитной бури (в осенние и весенние периоды) аномальное повышение критической частоты f_oF2 (рост концентрации электронов), превышающее медианные значения (при обычном развитии магнитосферной бури в ионосфере за счет вихревого электрического поля возникает дрейф, который приводит к смещению электронов на большие высоты и к уменьшению их концентрации).
- 5) формирование за 1-3 суток на фоне спокойной магнитосферы диффузионного слоя F2 (F2-spread) длительностью в несколько часов;
- 6) за 1-3 суток расслоение слоя F2 по частоте и высоте (режимы "Н" и "V"), так называемые перемещающиеся ионосферные возмущения.

В качестве примера, на рис. 8 представлены ионограммы, содержащие аномалии, соответствующие особенностям 3) (рис. 8а) и 6) (рис. 8б).

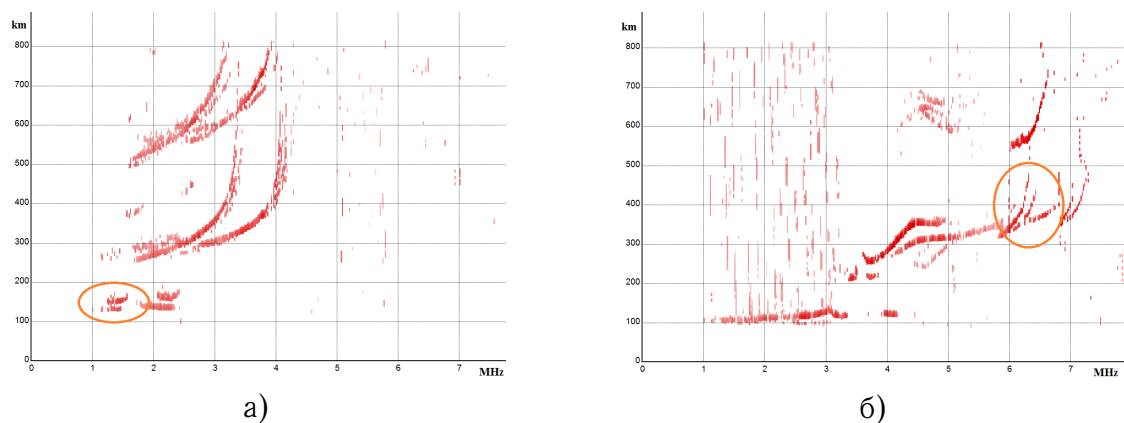


Рис. 8. Примеры аномального поведения параметров ионосферы: а) спорадический слой Es типа г; б) расслоение слоя F2 по частоте (режим "V" перемещающиеся ионосферные возмущения)

В данной работе использованы данные радиофизических наблюдений, выполненные средствами вертикального радиозондирования. Автоматическая ионосферная станция (АИС) вертикального радиозондирования расположена в с. Паратунка ($\varphi = 52.97^\circ \text{ N}$, $\lambda = 158.24^\circ \text{ E}$). Наблюдения проводятся один раз в 15 минут в импульсном режиме на частотах от 1 до 15 МГц.

С целью отбора наиболее эффективных ионосферных предвестников были вычислены параметры V , R , J_G , J_M по формулам (3–5) для сейсмических событий прогнозируемого энергетического класса $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$), произошедших на глубинах до 100 км на расстояниях до $r = 500$ км от пункта ионосферных наблюдений ИКИР ДВО РАН на Камчатке. Период наблюдений был выбран равный 01.01.2013-31.12.2018 гг (весенние и осенние сезоны), период ожидания землетрясений с $K_S \geq 13.5$ был задан равным $T_{ож} = 5$ суток.

Таблица 3

Прогностическая эффективность каждого ионосферного возмущения для землетрясений с $K_S \geq 13.5$

Ион. возм.	К-слой	Es-spread	Es-r	foF2	F2-spread	Рассл. F2 режим ("H")	Рассл. F2 режим ("V")
$n(E_A)$	11	9	13	9	18	13	14
$n(E)$	17	20	18	17	19	17	17
$n(A_E)$	11	9	13	9	18	13	14
$n(A)$	86	47	72	68	63	86	70
V	0.13	0.19	0.18	0.13	0.29	0.15	0.2
R	0.65	0.45	0.72	0.53	0.95	0.76	0.82
J_G	1.25	1.12	1.27	1.52	0.99	1.15	1.47
J_M	0.13	0.05	0.15	0.18	-0.01	0.1	0.26

Как видно из результатов, представленных в таблице 3, наиболее информативными, т.е. с наибольшими значениями параметров J_G и J_M , являются следующие ионосферные предвестники: критическая частота foF2 ионосферного слоя F2, К-слой, расслоение F2 по частоте (режим "V") и спорадический слой Es типа г.

Низкая прогностическая эффективность каждого ионосферного предвестника по отдельности обусловлена тем, что они, с одной стороны, формируются на фоне проявления солнечной активности, а с другой, пока достаточно трудно указать нижний порог магнитуды землетрясения, подготовка которого уже начинает влиять на состояние ионосферы. Прогнозируемые по ионосферным предвестникам и учитываемые в статистике сейсмические события с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, не включают в себя события с энергетическим классом $K_S < 13.5$, хотя ионосферный предвестник и сформировался. Следовательно, появление ионосферного прогностического признака, которые предшествуют событиям с $K_S < 13.5$, являются ложными для событий с $K_S \geq 13.5$, понижая, тем самым, его эффективность.

Так как по отдельности данные ионосферные предвестники не обладают достаточной прогностической эффективностью, то была поставлена задача разработки краткосрочного алгоритма прогноза землетрясений на основе совместного анализа этих ионосферных возмущений.

Метод краткосрочного прогноза землетрясений на основе комплекса ионосферных предвестников

На основе выбранных наиболее эффективных ионосферных предвестников был построен алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений, в котором проводится

совместный анализ рассматриваемых ионосферных возмущений в скользящем временном окне шириной $\Delta T = 5$ суток с шагом $\Delta t = 1$ сутки. Условием для объявления начала периода ожидания сейсмического события было выполнение на временном интервале ΔT как минимум для трёх из четырёх рассматриваемых ионосферных параметров следующих критериев:

- Превышение значений критической частоты f_oF_2 слоя F2 медианных значений f_{med} , вычисленных за предыдущие 30 суток, не менее чем на 20% ($\frac{f_oF_2 - f_{med}}{f_{med}} \geq 0.2$) на фоне развития магнитосферной бури (суммарные значения К-индекса за сутки $\Sigma K \geq 20$);
- Формирование К-слоя в течение как минимум одних суток интервала ΔT ;
- Формирование спорадического слоя Es типа r в течение как минимум одних суток интервала ΔT ;
- Расслоение F2 по частоте (режим "V") в течение как минимум одних суток интервала ΔT .

Продолжительность периода ожидания выбрана равной $T_{ож} = 5$ суток. Для алгоритма была проведена оценка его прогностической эффективности на временном интервале 01.01.2013 – 31.12.2018 гг в весенние и осенние сезоны для сейсмических событий, произошедших на глубинах до 100 км в радиусе $r = 500$ от пункта регистрации ионосферных наблюдений. Результаты проведённой оценки представлены в таблице 4 и рис. 9.

Таблица 4

Прогностическая эффективность комплекса ионосферных предвестников

$n(E_A)$	$n(E)$	$n(A_E)$	$n(A)$	V	R	J_G	τ	ν	J_M
13	17	13	78	0.17	0.76	2.01	0.38	0.24	0.38

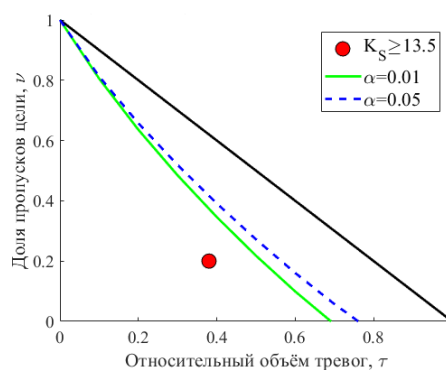


Рис. 9. Диаграмма ошибок для алгоритма по комплексу ионосферных предвестников для $K_S \geq 13.5$. Отмечены нижние границы доверительного интервала случайного прогноза с уровнем значимости $\alpha = 0.01$ и $\alpha = 0.05$

Согласно результатам, представленным в таблице 4, при прогнозировании землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ надёжность составляет 0.8 (т.е. 80% землетрясений имели предвестник), а достоверность – 0.17 (т.е. реализованы 17%

выявленных аномалий). Значение эффективности $J_G = 2.09$ показывает, что прогноз по данной методике статистически значимо и в 2 раза отличается от случайного угадывания. На диаграмме ошибок (рис. 9) значения (τ, ν) , полученные для диапазона $K_S \geq 13.5$ лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого комплекса ионосферных предвестников с землетрясениям данного диапазона энергетического класса, произошедших на расстояниях до 500 км от пункта наблюдения.

Совместный анализ сейсмологического и ионосферных предвестников

Проведём ретроспективный анализ поведения рассмотренных выше предвестников перед наступлением сильных землетрясений.

Таблица 5

Список прогнозируемых землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ за период 2009–2018 гг.

№	Дата ЗТ	Время ЗТ	K_S	S_i	Сейсм. предв. ξ_P		Ион. предвестники
					$P(D_1 E)$	$S_{ож}$	
1	30.07.2010	3:56:10	14.1	S_5	0.66	+	-
2	20.02.2011	21:43:22	14.1	S_{11}	0.58	+	+
3	15.10.2012	01:18:58	13.5	S_4	0.59	-	+
4	28.02.2013	14:05:48	15.2	S_1	0.7	+	+
5	01.03.2013	12:53:49	14.2	S_1	0.71	+	+
		13:20:48	15.1				
6	04.03.2013	20:56:33	13.6	S_1	0.72	+	+
7	09.03.2013	14:56:27	13.7	S_1	0.72	+	-
8	24.03.2013	04:18:33	13.8	S_4	0.51	-	+
9	19.04.2013	19:58:37	13.8	S_1	0.73	+	+
10	20.04.2013	13:12:46	14.8	S_1	0.73	+	+
11	19.05.2013	18:44:07	13.7	S_6	0.89	+	+
		22:40:22	13.5	S_5			
12	21.05.2013	01:55:03	13.6	S_6	0.89	+	+
		03:08:16	13.9	S_5			
		05:43:16	14.4				
13	12.11.2013	07:03:48	15.3	S_9	0.94	+	+
14	19.02.2015	16:32:45	13.8	S_5	0.94	+	+
15	20.03.2016	22:50:16	14.9	S_{10}	0.76	-	+
16	14.04.2016	03:06:07	13.9	S_7	0.75	+	+
17	25.11.2016	07:26:21	13.5	S_7	0.75	-	+
18	22.12.2017	14:44:16	14.2	S_7	0.76	+	+
19	25.01.2018	02:10:30	14.0	S_{12}	0.76	+	-
20	23.05.2018	01:37:44	14.2	S_9	0.94	+	-
21	06.07.2018	01:40:03	14.9	S_3	0.88	+	+
22	14.11.2018	21:21:49	15.0	S_9	0.81	+	+
23	20.12.2018	17:01:53	16.1	S_{12}	0.81	+	+
24	24.12.2018	12:41:18	14.6	S_{12}	0.82	+	-

В таблице 5 представлен список из 24 сейсмических событий и их групп с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, произошедших за период 2009–2018 гг. на глубинах до 100 км в пределах области S (рис. 1), но не более чем в 500 км от пункта ионосферных наблюдений (если в течении одних суток произошло несколько землетрясений, то они рассматривались как одно событие). Для каждого землетрясения, на начало суток, в которых оно произошло, на основе анализа значений параметра ξ_P определялась область ожидания $S_{ож}$ и вычислялась вероятность $P(D_1|E)$ его наступления в области ожидания. В таблице 5 представлены значения вероятностей $P(D_1|E)$, а знаками "+" и "-" отмечены землетрясения, произошедшие соответственно внутри области ожидания $S_{ож}$ и вне её границ. Из всех рассматриваемых сейсмических событий 20 землетрясений попало в область ожидания $S_{ож}$, а 4 события в области, где сейсмическая активность не превышала фоновый уровень (пропуск цели). Средняя вероятность $P(D_1|E)$ наступления землетрясения в области ожидания $S_{ож}$ составила ~ 0.79 . Средняя вероятность $P(D_1|E)$, при которой землетрясение произошло вне области ожидания $S_{ож}$ составила ~ 0.62 .

Число землетрясений с $K_S \geq 13.5$, перед наступлением которых наблюдался комплекс ионосферных возмущений, описанный выше, составило 19 (в таблице 5 они отмечены знаком "+"), при этом 15 из них произошли в области ожидания $S_{ож}$. Перед наступлением пяти землетрясений комплекс ионосферных возмущений не был выявлен или наступил после того, но в те же сутки, что и произошло землетрясение, как, например, для события 23.05.2018 г. с $K_S = 14.2$.

Таким образом, совместный анализ поведения рассмотренных в работе предвестников перед наступлением 24 сейсмических событий с $K_S \geq 13.5$ показал, что 15 из них произошли в области ожидания $S_{ож}$ с вероятностью наступления $P(D_1|E) \geq 0.7$, определённых на основе параметра ξ_P , при этом на временном интервале до пяти суток, предшествующему наступлению этих сейсмических событий, был идентифицирован комплекс ионосферных возмущений.

В общем виде методику определения области и временного периода наступления сейсмического события с $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$) на основе совместного анализа сейсмического параметра ξ_P и комплекса ионосферных предвестников можно представить следующим образом:

- 1) Вычисление сейсмического параметра ξ_P для каждой области S_i на основе формулы 1;
- 2) Вычисление периодов ожидания землетрясений с $K_S \geq 13.5$ при превышении параметром ξ_P заданных уровней тревоги;
- 3) На основе анализа значений ξ_P определение области ожидания $S_{ож}$ и вычисление по 7 условной вероятности $P(D_1|E)$ наступления землетрясения в данной области. Если $P(D_1|E) \geq 0.7$, то объявляется период ожидания сильного землетрясения $\tilde{T}_{ож} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l T_j^{ож}$, где l – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_P , $T_j^{ож}$ – период ожидания ЗТ в ячейке S_j , $j = \overline{1, l}$.
- 4) Анализ ионограмм и определение ионосферных возмущений, обладающих наилучшей прогностической эффективностью;
- 5) Если в течении $\tilde{T}_{ож}$ на временном интервале $\Delta T = 5$ суток зафиксировано появление как минимум трёх из четырёх рассматриваемых ионосферных параметров, то

объявляется период ожидания сильного землетрясения с $K_S \geq 13.5$ продолжительностью $T_{ож} = 5$ суток.

Эффективность прогноза сейсмических событий с $K_S \geq 13.5$ при совместном анализе сейсмического параметра ξ_P (при значениях условной вероятности наступления землетрясений $P(D_1|E) \geq 0.7$) и комплекса ионосферных предвестников в весенние и осенние сезоны за период 2013–2018 гг и за полный период 2015–2018 гг представлена в таблице 6 и диаграмме ошибок (рис. 10).

Таблица 6

Прогностическая эффективность методики на основе совместного анализа сейсмического и комплекса ионосферных предвестников для землетрясений с $K_S \geq 13.5$ в весенние и осенние сезоны за период 2013–2018 гг и за полный период 2015–2018 гг

Период наблюдения	$n(E_A)$	$n(E)$	$n(A_E)$	$n(A)$	V	R	J_G	τ	ν	J_M
2013–2018 гг. (весна,осень)	13	15	11	78	0.14	0.87	2.25	0.39	0.13	0.48
2015–2018 гг.	8	10	8	69	0.12	0.8	2.74	0.29	0.2	0.51

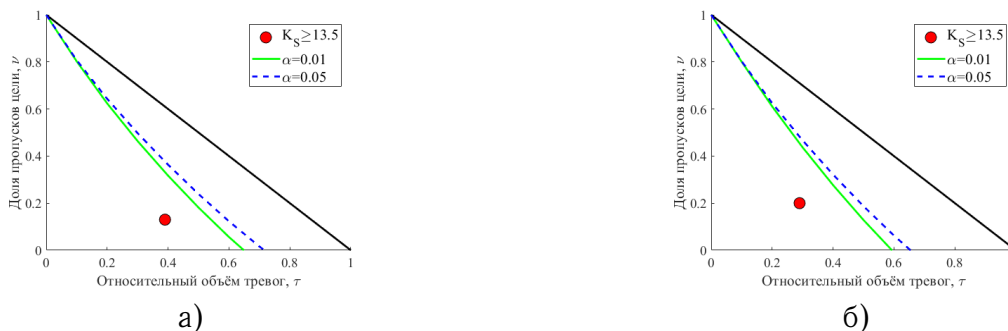


Рис. 10. Диаграмма ошибок для методики на основе совместного анализа сейсмического и комплекса ионосферных предвестников для $K_S \geq 13.5$ за периоды: а) 2013–2018 гг. (весна, осень); б) 2015–2018 гг

Как видно из их результатов, представленных в таблице 6, при применении представленной методики для прогнозирования землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$, значения эффективности $J_G > 2$ говорят о том, что прогноз по данной методике статистически значим и более чем в 2 раза отличается от случайного угадывания. На диаграммах ошибок (рис. 10) значения (τ, ν) , полученные для диапазона $K_S \geq 13.5$ лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого комплекса предвестников с землетрясениями данного диапазона энергетического класса.

Заключение

В работе предложен подход, в котором объединены сейсмологический и ионосферные прогностические признаки с целью оценки областей и временных периодов возникновения землетрясений с $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$) в Камчатском регионе. В качестве сейсмологического предвестника предложен параметр ξ_P , вычисляемый на основе вероятностной модели каталога Камчатских землетрясений и позволяющий в среднесрочной перспективе оценить область и вероятность, с которой может произойти сильное сейсмическое событие в этой области. Анализ прогностической эффективности для землетрясений с $K_S \geq 13.5$ за период 1962–2018 гг. данного параметра показал, что его надёжность $R = 0.8$ (аномальные значения ξ_P предшествовали 80% землетрясений), достоверность $V = 0.42$ (42% идентифицированных аномальных значений ξ_P завершились землетрясениями), эффективность J_G по А.А. Гусеву составила 1.62 (при $J_G > 1.5$ предвестник считается не случайным). Эффективность J_M по Г.М. Молчану составила 0.48, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи между идентифицированными аномалиями сейсмического режима с помощью параметра ξ_P и прогнозируемыми землетрясениями с рассматриваемого диапазона энергетического класса.

В качестве краткосрочного предвестника рассмотрен комплекс ионосферных возмущений: превышение текущих значений критической частоты f_0F2 ионосферного слоя F2 над медианными значениями в периоды возмущённого состояния магнитосферы, K-слой, расслоение F2 (режим "V"), Es типа г. Анализ прогностической эффективности алгоритма на основе комплекса ионосферных возмущений при заданном периоде ожидания $T_{ож} = 5$ суток для землетрясений с $K_S \geq 13.5$ за период 2013–2018 гг в весенние и осенние сезоны показал, что его надёжность $R = 0.8$ (ионосферные предвестники предшествовали 80% землетрясений), достоверность $V = 0.17$ (17% идентифицированных ионосферных возмущений завершились землетрясениями), эффективность J_G по А. А. Гусеву составила 2.09, эффективность J_M по Г. М. Молчану составила 0.42.

Совместный анализ параметра ξ_P и ионосферных предвестников перед наступлением 24 сейсмических событий с $K_S \geq 13.5$ показал, что 15 из них произошли в области ожидания $S_{ож}$ и вероятность их наступления была $P(D_1|E) \geq 0.7$, при этом на временном интервале до пяти суток, предшествующему наступлению этих сейсмических событий, был идентифицирован комплекс ионосферных возмущений.

Эффективность представленной методики определения области и возможного периода наступления сейсмических событий с $K_S \geq 13.5$ при совместном анализе сейсмического параметра ξ_P (при значениях условной вероятности наступления землетрясений $P(D_1|E) \geq 0.7$) и комплекса ионосферных предвестников, вычисленная для весенних и осенних сезонов 2013–2018 гг и за полный период 2015–2018 гг показывает, что прогноз по данной методике статистически значим и более чем в 2 раза отличается от случайного угадывания. Диаграммы ошибок, построенные для данной методики показывают высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого комплекса предвестников с землетрясениями с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$.

Список литературы/References

- [1] Богданов В.В. и др., “Аномальное поведение ионосферных параметров накануне и после серии землетрясений 28.02–01.03.2013 г.”, *Сильные камчатские землетрясения 2013 года*, Новая книга, Петропавловск-Камчатский, 2014, 127–135. [Bogdanov V.V. et al., “Anomal’noe povedenie ionosfernykh parametrov nakanune i posle serii zemletryaseniya 28.02–01.03.2013 g.”, *Sil’nye kamchatskie zemletryaseniya 2013 goda*, Novaya kniga, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2014, 127–135].
- [2] Bogdanov V.V. et al., “Anomalous behavior of ionospheric parameters above the Kamchatka peninsula before and during seismic activity”, *Physics and Chemistry of the Earth*, **98** (2017), 154–160.
- [3] Богданов В.В., “Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона”, *ДАН*, **408**:3 (2006), 393–397. [Bogdanov V.V., “Veroyatnostnaya interpretatsiya zakona povtoryaemosti zemletryaseniya na primere Kamchatskogo regiona”, *Doklady Akademii Nauk*, **408**:3 (2006), 393–397 (in Russian)].
- [4] Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., “Вероятностная модель сейсмичности на примере камчатских землетрясений”, *Вулканология и сейсмология*, **4**:6 (2010), 64–74. [Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., “A Probabilistic Model of Seismicity: Kamchatka Earthquakes”, *Journal of Volcanology and Seismology*, **4**:6 (2010), 412–422].
- [5] <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.
- [6] Ризниченко Ю.В., “Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент”, *Исследования по физике землетрясений*, Наука, М., 1976, 9–27. [Riznichenko Yu.V., “Razmery ochaga korovogo zemletryaseniya i seysmicheskiy moment”, *Issledovaniya po fizike zemletryaseniya*, Nauka, M., 1976, 9–27 (in Russian)].
- [7] Завьялов А.Д., *Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация*, Наука, М., 2006, 254 с. [Zav’yalov A.D., *Srednesrochnyy prognos zemletryaseniya: osnovy, metodika, realizatsiya*, Nauka, M., 2006 (in Russian), 254 pp.]
- [8] Салтыков В.А., “О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений”, *Физика Земли*, 2017, № 2, 84–96. [Saltykov V.A., “O vozmozhnosti ispol’zovaniya prilivnoy modulyatsii seysmicheskikh шумов v tselyakh prognoza zemletryaseniya”, *Fizika Zemli*, 2017, № 2, 84–96 (in Russian)].
- [9] 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., “Prognos zemletryaseniya po statistike seysmichnosti”, *Seysmichnost’ i seysmicheskie prognos, svoystva verkhney mantii i ikh svyaz’ s vulkanizmom Kamchatki*, Nauka, Novosibirsk, 1974, 109–119 (in Russian)].
- [10] Molchan G.M., “Strategies in strong earthquake prediction”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **61** (1990), 84–98.
- [11] Сорокин В.М., и др., “Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений”, *Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов*, Докл. конф. (Москва, 2-3 октября 1997), ОИФЗ РАН, Москва, 1998, 64–85. [Strahov V.N., Migulin V.V., Savin A.I., Utkin V.F., Kulikov S.D., Givishvili G.V., Oraevskiy V.N., Pohotelov O.A., Liperovskiy V.A., Reznikov A.E., Bolotov S.M., Maljutin V.N., Gufel’d I.L., Pirogov Ju.A., “Obzor modeley litosferno-ionosfernykh svyazey v periody podgotovki zemletryaseniya”, *Kratkiy prognos katastroficheskikh zemletrjaseniy s pomoshh’ju radiofizicheskikh nazemno-kosmicheskikh metodov*, Dokl. konf. (Moskva, 2-3 oktjabrja 1997), OIFZ RAN, Moskva, 1998, 155–160 (in Russian)].
- [12] Liperovskaya et al., “Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2009, № 9, 1–7.
- [13] Liperovskaya et al., “Day-time variations of foE connected to earthquakes”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2011, № 8, 1807–1812.
- [14] Богданов В.В. и др., “О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки”, *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН*, КФ ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 2004, 259–278. [Bogdanov V.V. et al., “O vliyanii solnechnoy aktivnosti na atmosferynye i seysmicheskie protsessy Kamchatki”, *Kompleksnyye seysmologicheskie i geofizicheskie issledovaniya*

Kamchatki. K 25-letiyu Kamchatskoy opytно-metodicheskoy seysmologicheskoy partii GS RAN., KF GS RAN, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2004, 259–278].

- [15] Bogdanov V.V., Pavlov A.V., “Estimation of the efficiency of the earthquake prediction on the basis of the analysis of ionospheric parameters”, *E3S Web of Conferences*, **20** (2017), 03001.
- [16] Bogdanov V.V., Pavlov A.V., “Analysis of the efficiency of earthquake prediction based on the anomalous behavior of ionospheric parameters on the eve of earthquakes in the Kamchatka region”, *E3S Web of Conferences*, **62** (2018), 03001.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Богданов В.В. и др. Аномальное поведение ионосферных параметров накануне и после серии землетрясений 28.02–01.03.2013 г. // Сильные камчатские землетрясения 2013 года. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. С. 127–135.
- [2] Bogdanov V.V. et al. Anomalous behavior of ionospheric parameters above the Kamchatka peninsula before and during seismic activity // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2017. vol. 98. pp. 154–160.
- [3] Богданов В.В. Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // ДАН. 2006. Т. 408. №. 3. pp. 393–397.
- [4] Богданов В. В., Павлов А. В., Полюхова А. Л. Вероятностная модель сейсмичности на примере камчатских землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 2010. Т. 4. №. 6. 64–74
- [5] <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.
- [6] Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // *Исследования по физике землетрясений*. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- [7] Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- [8] Салтыков В. А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // *Физика Земли*. 2017. №2. С. 84–96.
- [9] 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.
- [10] Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. vol. 61. pp. 84–98.
- [11] Сорокин В.М., и др. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // *Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов*. Докл. конф. Москва, 2-3 октября 1997. Москва. ОИФЗ РАН. 1998 С. 64–85
- [12] Liperovskaya et al. Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2009. no. 9. pp. 1–7.
- [13] Liperovskaya et al. Day-time variations of foE connected to earthquakes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2011. no. 8. pp. 1807–1812.
- [14] Богданов В. В. и др. О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский. КФ ГС РАН. 2004 С. 259–278.*
- [15] Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Estimation of the efficiency of the earthquake prediction on the basis of the analysis of ionospheric parameters // *E3S Web of Conferences*. 2017. vol. 20. 03001.
- [16] Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Analysis of the efficiency of earthquake prediction based on the anomalous behavior of ionospheric parameters on the eve of earthquakes in the Kamchatka region // *E3S Web of Conferences*. 2018. vol. 62. 03001.

Для цитирования: Богданов В. В., Павлов А. В. Построение на основе сейсмических и ионосферных прогностических признаков методики оценки области и временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2020. Т. 30. № 1. С. 59-78. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-59-78

For citation: Bogdanov V. V., Pavlov A. V. A methodology to estimate a region and waiting period for strong Kamchatka earthquakes based on seismic and ionospheric predictive signs, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **30**: 1, 59-78. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-59-78

Поступила в редакцию / Original article submitted: 30.12.2019

В окончательном варианте / Revision submitted: 30.03.2020

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-30-1-59-78

MATHEMATICAL MODELING

MSC 86A10, 86A15

A METHODOLOGY TO ESTIMATE A REGION AND WAITING PERIOD FOR STRONG KAMCHATKA EARTHQUAKES BASED ON SEISMIC AND IONOSPHERIC PREDICTIVE SIGNS¹

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

In this paper, an attempt is made to combine seismological and ionospheric predictive signs formed on the eve of earthquakes in order to develop a methodology for assessing the region and the time period of waiting for strong Kamchatka earthquakes with energy class $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$). The seismological parameter determined on the basis of the probabilistic model of the seismicity of Kamchatka region and allowing to estimate the region and the probability of occurrence of a strong earthquake in it is proposed as a medium-term precursor. The complex of ionospheric disturbances is considered as a short-term precursor with a waiting period of up to 5 days for earthquakes. The estimation of their prognostic efficiency for the considered precursors is carried out by methods A. A. Gusev and G. M. Molchan, and their joint analysis was performed on the eve of earthquakes with $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$), that occurred in the period 2009–2018.

Key words: ionosphere, lithosphere, vertical radiosonde, earthquake, a precursor of earthquakes.

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2020

¹This work was supported in part by the Comprehensive Program for Fundamental Scientific Research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences "Far East" for 2018-2020: project 18-5-095 "Development of new methods for integrated geophysical monitoring in order to predict strong tectonic earthquakes and prevent accidents in industrial power systems (Section 1)"