

Таблица 3. Прогностическая эффективность ионосферных возмущений для землетрясений с $K_S \geq 12.5$

Ионосферное возмущение	K-слой	Es-spread	Es-r	f_oF2	F-spread	Рассл. F2 (H)	Рассл. F2 (V)
N_+	24	17	32	15	44	31	29
N	43	49	45	43	46	44	41
n_{AE}	24	17	32	15	44	31	29
n_A	205	198	278	109	799	393	269
V	0.12	0.09	0.12	0.14	0.06	0.08	0.11
R	0.56	0.35	0.71	0.35	0.96	0.7	0.71
J_G	1.14	0.9	1.31	1.03	1.02	1.11	1.33
τ	0.49	0.39	0.54	0.34	0.94	0.64	0.53
ν	0.44	0.65	0.29	0.65	0.04	0.3	0.29
J_M	0.07	-0.04	0.17	0.01	0.02	0.06	0.18

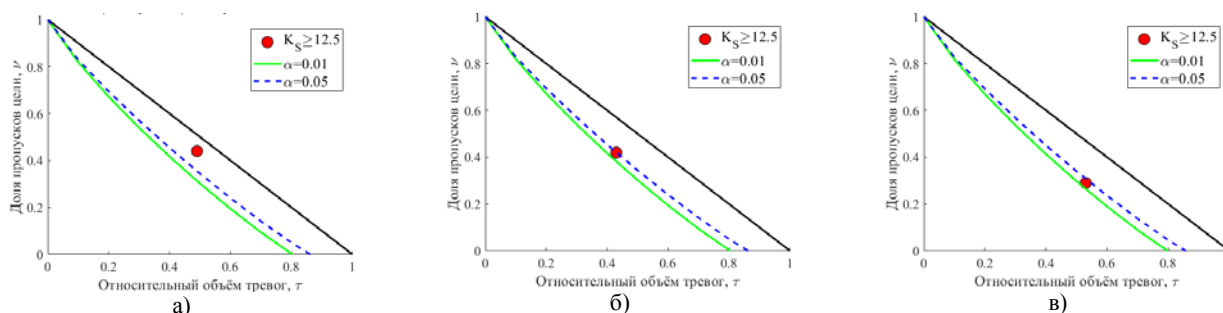


Рис. 4. Диаграммы Молчана для K-слоя (а), Es типа r (б) и расслоения F2 по частоте (в) при прогнозировании землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 12.5$.

Таблица 4. Прогностическая эффективность ионосферных возмущений для землетрясений с $K_S \geq 13.5$

Ионосферное возмущение	K-слой	Es-spread	Es-r	f_oF2	F-spread	Рассл. F2 (H)	Рассл. F2 (V)
N_+	11	9	13	9	18	13	14
N	17	20	18	17	19	17	17
n_{AE}	11	9	13	9	18	13	14
n_A	205	198	278	109	799	393	269
V	0.05	0.05	0.05	0.08	0.02	0.03	0.05
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
τ	0.52	0.4	0.57	0.35	0.96	0.66	0.56
ν	0.35	0.55	0.28	0.47	0.05	0.24	0.18
J_M	0.13	0.05	0.15	0.18	-0.01	0.1	0.26

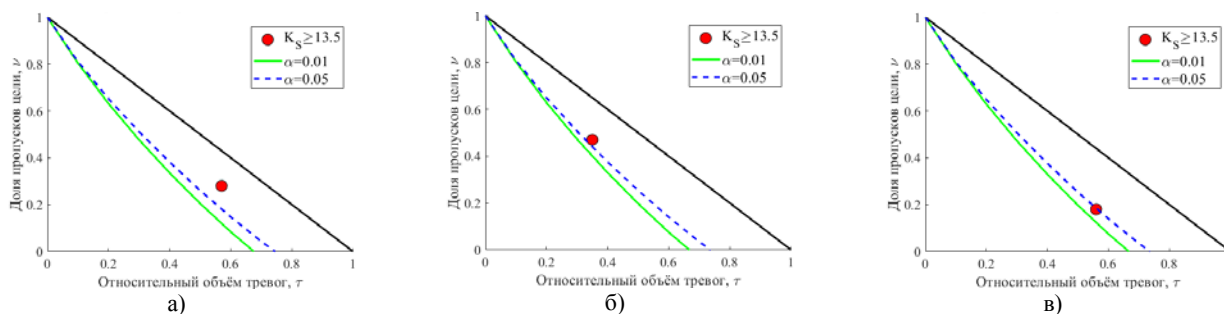


Рис. 5. Диаграммы Молчана для K-слоя (а), f_oF2 (б) и расслоения F2 по частоте (в) при прогнозировании землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$.

Таблица 5. Прогностическая эффективность ионосферных возмущений для землетрясений с $K_S \geq 14.5$

Ионосферное возмущение	K-слой	Es-spread	Es-r	f_oF2	F-spread	Рассл. F2 (H)	Рассл. F2 (V)
N_+	6	4	5	4	7	5	5
N	7	7	6	7	7	6	6
n_{AE}	6	4	5	4	7	5	5
n_A	205	198	278	109	799	393	269
V	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02
R	0.86	0.57	0.83	0.57	1	0.83	0.83
J_G	1.64	1.4	1.43	1.59	1.03	1.23	1.45
τ	0.52	0.41	0.58	0.36	0.97	0.68	0.57
ν	0.14	0.43	0.17	0.43	0	0.17	0.17
J_M	0.34	0.16	0.25	0.21	0.03	0.15	0.26

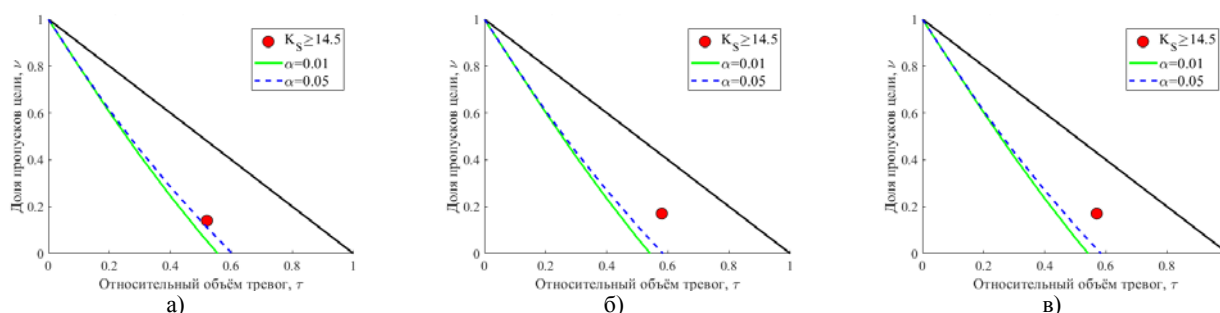


Рис. 6. Диаграммы Молчана для K-слоя (а), Es типа r (б) и расслоения F2 по частоте (в) при прогнозировании землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 14.5$.

На диаграммах Молчана диагональ $\tau + \nu = 1$, соединяющая точки (0;1) и (1;0) соответствует случайному прогнозу. Для этой диагонали построены доверительные интервалы для уровней значимости $\alpha = 0.01$ и $\alpha = 0.05$. Если значения (τ, ν) , полученные для диапазонов лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, то это можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого предвестника с землетрясениями рассматриваемого энергетического диапазона.

Выводы

Достоверность V рассматриваемых ионосферных предвестников снижается с увеличением прогнозируемого энергетического класса землетрясений. Наибольшей достоверностью $V = 0.29$ обладает ионосферный параметр f_oF2 для землетрясений с $K_S \geq 11.5$, а наименьшей $V = 0.01$ – F2-spread и расслоение F2 по высоте (режим "H") для землетрясений с $K_S \geq 14.5$. Надёжность R ионосферных предвестников возрастает с увеличением прогнозируемого энергетического класса землетрясений. Наименьшей надёжностью $R = 0.33$ обладают ионосферные параметры f_oF2 и Es-spread для землетрясений с $K_S \geq 11.5$, а наибольшей надёжностью $R = 1$ – F2-spread для землетрясений с $K_S \geq 14.5$. Однако, наибольшими значениями эффективности J_G и J_M обладают следующие ионосферные параметры: K-слой, f_oF2 , расслоение F2 по высоте (режим "V") и Es типа r для землетрясений с $K_S \geq 14.5$. Для меньших значений K_S прогнозируемых землетрясений эти ионосферные параметры менее информативны, поэтому для повышения эффективности прогноза необходимо использовать их сочетания. Наименьшими значениями эффективности J_G и J_M обладают F-spread, Es-spread и расслоение F2 по высоте (режим "H"), поэтому их использование в прогнозе землетрясений рассматриваемых энергетических диапазонов не приведёт к повышению эффективности прогноза.

Список литературы

1. Богданов В.В., Бузевич А.В., Веницкий А.В., Дружин Г.И., Купцов А.В., Поддельский И.Н., Смирнов С.Э., Шевцов Б.М. 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: КОМСП ГС РАН, 2004. С. 259–278.
2. Богданов В.В., Кайсин А.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., Душкина С.М., Гашева О.А. 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.
3. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
4. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 2006. 254 с.
5. Салтыков В.А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С.84–96.
6. Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. М.: ОИФЗ РАН, 1998/ С. 64–85.
7. Bogdanov V.V., Kaisin A.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., Meister C.-V. Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity // Physics and Chemistry of the Earth. 2017. Vol. 98. P. 154–160.
8. Liperovskaya, E.V., Bogdanov, V.V., Biagi, P.-F., Meister, C.-V., Liperovsky, V.A., Rodkin, M.V. Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009. № 9. P. 1–7.
9. Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction //Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. V. 61. P. 84–98.
10. <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.