


Оценка эффективности прогноза землетрясений в Камчатском регионе по комплексу ионосферных аномалий

В. В. Богданов, А. В. Павлов

Институт космических исследований и распространения радиоволн
ДВО РАН, 684034, с. Паратунка, ул. Мира, 7, Россия
E-mail: sidorov@gmail.com


Существует прямая зависимость между солнечной активностью и процессами в магнитосфере, ионосфере и литосфере Земли. Однако существует и обратная связь, определяющая влияние литосферных процессов сейсмоактивных регионов на физические процессы, протекающие в верхних геосферных оболочках. В сейсмоактивных регионах любые аномальные изменения в поведении параметров ионосферы, которые формируются на фоне регулярного суточного изменения характеристик ионосферы, обусловленного влиянием Солнца, могут дать информацию о процессах подготовки землетрясений. При этом каждый сейсмоактивный регион характеризуется своими, наиболее информативными особенностями (аномалиями) в поведении параметров ионосферы, которые могут быть отождествлены с предвестниками землетрясений. В работе рассмотрены ионосферные возмущения, которые регистрировались в ходе вертикального радиозондирования ионосферы за несколько суток до наступления землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе. Для этих ионосферных возмущений был проведен статистический анализ их прогностической эффективности для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2013–2021 гг. Рассмотрены варианты комплексов ионосферных параметров, имеющих наилучшую прогностическую эффективность, которые могут быть использованы для создания методики краткосрочного прогноза сильных землетрясений. Проведен ретроспективный анализ достоверности, надежности и эффективности прогноза землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ на основе рассматриваемых комплексов ионосферных параметров.

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

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-167-177

Поступила в редакцию: 10.11.2022

В окончательном варианте: 25.11.2022

Для цитирования. Богданов В. В., Павлов А. В. Оценка эффективности прогноза землетрясений в Камчатском регионе по комплексу ионосферных аномалий // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 41. № 4. С. 167-177.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-167-177

Контент публикуется на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2022

Финансирование. Исследования выполнены в рамках реализации государственного задания АААА-А21-121011290003-0

Введение

Ионосфера, как посредник между магнитосферой и атмосферой, представляет собой открытую физическую систему и, помимо регулярных изменений, характеризуется широким спектром неоднородностей, связанных с различными видами воздействий – солнечными и магнитными бурями, метеорологической и сейсмической активностью, термическими приливами.

В сейсмоактивных регионах любые аномальные изменения в поведении параметров ионосферы, формирующиеся на фоне регулярного суточного изменения характеристик ионосферы, обусловленного влиянием Солнца, могут дать информацию о процессах подготовки землетрясений [1, 2, 3]. В свою очередь, каждый сейсмоактивный регион характеризуется своими, наиболее информативными особенностями (аномалиями) в поведении параметров ионосферы, которые могут быть отождествлены с предвестниками землетрясений.

Исследования динамики ионосферных параметров в Камчатском регионе, позволили выделить следующие особенности, появляющиеся от нескольких часов до 5 суток до наступления землетрясений [4, 5, 6, 7]:

1. высыпание заряженных частиц из радиационных поясов в ионосферу (образование К-слоя);
2. формирование диффузионного спорадического слоя Es (Es-spread);
3. экранирование области F нижележащим спорадическим слоем Es (режим A);
4. формирование спорадического слоя Es типа r;
5. повышение значений критической частоты foF2, превышающее медианные значения на фоне развития магнитной бури (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).
6. формирование диффузионного слоя F2 (F2-spread);
7. расслоение следа на ионограммах в области F2 по частоте и высоте (режим H);
8. разветвление следа на ионограммах вблизи критической частоты foF2 (режим V).
9. прерывистый след (явление лакуны), сильный наклон слоя (ненормальный) ход следа вблизи foF2 (режим Y).

В данной работе была проведена оценка прогностической эффективности вышеперечисленных ионосферных аномалий как по отдельности, так и их комплексов из наиболее информативных ионосферных параметров для сейсмических событий с магнитудой $M \geq 6.0$.

Методика исследования

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

Критическая частота $foF2$ слоя F2 рассматривалась как предвестник при условии, что наблюдалось превышение $foF2$ её медианных значений f_{med} , вычисленных за предыдущие 30 суток, не менее чем на 20% ($\Delta foF2/f_{med} \geq 0.2$) на фоне развития магнитосферной бури (суммарные значения индексов геомагнитной активности $\Sigma K \geq 20$).

Для анализа использован каталог землетрясений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" за 2013–2021 гг [8].

С целью отбора наиболее информативных ионосферных предвестников были вычислены следующие параметры: надежность предвестника R , достоверность предвестника V , эффективность предвестника J_G по методике А.А.Гусева, эффективность предвестника J_M по методике Г. М. Молчана.

Надежность предвестника R определяется как отношения количества землетрясений, для которых был выделен предвестник N_+ , к числу всех землетрясений N [9]:

$$R = \frac{N_+}{N}$$

Достоверность предвестника V определяется как отношение числа предвестниковых аномалий $n(A_E)$ к общему числу выделенных аномалий $n(A)$ [9]:

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

Эффективность прогноза по методике А. А. Гусева вычисляется для конкретной пространственной области и определённого энергетического диапазона землетрясений по формуле [10]:

$$J_G = \frac{N_+/T_{тр}}{N/T}$$

где T – общее время мониторинга сейсмической обстановки; N_+ – количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу за время T ; N – общее количество произошедших землетрясений (имеющих пространственно-временные характеристики, аналогичные прогнозируемым), произошедших за время T ; $T_{тр}$ – общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга). Эффективность J_G показывает, во сколько раз скорость потока спрогнозированных землетрясений превышает среднюю за время наблюдений T , т.е. является отношением вероятности землетрясения во время тревоги к их средней вероятности. В отсутствие связи "землетрясений-предвестник", т.е. при случайном угадывании, эффективность J_G равна 1.

Эффективность предвестника J_M по методике Г. М. Молчана [11] определяется по формуле

$$J_M = 1 - \nu - \tau$$

где $\tau = T_{\text{тр}}/T$ – мера тревоги; $\nu = 1 - N_+/N$ – доля пропусков цели. Для случайного прогноза $J_M = 0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) – $J_M = 1$. На диаграммах ошибок строится диагональ $\tau + \nu = 1$, которая соединяет точки (0;1) и (1;0) и соответствует случайному прогнозу. Для этой диагонали строятся доверительные интервалы для различных уровней значимости α . Прогноз на диаграмме отмечается точкой с координатами (τ, ν) . Если точка лежит под нижней границей доверительного интервала, то это можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого предвестника с землетрясениями рассматриваемого энергетического диапазона.

Результаты исследования

Результаты расчётов параметров V , R , J_G и J_M для сейсмических событий с магнитудой $M \geq 6.0$, произошедших на глубинах до 100 км на расстояниях до $r = 500$ от пункта ионосферных наблюдений ИКИР ДВО РАН на Камчатке представлены в таблице 1. Период наблюдений ионосферных параметров $T = 2013 - 2021$ гг., период ожидания землетрясений был задан равным $T_{\text{ож}} = 5$ суток.

Таблица 1

Прогностическая эффективность ионосферных возмущений для землетрясений с $M \geq 6.0$ [Predictive efficiency of ionospheric disturbances for earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$]

Ион. возм.	К-слой	Es-r	Es-spread	foF2	A	H,F2	V,F2	Y,F2	F-spread
N_+	26	28	23	20	14	28	31	22	34
N	35	35	35	35	35	35	35	35	35
$n(A_E)$	22	25	23	17	13	25	28	18	33
$N(A)$	549	955	1370	220	872	1628	1454	517	2385
V	0.04	0.03	0.02	0.08	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01
R	0.74	0.8	0.66	0.57	0.4	0.8	0,89	0.63	0.97
J_G	1.35	1.18	0.99	2.09	0.76	1.05	1.17	1.5	1.01
ν	0.26	0.2	0.34	0.43	0.6	0.2	0.11	0.37	0.03
τ	0.55	0.68	0.67	0.27	0.53	0.76	0.76	0.42	0.96
J_M	0.19	0.12	-0.01	0.3	-0.13	0.04	0.13	0.21	0.01

Согласно полученным результатам (таблица 1) наибольшими значениями прогностической эффективности J_G и J_M обладают следующие ионосферные параметры: К-слой, Es типа r, критическая частота foF2 в периоды геомагнитной активности, разветвление и ненормальный ход следа на ионограммах вблизи критической частоты foF2 (режимы V и Y).

Диаграммы ошибок для части ионосферных предвестников с наибольшими значениями J_M для рассматриваемого диапазона магнитуд представлены на рис. 1.

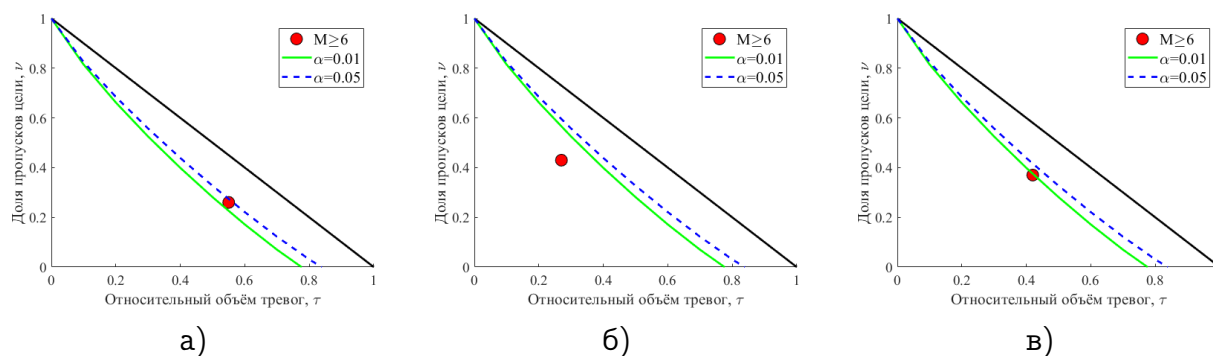


Рис. 1. Диаграммы ошибок для К-слоя (а), критической частоты foF2 (б) и прерывистого хода следа на ионограммах вблизи foF2 (в) при прогнозировании землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ в Камчатском регионе.

[Figure 1. Diagrams of errors for forecasting earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$ in the Kamchatka region based on prognostic features: K-layer (a), critical frequency foF2 (b) and abnormal track pattern on ionograms near foF2 (c).]

Как видно на представленных диаграммах на рис. 1 точки прогнозов лежат ниже 99% доверительного интервала, что говорит о наличии достаточно надежной связи между рассматриваемыми прогностическими признаками и землетрясениями с $M \geq 6.0$.

В то же время рассматриваемые прогностические аномалии обладают не достаточно высокой достоверностью V , которая принимает значения от 0.01 до 0.08. С целью повышения эффективности и достоверности прогноза были рассмотрены различные сочетания прогностических признаков.

Для построения методики краткосрочного прогноза землетрясений с $M \geq 6.0$ на основе комплекса прогностических признаков, обладающих наилучшей эффективностью была использована следующая схема: в скользящем временном окне заданной длительностью ΔT , проходящем с заданным шагом Δt временной интервал T , анализируется появление как минимум k из m рассматриваемых прогностических параметров. Условием для объявления начала периода ожидания $T_{ож}$ сейсмического события является выполнение для l ионосферных параметров, где $k \leq l \leq m$, на временном интервале следующих критериев:

- превышение значений критической частоты foF2 слоя F2 медианных значений f_{med} , вычисленных за предыдущие 30 суток, не менее чем на 20% ($\Delta foF2/f_{med} \geq 0.2$) на фоне развития магнитосферной бури (суммарные значения К-индекса за сутки $\Sigma K \geq 20$ в течение как минимум одних суток интервала ΔT ;
- разветвление следа на ионограммах вблизи критической частоты foF2 (режим V) в течение как минимум одних суток интервала ΔT ;

- прерывистый ход следа на ионограммах вблизи foF2 (режим Y) в течение как минимум одних суток интервала ΔT .
- формирование K-слоя в течение как минимум одних суток интервала ΔT ;
- формирование спорадического слоя Es типа r в течение как минимум одних суток интервала ΔT ;

Временное окно установлено равным $\Delta T = 5$ суток, временной шаг $\Delta t = 1$ сутки, продолжительность периода ожидания $T_{ож} = 5$ суток. Если в течение объявленного периода ожидания землетрясения регистрировалось появление очередного комплекса ионосферных возмущений, то период ожидания продливался на величину $T_{ож}$. Оценка прогностической эффективности методики на основе комплекса прогностических признаков проводилась на временном интервале $T = 01.01.2013 - 31.12.2021$ гг. для сейсмических событий $M \geq 6.0$, произошедших на глубинах до 100 км в радиусе $r = 500$ км от пункта регистрации ионосферных наблюдений.

В таблице 2 и на рисунке 2 представлены результаты оценки прогностической эффективности методики при рассмотрении $m = 5$ ионосферных параметров, а условием объявления периода ожидания землетрясения было появление в течение временного интервала ΔT как минимум k из m прогностических признаков, где $k = 3, 4, \dots, m$.

Таблица 2

Прогностическая эффективность комплекса из пяти ионосферных предвестников для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ [Predictive efficiency of a complex of five ionospheric precursors for earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$].

k	N+	N	n(AE)	n(A)	V	R	J _G	τ	ν	J _M
k=3	31	35	27	215	0.13	0.89	1.44	0.62	0.11	0.27
k=4	21	35	18	158	0.11	0.6	1.92	0.31	0.4	0.29
k=5	7	35	7	49	0.14	0.2	2.5	0.08	0.8	0.12

Согласно полученным результатам (табл. 2), при прогнозировании землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ по комплексу ионосферных аномалий параметр эффективности J_G принимает значения от 1.44 при $k = 3$ до 2.5 при $k = 5$. Полученные значения J_G дают основание утверждать, что прогноз по данной методике статистически значим и отличается от случайного угадывания.

На диаграммах ошибок (рис. 2) точки прогноза (τ, ν) лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как достаточно надежную связь рассматриваемого комплекса ионосферных аномалий с землетрясениям с магнитудой $M \geq 6.0$, произошедших на расстояниях до 500 км от пункта ионосферных наблюдений в с. Паратунка. Суммарное время тревог τ при реализации прогноза на основе $k = 3$ прогностических признаков составило 62%, а при $k = 4$ и $k = 5$ соответственно 31% и 8% от всего времени наблюдения $T = 2013-2021$

гг. Увеличение минимального числа k прогностических признаков, используемых в прогнозе, приводит к сокращению суммарного времени ожидания землетрясений τ . Наибольшее число спрогнозированных землетрясений получено при $k = 3$, наименьшее число ложных тревог при $k = 5$. Увеличение минимального числа прогностических признаков k , при котором объявляется прогноз, приводит, с одной стороны, увеличению достоверности прогноза V , т.к. снижается число ложных тревог, но с другой стороны приводит к снижению надежности прогноза R , т.е. к снижению числа спрогнозированных землетрясений.

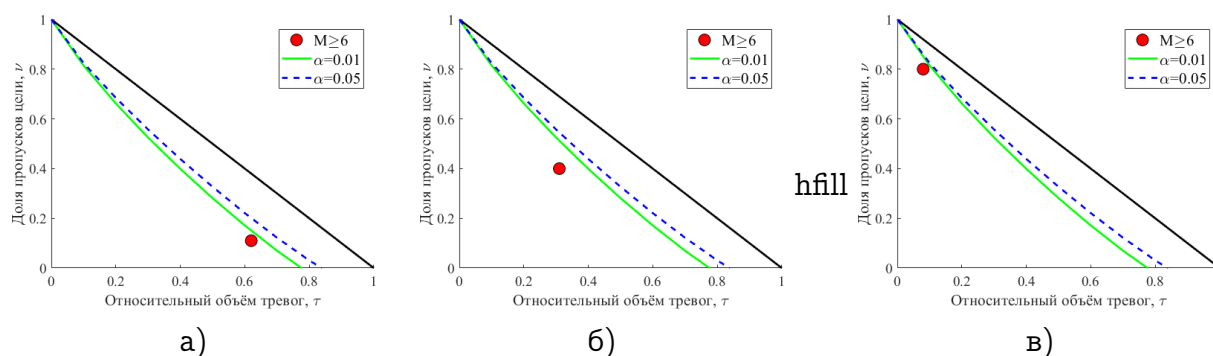


Рис. 2. Диаграммы ошибок методики прогноза на основе комплекса из пяти ионосферных предвестников при различных значениях минимального числа прогностических признаков k при которых объявлялся прогноз землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$: а) $k = 3$; б) $k = 4$; в) $k = 5$.

[Figure 2. Error diagrams of the forecast technique based on a complex of five ionospheric precursors for different values of the minimum number of prognostic features k for which the forecast of earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$ was made: а) $k = 3$; б) $k = 4$; в) $k = 5$.]

Заключение

Проведена оценка прогностической эффективности ионосферных параметров Камчатского региона для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2013—2021 гг. Выделены ионосферные возмущения, обладающие наибольшими значениями эффективности J_G и J_M : К-слой, спорадический слой E_s типа r , положительная аномалия критической частоты $foF2$ ионосферного слоя F2 в периоды геомагнитных возмущений, разветвленный или прерывистый след на ионограммах вблизи критической частоты $foF2$. В работе была предложена методика прогноза на основе комплекса из $m = 5$ прогностических признаков. Ретроспективный анализ прогностической эффективности комплекса ионосферных параметров, проведенный на основе методик А.А. Гусева и Г.М. Молчана показал, что прогноз отличается от случайного угадывания при минимальном числе прогностических параметров $k = 3, 4, \dots, m$, используемых в прогнозе. Дальнейшая работа по повышению достоверности, надежности и эффективности краткосрочного прогноза землетрясений с $M \geq 6.0$ на основе предложенного подхода может быть осуществлена как за счет введения дополнительных критериев для рассматриваемых прогностических па-

раметров, так и привлечением других ионосферных параметров, которые могли бы быть отождествлены с предвестниками землетрясений.


Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.


Список литературы

1. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А. О сейсмических предвестниках в ионосфере, *Физика Земли*, 1983. Т. 10, С. 17–21.
2. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. *Ионосферные предвестники землетрясений*. М.: Наука, 1992. 304 с.
3. Пулинец С. А. и др. *Прогноз землетрясений возможен?!*. М.: Тривант, 2014. 144 с.
4. Богданов В. В. и др. О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки / *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН*. Петропавловск-Камчатский, КОМСП ГС РАН, 2004, С. 259–278.
5. 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.
6. Bogdanov V. V., et. al. Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017. vol. 98, pp. 154–160 DOI: 10.1016/j.pce.2016.04.002.
7. Богданов В. В., Павлов А. В. Динамика поведения ионосферных параметров накануне землетрясений в периоды 28.02.–01.03.2013 г. и 19.05–24.05 2013 г, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2018. Т. 22, № 2, С. 85–99 DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99.
8. Чеброва А. Ю. и др. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции, *Геофизические исследования*, 2020. Т. 21, № 3, С. 66–91 DOI: 10.21455/gr2020.3-5.
9. Салтыков В. А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений, *Физика Земли*, 2017. № 2, С. 84–96.
10. 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.
11. Molchan G. M. Strategies in strong earthquake prediction, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990. vol. 61, pp. 84–98.



Богданов Вадим Васильевич ✉ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-9267-0401.



Павлов Алексей Владимирович ✉ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-5718-1429.

Evaluation of the effectiveness of earthquake prediction in the Kamchatka region based on the complex of ionospheric anomalies


V. V. Bogdanov, A. V. Pavlov

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

E-mail: sidorov@gmail.com

There is a direct relationship between solar activity and processes in the magnetosphere, ionosphere and lithosphere of the Earth. However, there is also a feedback that determines the influence of lithospheric processes in seismically active regions on the physical processes occurring in the upper geospheric shells. In seismically active regions, any anomalous changes in the behavior of the ionospheric parameters that form against the background of a regular daily change in the characteristics of the ionosphere due to the influence of the Sun can provide information about the processes of earthquake preparation. At the same time, each seismically active region is characterized by its own most informative features (anomalies) in the behavior of ionospheric parameters, which can be identified with earthquake precursors. The paper considers ionospheric disturbances that were recorded in the course of vertical radio sounding of the ionosphere several days before the onset of earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$ in the Kamchatka region. For these ionospheric disturbances, a statistical analysis of their predictive effectiveness for earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$ was carried out for the period 2013–2021. Variants of complexes of ionospheric parameters with the best predictive efficiency, which can be used to create a technique for short-term prediction of strong earthquakes, are considered. A retrospective analysis of efficiency of the forecast of earthquakes with magnitude $M \geq 6.0$ based on the considered complexes of ionospheric parameters was carried out.


Key words: ionosphere, vertical radio sounding, lithosphere, earthquake, earthquake precursor.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-167-177

Original article submitted: 10.11.2022

Revision submitted: 25.11.2022

Funding. The work was carried out as part of the implementation of the state task AAAA-A21-121011290003-0

For citation. Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Evaluation of the effectiveness of earthquake prediction in the Kamchatka region based on the complex of ionospheric anomalies. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, 41: 4, 167-177.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-167-177

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2022


References

- [1] Gokhberg M. B., Pilipenko V. A., Pokhotelov O. A. O seismicheskikh predvestnikakh v ionosfere [On seismic precursors in the ionosphere], *Fizika Zemli*, 1983, 10, 17-21 (In Russian).
- [2] Liperovskiy V. A., Pokhotelov O. A., Shalimov S. L. Ionosfernye predvestniki zemletryaseniya [Ionospheric precursors of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1992, 304 (In Russian).
- [3] Pulinetz S. A., et al. Prognoz zemletryaseniya vozmozhen?! [Earthquake forecast is possible?!]. Moscow, Trovant, 2014, 144 (In Russian).
- [4] Bogdanov V. V. et al. O vliyaniy solnechnoy aktivnosti na atmosferynye i seismicheskie protsessy Kamchatki [On the influence of solar activity on atmospheric and seismic processes in Kamchatka]. In: *Kompleksnyye seismologicheskie i geofizicheskie issledovaniya Kamchatki. K 25-letiyu Kamchatskoy opytno-metodicheskoy seismologicheskoy partii GS RAN* [Integrated seismological and geophysical studies of Kamchatka. To the 25th anniversary of the Kamchatka Experimental and Methodological Seismological Party of the GS RAS]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KOMSP GS RAN, 2004, 259-278. (In Russian).
- [5] Bogdanov V. V., et al. Anomal'noe povedenie ionosfernykh parametrov nakanune i posle serii zemletryaseniya 28.02.-01.03.2013 g [Anomalous behavior of ionospheric parameters on the eve and after the series of earthquakes February 28–March 1, 2013]. In: *Sil'nye kamchatskie zemletryaseniya 2013 goda* [Strong Kamchatka earthquakes in 2013]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, Novaya kniga, 2014. 127-135 (In Russian).
- [6] Bogdanov V. V., et al. Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity, *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*, 2017, 98, 154-160.
- [7] Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Dynamics of ionospheric parameters before earthquakes on 28.02.2013-01.03.2013 and 19.05.2013-24.05.2013, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2018, 22:2, 85-99. DOI:10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99 (In Russian).
- [8] Chebrova A. Yu., et al. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions, *Geophysical Research*, 2020, 21:3, 66-91 (In Russian).
- [9] Saltykov V. A. O vozmozhnosti ispol'zovaniya prilivnoy modulyatsii seismicheskikh shumov v tselyakh prognoza zemletryaseniya [On the possibility of using tidal modulation of seismic noise for earthquake prediction], *Fizika Zemli*, 2017, no. 2, pp. 84-96. (In Russian).
- [10] Gusev A. A. Prognoz zemletryaseniya po statistike seismichnosti [Earthquake forecast according to seismicity statistics]. In: *Seismichnost' i seismicheskiy prognoz, svoystva*


verkhney mantii i ikh svyaz' s vulkanizmom na Kamchatke [Seismicity and seismic forecast, properties of the upper mantle and their relationship with volcanism in Kamchatka]. Novosibirsk, Nauka, 1974, pp. 109-119. (In Russian).

- [11] Molchan G. M. Strategies in strong earthquake prediction, Phys. Earth and Planet. Inter., 1990, 61. 84-98.



Bogdanov Vadim Vasil'evich✉ – Dr. Sci. (Phys. & Math.), Chief Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-9267-0401.



Pavlov Aleksey Vladimirovich✉ – Ph. D. (Phys. & Math.), Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-5718-1429.
