

УДК 550.34

## ЭФФЕКТЫ СМЕНЫ ВРЕМЕН ГОДА В ВОЗНИКНОВЕНИИ СИЛЬНЫХ ( $M \geq 6$ ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА)

© 2016 Ю.К. Серафимова

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,  
г. Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: yulka@emsd.ru*

В работе на примере Курило-Камчатского региона рассматривается связь между возникновением сильных землетрясений ( $M \geq 6.0$ , энергетический класс  $Ks \geq 12.6$ ) и сменой сезонов (времен года). Особенностью методического подхода к анализу такой связи является использование *астрономических* времен года, которые определяются датами солнцестояния и равноденствия. Показано, что зависимость между определенной фазой сезона и возникновением сильных землетрясений является статистически значимой для землетрясений  $Ks \geq 13.0$  для Камчатки и  $M \geq 6.5$  для Курильских островов. Приводятся ретроспективные оценки эффективности использования признака «смена сезонов» для прогнозирования времени возникновения сильных землетрясений Камчатки.

*Ключевые слова: астрономические сезоны, сильные землетрясения, сейсмичность, Камчатка, Курильские острова.*

В ряде работ последних десятилетий показано, что возникновение сильных землетрясений связано с периодическими и квазипериодическими природными ритмами, например, 11-летним и 22-летним солнечными циклами, 18.6-летним лунным циклом, в частности, с определенными фазами этих ритмов (Барляева и др., 2000; Бузевич, 2004; Гусев, Петухин, 1997; Серафимова, 2006; Сытинский, 1989; Широков, 1977; Широков, Серафимова, 2006).

Помимо длиннопериодных ритмов интерес представляет внутригодовое распределение землетрясений в различных регионах. Так, в работах (Андреева и др., 2009; Левин и др., 2005) показано, что для Тихоокеанского региона максимальное количество сейсмических событий приходится на декабрь. В работе (Федотов, 1965) показано, что максимальное число сильных ( $M = 7.75$  и более) землетрясений Камчатки и Курильских островов 1904-1963 гг. приходится на период 10 октября-10 ноября.

Если принять гипотезу о том, что длиннопериодные воздействия, обусловленные, главным образом, гравитационными планетарными взаимодействиями с периодами в первые годы – десятилетия могут оказывать влияние на распределение сильных землетрясений во времени,

то возникает закономерный вопрос, могут ли более короткопериодные воздействия, например, в течение времени не более одного года также влиять на изменение сейсмичности.

Мы полагаем, что таким короткопериодным воздействием в системе Солнце – Земля – Луна, влияющего на сейсмичность, может быть смена времен года (сезонов), которая рассматривается в качестве возможного фактора влияния на возникновение сильных ( $M \geq 6$ ) землетрясений.

Следует отметить, что различают календарные, астрономические и климатические времена года. Астрономические времена года отсчитывают от дат солнцестояния и равноденствия и разделяют на весну, лето, осень и зиму.

Ранее в работе (Серафимова, 2013) проанализировано внутригодовое распределение сильных ( $M \geq 6$ ) землетрясений Камчатки и Курильских островов, но не по календарным месяцам, как это уже делалось раньше, например, в работах (Андреева и др., 2009; Левин и др., 2005, Федотов, 1965), а по фазам астрономических сезонов. Было показано, что существует статистически значимая связь между определенными фазами сезонов и увеличением числа землетрясений с  $M \geq 6$  для Камчатки и  $M \geq 6.5$  для Курильских островов, в частности, при переходах от осени к

зиме и от весны к лету. Оценке практической значимости полученных результатов и возможности их использования в работе специализированных советов по прогнозу землетрясений отчасти посвящена работа (Серафимова, 2016).

Целью настоящей работы является обобщение полученных ранее предварительных результатов, а также уточнение оценки ретроспективной прогнозной эффективности признака «смена сезонов» в возникновении сильных землетрясений с учетом корректировки методики расчетов.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Смена времен года обуславливается годичным периодом обращения Земли вокруг Солнца и наклоном оси вращения планеты относительно орбитальной плоскости.

*Астрономические времена года.* Началом весны в северном полушарии считается момент, когда центр Солнца, двигаясь по эклиптике и переходя из Южного полушария неба в Северное (20 или 21 марта), пересекает небесный экватор в точке весеннего равноденствия. В момент начала лета в северном полушарии (21 или 22 июня) Солнце проходит через самую северную точку эклиптики — точку летнего солнцестояния. В момент начала осени в северном полушарии (23 сентября) Солнце вторично пересекает экватор в точке осеннего равноденствия, переходя из Северного полушария в Южное. Зима в северном полушарии начинается (21 или 22 декабря), когда Солнце проходит через наиболее южную точку эклиптики — точку зимнего солнцестояния (Климишин, 1990).

В работе, согласно (Куликовский, 1961), приняты следующие даты начала и окончания астрономических сезонов:

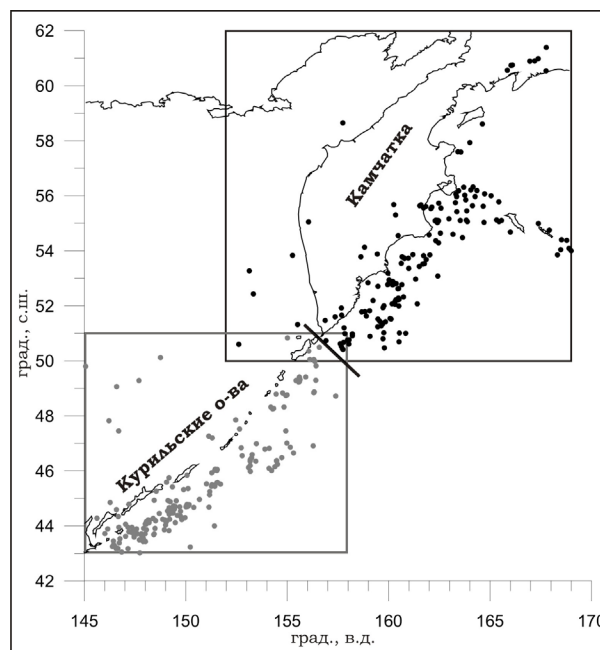
зима: 22 декабря–21 марта (продолжительность 90 дней);

весна: 22 марта–21 июня (продолжительность 92 дня);

лето: 22 июня–22 сентября (продолжительность 93 дня);

осень: 23 сентября–21 декабря (продолжительность 90 дней).

*Каталоги землетрясений.* Выборка камчатских землетрясений с  $K_s^{\Phi_{68}} \geq 12.6$  ( $M_I \geq 5.6$ ) проводилась из каталога Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН [<http://emsd.ru/seismicity/katalogi-zemletryaseni>] за период 01.01.1962–31.12.2012 гг. для глубин 0–700 км и включает 158 событий (рис. 1). В региональном каталоге КФ ГС РАН энергетические характеристики землетрясений представлены в величинах класса  $K_s^{\Phi_{68}}$  по классификации С.А. Федотова (Федотов, 1972), связанного с локальной магнитудой  $M_I$  эмпирической зависи-



**Рис. 1.** Схема расположения районов, в пределах которых производились выборки, и эпицентров сильных ( $M \geq 6$ ) землетрясений Камчатки (черный прямоугольник, черные точки) и Курильских островов (серый прямоугольник, серые точки). Жирной наклонной линией показана граница разделения каталогов.

мостью  $M_I = 0.5 K_s^{\Phi_{68}} - 0.75$  (Гусев, Мельникова, 1990).

Выборка землетрясений с магнитудами  $M \geq 6.0$  для района Курильских островов проводилась из каталога United States Geological Survey (USGS) [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/eric/>] за период 01.01.1973–31.12.2012 гг. для глубин 0–600 км и включает 177 событий (рис. 1).

Выборки землетрясений из каталогов производились с учетом их энергетических параметров по четырем уровням —  $K_s \geq 12.6$ ,  $K_s \geq 13.0$ ,  $K_s \geq 13.5$  и  $K_s \geq 14.0$  для Камчатки, и  $M \geq 6.0$ ,  $M \geq 6.5$ ,  $M \geq 7.0$  и  $M \geq 7.5$  для Курильских островов.

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ распределения количества землетрясений по астрономическим временам года показывает, что на Камчатке землетрясения в летние сезоны происходят реже (17.1% от общего числа событий), а в районе Курильских о-вов землетрясения чаще происходят осенью (37.3% от общего числа событий) (табл. 1).

Для каждого землетрясения рассчитывается значение фазы сезона, в котором оно произошло. Принимая продолжительность сезона за единицу, фаза любого события рассчитывается как отношение разности времени между возникновением события и началом соответствующего сезона к продолжительности сезона.

Таблица 1. Распределение количества землетрясений по временам года.

Сезон	зима		весна		лето		осень	
	22 декабря-21 марта		22 марта-21 июня		22 июня-22 сентября		23 сентября-21 декабря	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
<b>Камчатка</b> $Ks \geq 12.6$ , $M \geq 5.6$	42	26.6	45	28.5	27	17.1	44	27.8
<b>Курильские острова</b> $M \geq 6.0$	34	19.2	39	22.0	38	21.5	66	37.3

$$\varphi_{\text{собр}} = (\tau_{\text{собр}} - \tau_{\text{нач. сезона}}) / T_{\text{сезона}}$$
 где  $\varphi_{\text{собр}}$  — значение фазы события,  $\tau_{\text{собр}}$  — дата события,  $\tau_{\text{нач. сезона}}$  — дата начала сезона,  $T_{\text{сезона}}$  — продолжительность сезона в сутках.

**Камчатка.** Методические подходы, используемые в настоящей работе, подробно рассмотрим на примере камчатских землетрясений.

После того, как для каждого события получено значение фазы  $\varphi_{\text{собр}}$ , строятся гистограммы распределения землетрясений с учетом их энергетических классов по фазам астрономических сезонов.

Обращает внимание, что количество землетрясений с  $Ks \geq 12.6$  в начале и в конце сезона (кроме лета) увеличивается (рис. 2 а-д). Аналогичная тенденция прослеживается для землетрясений с  $Ks \geq 14.0$ , происходивших в зимний и осенний сезоны. Поэтому можно полагать, что имеется связь между сменой астрономических сезонов и возникновением сильных землетрясений на Камчатке. Наиболее ярко такая связь прослеживается при переходе от осени к зиме и от весны к лету.

При анализе распределения землетрясений внутри всех сезонов в целом видно, что для всех энергетических уровней и всех астрономических сезонов сохраняется тенденция увеличения количества землетрясений к началу и к концу сезонов (рис. 2д).

Если утверждение о неравномерности распределения землетрясений верно, необходимо опровергнуть нулевую гипотезу о равномерном распределении событий по фазам сезонов. Задача сводится к сравнению теоретического и фактического распределения по статистическому критерию. В качестве такого критерия выбран непараметрический критерий оценки —  $\chi^2$  (критерий Пирсона), который применяется, когда данные в выборке разделены на несколько дискретных интервалов, при этом в формировании значения  $\chi^2$  участвуют все дискретные интервалы. Критерий  $\chi^2$  измеряет различия и учитывает их величину относительно ожидаемых чисел равномерно распределенных землетрясений по интервалам. Применение критерия  $\chi^2$  правомерно, если все ожидаемые числа не меньше 1 и доля клеток

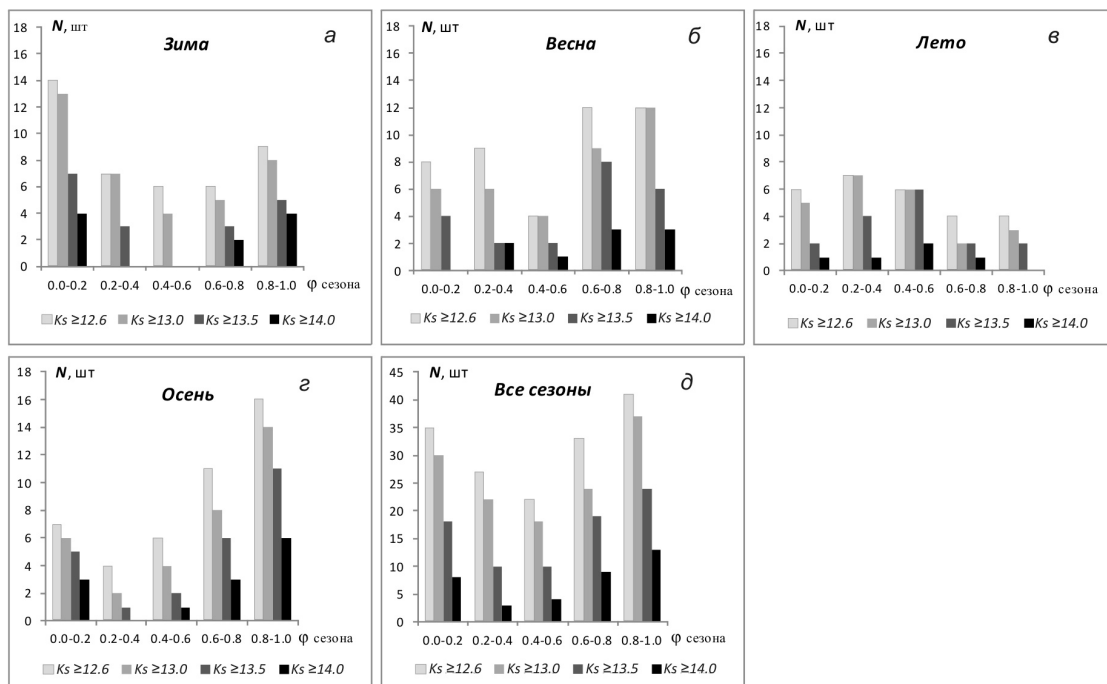
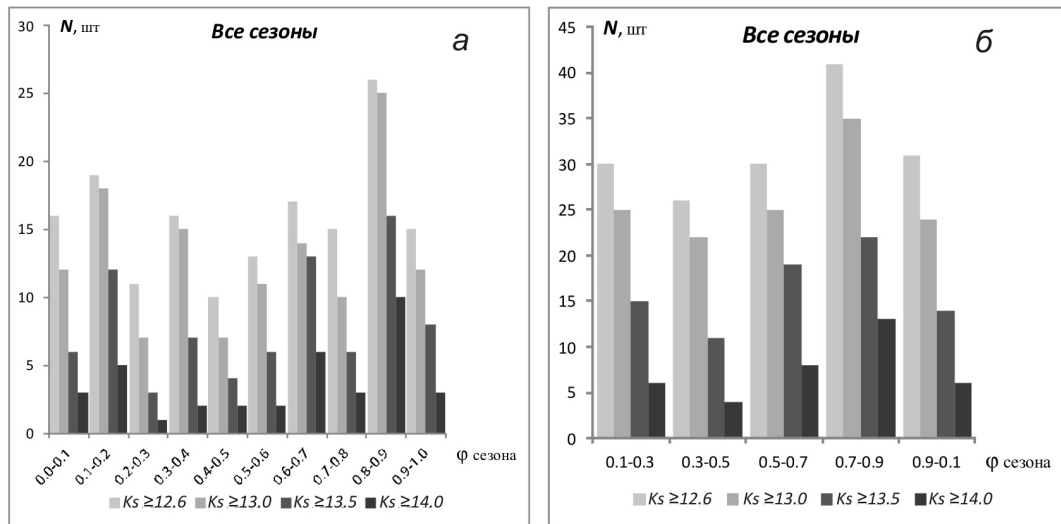


Рис. 2. Гистограммы распределения камчатских землетрясений в зависимости от величин их энергетических классов и значений фаз отдельных астрономических сезонов (а-д) и такое же распределение для всех сезонов, полученное методом наложения эпох (д).



**Рис. 3.** Способы разделения на фазовые диапазоны астрономических сезонов и соответствующие гистограммы распределения землетрясений Камчатки: *а* — с шагом дискретизации 0.1 (способ 1); *б* — с шагом дискретизации 0.2 при сдвиге на 0.1 относительно начала сезона (способ 3). Пояснения в тексте.

таблицы сопряженности с ожидаемыми числами меньше 5 не превышает 20% (Гланц, 1998).

Критерий  $\chi^2$  рассчитывается по формуле:

$$\chi^2 = \sum ((\Phi - O)^2 / O),$$

где  $\Phi$  — фактически наблюдаемое число в клетке таблицы сопряженности,  $O$  — ожидаемое число в той же клетке. Суммирование проводилось по всем клеткам таблицы (Гланц, 1998).

Распределения землетрясений внутри каждого из сезонов, полученные методом наложения эпох за весь период наблюдений, будут отличаться при разных способах разбиения сезона на фазовые диапазоны. Задача сводится к тому, чтобы найти такой способ разбиения, при котором будут четко выделяться диапазоны фаз с максимальными вариациями числа землетрясений в них. При этом такие вариации должны быть статистически значимыми с уровнем значимости  $\alpha \leq 0.10$ . В работе выделение диапазонов фаз проводилось следующими способами: 1) с шагом дискретизации сезонов 0.1 (0.0 – 0.1, ... 0.9 – 1.0) (рис. 3а), 2) с шагом дискретизации 0.2 (0.0 – 0.2, ... 0.8 – 1.0) (рис. 2д), 3) с шагом дискретизации 0.2 при сдвиге на 0.1 относительно начала сезона (0.1 – 0.3, ... 0.9 – 0.1) (рис. 3б).

За нулевую гипотезу принимается предположение о равномерном распределении событий по фазам внутри каждого сезона (зима, весна, лето, осень), то есть об отсутствии связи между наличием определенной фазы сезона и возникновением землетрясений.

Результаты оценки статистической значимости неслучайного распределения землетрясений Камчатки с учетом их энергетических параметров для трех способов выделения диапазонов фаз астрономических сезонов с использованием критерия  $\chi^2$  приводятся в табл. 2. Распределение землетрясений получено методом наложения

эпох. Для камчатских землетрясений гипотеза о равномерном распределении отвергается с уровнем значимости  $\alpha = 0.10$  для землетрясений с  $Ks \geq 13.0$ ,  $Ks \geq 13.5$ ,  $Ks \geq 14.0$  при выделении диапазонов фаз с шагом дискретизации 0.2 (способ 2, рис. 2д, табл. 2) и не отвергается при выделении диапазонов фаз способом 3 (рис. 3б, табл. 2).

При выделении диапазонов фаз с шагом дискретизации 0.1 (способ 1) гипотеза о равномерном распределении землетрясений Камчатки отвергается с уровнем значимости  $\alpha = 0.025$  для землетрясений с  $Ks \geq 13.0$  и  $Ks \geq 13.5$  (рис. 3а, табл. 2). Количество землетрясений с  $Ks \geq 14.0$  является недостаточным для оценки статической значимости распределения с применением критерия  $\chi^2$ .

Для камчатских землетрясений гипотеза о равномерном распределении по диапазонам фаз с шагом дискретизации 0.2 в зависимости от сезона отвергается с уровнем значимости  $\alpha = 0.10$  только для землетрясений с  $Ks \geq 13.0$  (рис. 2 а-г, табл. 3).

При разбиении сезонов на диапазоны фаз с шагом дискретизации 0.1 устанавливается большая статистическая значимость утверждения о неравномерном распределении землетрясений по сезонам и внутри них (табл. 2, 3). Вместе с тем, более обоснованным с практической точки зрения является разбиение сезонов на диапазоны фаз с шагом дискретизации 0.2.

Далее оценивается практическая значимость выявленного эффекта для его использования при прогнозировании времени сильных землетрясений.

Назовем отношение интенсивности потока землетрясений в заданном диапазоне фаз сезона к общему потоку событий за весь анализируемый период *надежностью оценки связи между*

**Таблица 2.** Проверка гипотезы о равномерном распределении сильных землетрясений Камчатки и Курильских островов по фазам астрономических сезонов с применением критерия  $\chi^2$  для различных вариантов разбиения фаз на диапазоны.

Фазы сезонов	Камчатка						Курильские острова											
	$Ks \geq 12.6$		$Ks \geq 13.0$		$Ks \geq 13.5$		$Ks \geq 14.0$		$M \geq 6.0$		$M \geq 6.5$							
	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$						
0.0-0.2	35	31.6	0.366	30	26.2	0.551	18	16.2	0.200	8	7.4	0.049	48	35.4	4.485	20	10.6	8.336
0.2-0.4	27	31.6	0.670	22	26.2	0.673	10	16.2	2.373	3	7.4	2.616	25	35.4	3.055	8	10.6	0.638
0.4-0.6	22	31.6	2.916	18	26.2	2.566	10	16.2	2.373	4	7.4	1.562	35	35.4	0.005	6	10.6	1.996
0.6-0.8	33	31.6	0.062	24	26.2	0.185	19	16.2	0.484	9	7.4	0.346	35	35.4	0.005	14	10.6	1.091
0.8-1.0	41	31.6	2.796	37	26.2	4.452	24	16.2	3.756	13	7.4	4.238	34	35.4	0.055	5	10.6	2.958
$\chi^2 (v = 4)$			6.810			8.427			9.185			8.811			7.605			15.019
	$\alpha = 0.25$						$\alpha = 0.10$						$\alpha = 0.25$					
0.1-0.3	30	31.6	0.081	25	26.2	0.055	15	16.2	0.089	6	7.4	0.265	39	35.4	0.366	12	10.6	0.185
0.3-0.5	26	31.6	0.992	22	26.2	0.673	11	16.2	1.669	4	7.4	1.562	25	35.4	3.055	4	10.6	4.109
0.5-0.7	30	31.6	0.081	25	26.2	0.055	19	16.2	0.484	8	7.4	0.049	36	35.4	0.010	9	10.6	0.242
0.7-0.9	41	31.6	2.796	35	26.2	2.956	22	16.2	2.077	13	7.4	4.238	34	35.4	0.055	11	10.6	0.015
0.9-0.1	31	31.6	0.011	24	26.2	0.185	14	16.2	0.299	6	7.4	0.265	43	35.4	1.632	17	10.6	3.864
$\chi^2 (v = 4)$			3.962			3.924			4.617			6.378			5.119			8.415
	$\alpha = 0.50$						$\alpha = 0.50$						$\alpha = 0.50$					
0.0-0.1	16	15.8	0.003	12	13.1	0.092	6	8.1	0.544	-	-	-	25	17.7	3.011	14	5.3	14.281
0.1-0.2	19	15.8	0.648	18	13.1	1.833	12	8.1	1.878	-	-	-	23	17.7	1.587	6	5.3	0.092
0.2-0.3	11	15.8	1.458	7	13.1	2.840	3	8.1	3.211	-	-	-	16	17.7	0.163	6	5.3	0.092
0.3-0.4	16	15.8	0.003	15	13.1	0.276	7	8.1	0.149	-	-	-	10	17.7	3.350	2	5.3	2.055
0.4-0.5	10	15.8	2.129	7	13.1	2.840	4	8.1	2.075	-	-	-	15	17.7	0.412	2	5.3	2.055
0.5-0.6	13	15.8	0.496	11	13.1	0.337	6	8.1	0.544	-	-	-	20	17.7	0.299	4	5.3	0.319
0.6-0.7	17	15.8	0.091	14	13.1	0.062	13	8.1	2.964	-	-	-	16	17.7	0.163	5	5.3	0.017
0.7-0.8	15	15.8	0.041	10	13.1	0.734	6	8.1	0.544	-	-	-	19	17.7	0.095	9	5.3	2.583
0.8-0.9	26	15.8	6.585	25	13.1	10.81	16	8.1	7.705	-	-	-	14	17.7	0.773	2	5.3	2.055
0.9-1.0	15	15.8	0.041	12	13.1	0.092	8	8.1	0.001	-	-	-	19	17.7	0.095	3	5.3	0.998
$\chi^2 (v = 4)$			11.494			19.916			19.617						9.949			24.547
	$\alpha = 0.25$						$\alpha = 0.025$						$\alpha = 0.5$					

Примечание. Жирным шрифтом показаны значения критерия  $\chi^2$ , позволяющие отвергнуть гипотезу о равномерном распределении землетрясений с уровнем значимости  $\alpha \leq 0.10$ ; v — число степеней свободы; прочерк — недостаточное количество данных для применения критерия  $\chi^2$ .

ЭФФЕКТЫ СМЕНЫ ВРЕМЕН ГОДА

Таблица 3. Проверка гипотезы о равномерном распределении сильных землетрясений Камчатки и Курильских островов с применением критерия  $\chi^2$  по диапазонам фаз в зависимости от астрономических сезонов.

Фазы сезонов	Камчатка						Курильские острова			
	$Ks \geq 12.6$			$Ks \geq 13.0$			$M \geq 6.0$			
	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$	$\Phi$	$O$	$(\Phi-O)^2/O$	
<b>0.0-0.2</b>										
зима	14	9.30	2.370	13	8.47	2.418	4	9.30	3.024	
весна	8	9.97	0.389	6	8.47	0.722	13	10.58	0.555	
лето	6	5.98	0.000	5	5.27	0.014	12	10.31	0.279	
осень	7	9.75	0.774	6	7.79	0.410	19	17.90	0.068	
<b>0.2-0.4</b>										
зима	7	7.18	0.004	7	6.21	0.099	9	4.80	3.669	
весна	9	7.69	0.223	6	6.21	0.007	7	5.51	0.404	
лето	7	4.61	1.234	7	3.86	2.548	4	5.37	0.348	
осень	4	7.52	1.647	2	5.71	2.410	5	9.32	2.004	
<b>0.4-0.6</b>										
зима	6	5.85	0.004	4	5.08	0.231	8	6.72	0.242	
весна	4	6.27	0.819	4	5.08	0.231	8	7.71	0.011	
лето	6	3.76	1.335	6	3.16	2.552	9	7.51	0.294	
осень	6	6.13	0.003	4	4.67	0.097	12	13.05	0.085	
<b>0.6-0.8</b>										
зима	6	8.77	0.876	5	6.78	0.467	10	6.72	1.597	
весна	12	9.40	0.720	9	6.78	0.728	4	7.71	1.787	
лето	4	5.64	0.477	2	4.21	1.163	4	5.64	0.477	
осень	11	9.19	0.357	8	6.23	0.504	12	13.05	0.085	
<b>0.8-1.0</b>										
зима	9	10.90	0.331	8	10.45	0.575	3	6.53	1.909	
весна	12	11.68	0.009	12	10.45	0.230	7	7.49	0.032	
лето	4	7.01	1.290	3	6.50	1.882	6	7.30	0.231	
осень	16	11.42	1.839	14	9.60	2.013	18	12.68	2.234	
$\chi^2 (v = 12)$			14.701				19.300			
			$\alpha = 0.50$				$\alpha = 0.10$			
							$\alpha = 0.10$			

Примечание. Жирным шрифтом показаны значения критерия  $\chi^2$ , позволяющие отвергнуть гипотезу о равномерном распределении землетрясений с уровнем значимости  $\alpha \leq 0.10$ ;  $v$  — число степеней свободы.

конкретным диапазоном фаз и возникновением сильных землетрясений ( $R$ ).

Проанализируем распределение величин  $R$  по фазам сезонов с дискретностью 0.2. Средняя интенсивность потока событий за весь период наблюдений,  $I_{cp} = N/T$ , где  $N$  — число землетрясений за весь период наблюдений, шт.,  $T$  — продолжительность периода наблюдений, для Камчатки составляет 51 год (01.01.1962 г. – 31.12.2012 г.).

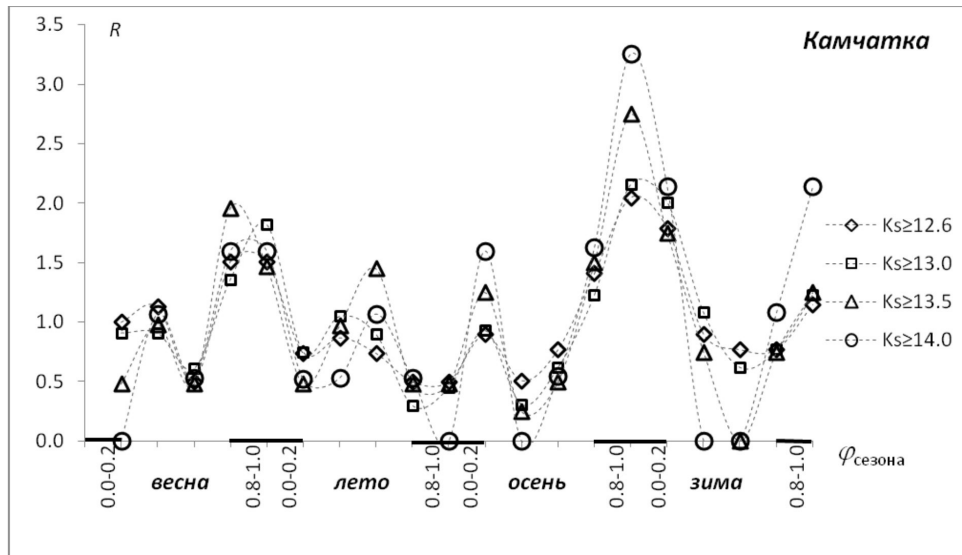
Интенсивность потока событий в конкретном диапазоне фаз сезона, например 0.0–0.2, за весь период наблюдений, определяется как:

$I'_{0.0-0.2} = N'_{0.0-0.2}/T'$ , где  $N'_{0.0-0.2}$  — число землетрясений в диапазоне фаз 0.0–0.2 в сезоне, шт.,  $T'$  — продолжительность диапазона фаз сезона с дискретностью 0.2 в годах за весь период наблюдений, определяется как  $(T_{сезона} \times 0.2 \times 51)/365$ . Например для камчатских землетрясений с  $Ks \geq 12.6$  для диапазона фаз 0.0–0.2 зимнего сезона  $I'_{0.0-0.2} = N'_{0.0-0.2}/T' = 14/2.52 = 5.56$  шт./год. Величина параметра  $R$  определяется как:

$$R_{0.0-0.2} = I'_{0.0-0.2}/I_{cp}$$

Результаты расчетов параметра  $R$  для землетрясений Камчатки с учетом энергетических классов показывают, что с энергетического уровня  $Ks \geq 13.0$  максимальные значения параметра  $R$  соответствуют переходам от осени к зиме и от весны к лету (рис. 4). Это хорошо согласуется с высказанным выше предположением о связи между сменой астрономических сезонов и увеличением числа сильных землетрясений на Камчатке.

Рассмотрим эффект увеличения параметра  $R$  в периоды смены сезонов в качестве сейсмопрогностического признака и оценим его ретроспективную эффективность для прогнозирования сильных землетрясений по (Гусев, 1974). Так как астрономические сезоны имеют примерно одинаковую продолжительность по времени, то и диапазоны фаз с дискретностью 0.2 также имеют одинаковую продолжительность (~18 суток).



**Рис. 4.** Изменение параметра надежности оценки связи между отдельными диапазонами фаз астрономических сезонов и возникновением землетрясений Камчатки ( $R$ ). Жирными горизонтальными линиями выделены диапазоны фаз, соответствующие смене сезонов.

Далее для каждой выборки землетрясений с учетом их энергетических параметров и для каждой из рассматриваемых смен сезонов (осень-зима, зима-весна, весна-лето и лето-осень) анализировалось соответствие наличия или отсутствия прогностического признака «смена сезона» произошедшим землетрясениям в выделенных «опасных» диапазонах фаз. Окончания и начала сезонов, соответствующие значениям фаз 0.8–1.0 и 0.0–0.2, рассматривались в качестве опасных интервалов времени, равных 36(37) суткам. Соответственно, весь год поделен на десять равных интервалов продолжительностью 36(37) суток.

В качестве примера приводится таблица сопряженности для камчатских землетрясений с  $K_s \geq 12.6$  при смене сезонов «осень-зима» (табл. 4).

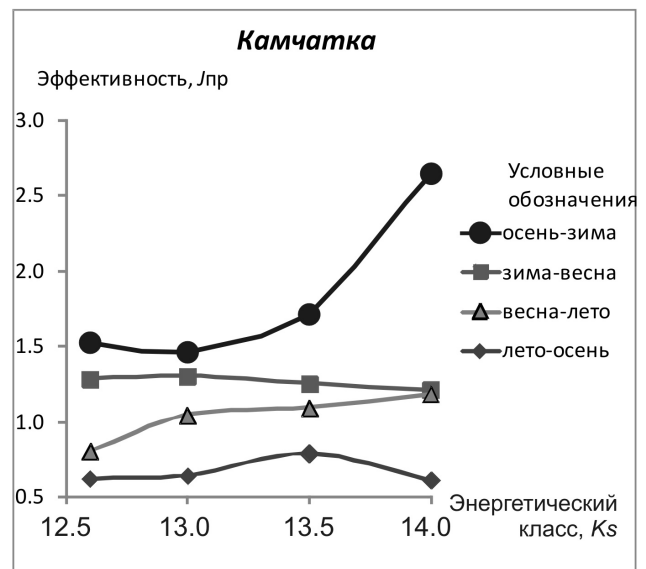
**Таблица 4.** Таблица сопряженности

		Землетрясения ( $K_s \geq 12.6$ , «осень-зима»)		
		Есть	Нет	Сумма
Прогноз	Есть	17	34	51
	Нет	95	364	459
	Сумма	112	398	510

При отсутствии связи между произошедшими землетрясениями и опасными диапазонами фаз, ожидаемое число таких диапазонов, в течение которых произошло хотя бы одно землетрясение случайным образом составляет  $51 \times 112/510 = 11.2$ . В данном примере число диапазонов для варианта «прогноз есть — землетрясение есть» равно 17, то есть превышает ожидаемую их величину при случайной связи. Принимая за меру эффективности использования сейсмопрогностического признака

отношение числа «опасных» интервалов, в течение которых происходили землетрясения, к числу 36(37)-суточных интервалов, в которых ожидаются землетрясения, возникающие случайным образом, получаем  $J_{пр} = 17/11.2 = 1.52$  при вероятности возникновения хотя бы одного землетрясения в интервале 36(37) суток  $p = 112/510 = 0.22$ . Результаты оценок  $J_{пр}$  для Камчатки приводятся в табл. 5.

Изменение ретроспективной эффективности использования признака «смена сезонов» при прогнозировании времени сильных землетрясений Камчатки в зависимости от их энергетического класса представлено на рис. 5.



**Рис. 5.** Изменение эффективности использования сейсмопрогностического признака «смена сезонов» при прогнозировании времени сильных землетрясений Камчатки в зависимости от их энергетического класса.

ЭФФЕКТЫ СМЕНЫ ВРЕМЕН ГОДА

**Таблица 5.** Ретроспективная оценка эффективности использования признака «смена сезонов» при прогнозировании времени сильных землетрясений Камчатки и Курил в зависимости от их энергетических параметров.

	осень-зима 04 декабря-08 января				зима-весна 04 марта-08 апреля				весна-лето 04 июня-10 июля				лето-осень 04 сентября-10 октября			
<b>Камчатка</b>																
<i>K<sub>s</sub></i>	≥12.6	≥13.0	≥13.5	≥14.0	≥12.6	≥13.0	≥13.5	≥14.0	≥12.6	≥13.0	≥13.5	≥14.0	≥12.6	≥13.0	≥13.5	≥14.0
<i>J<sub>пр</sub></i>	1.52	1.46	1.72	2.65	1.28	1.3	1.25	1.21	0.8	1.04	1.09	1.18	0.62	0.64	0.79	0.61
<i>p</i>	0.22	0.19	0.13	0.07	0.21	0.18	0.13	0.06	0.22	0.19	0.13	0.07	0.21	0.18	0.13	0.06
<b>Курильские острова</b>																
<i>M</i>	≥6.0	≥6.5	≥7.0	≥7.5	≥6.0	≥6.5	≥7.0	≥7.5	≥6.0	≥6.5	≥7.0	≥7.5	≥6.0	≥6.5	≥7.0	≥7.5
<i>J<sub>пр</sub></i>	0.96	0.88	0.63	-	0.78	1.08	1.18	-	1.35	1.47	1.25	-	1.12	0.83	0.63	-
<i>p</i>	0.26	0.09	0.04	-	0.26	0.09	0.04	-	0.26	0.09	0.04	-	0.25	0.09	0.04	-

Примечание. *J<sub>пр</sub>* — эффективности использования сейсмопрогностического признака «смена сезонов» по (Гусев, 1974); *p* — вероятность возникновения хотя бы одного землетрясения в интервале 36(37) суток. Пояснения см. в тексте.

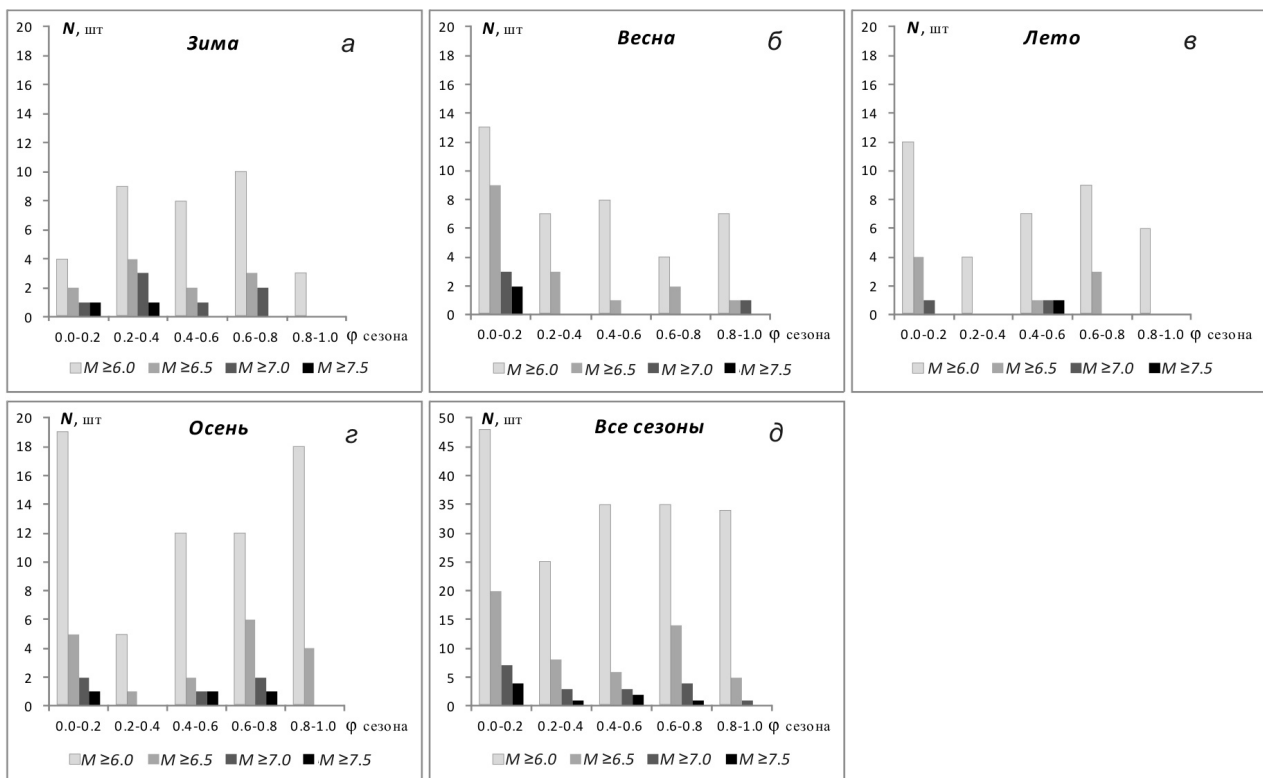
**Курильские острова.** Аналогичное исследование проведено для землетрясений Курильских островов.

Анализ распределения курильских землетрясений с магнитудами  $M \geq 6.0$  показывает, что наблюдается увеличение их количества к началу и к концу сезона, но только весной и осенью (рис. 6 а-г). При этом видно, что наибольший вклад в формирование эффекта определяют землетрясения в диапазоне магнитуд 6.0–7.0. Значимые закономерности в распределении более сильных землетрясений Курильских островов в зависимости от фаз сезонов не выявляются,

возможно, из-за малого числа произошедших землетрясений с  $M \geq 7.0$ .

Для курильских землетрясений только в началах сезонов отмечается увеличение их количества (рис. 6д).

Результаты оценки статистической значимости неслучайного распределения землетрясений Курильских островов с учетом их энергетических параметров для трех способов выделения диапазонов фаз астрономических сезонов с использованием критерия  $\chi^2$  приводятся в табл. 2. Гипотеза о равномерном распределении не отвергается для землетрясений с  $M \geq 6.0$ .



**Рис. 6.** Гистограммы распределения землетрясений Курильских островов в зависимости от величин их магнитуд и значений фаз отдельных астрономических сезонов (а-г) и такое же распределение для всех сезонов, полученное методом наложения эпох (д).



Для землетрясений с  $M \geq 6.5$  гипотеза о равномерном распределении отвергается с уровнем значимости  $\alpha = 0.005$  при выделении фаз с шагом дискретизации 0.1 (способ 1, рис. 7а, табл. 2) и с шагом дискретизации 0.2 (способ 2, рис. 6д, табл. 2). При выделении фаз с шагом дискретизации 0.2 способом 3 нулевая гипотеза отвергается с уровнем значимости  $\alpha = 0.10$  (рис. 7б, табл. 2). Распределения землетрясений с  $M \geq 7.0$  и  $M \geq 7.5$  не анализировались ввиду малого количества таких событий.

Для землетрясений Курильских островов гипотеза о равномерном распределении зем-

летрясений по фазам с дискретностью 0.2 в зависимости от астрономического сезона отвергается с уровнем значимости  $\alpha = 0.10$  только для землетрясений с  $M \geq 6.0$  (рис. 6 а-г, табл. 3). Для статистического анализа такого распределения землетрясений более высоких энергетических уровней недостаточно данных.

Изменение параметра надежности оценки связи между отдельными диапазонами фаз астрономических сезонов и возникновением землетрясений для Курильских островов приводится на рис. 8. Наибольшие значения параметра  $R$  получены для начала весны для землетрясений с  $M \geq 6.5$ .

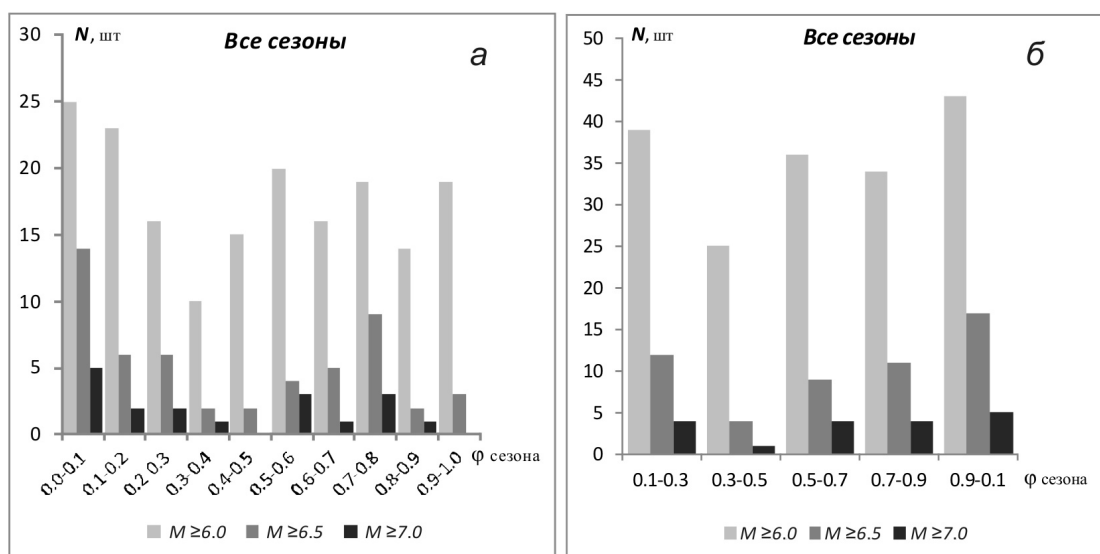


Рис. 7. Способы разделения на фазовые диапазоны астрономических сезонов и соответствующие гистограммы распределения землетрясений Курильских островов: а — с шагом дискретизации 0.1 (способ 1); б — с шагом дискретизации 0.2 при сдвиге на 0.1 относительно начала сезона (способ 3). Пояснения в тексте.

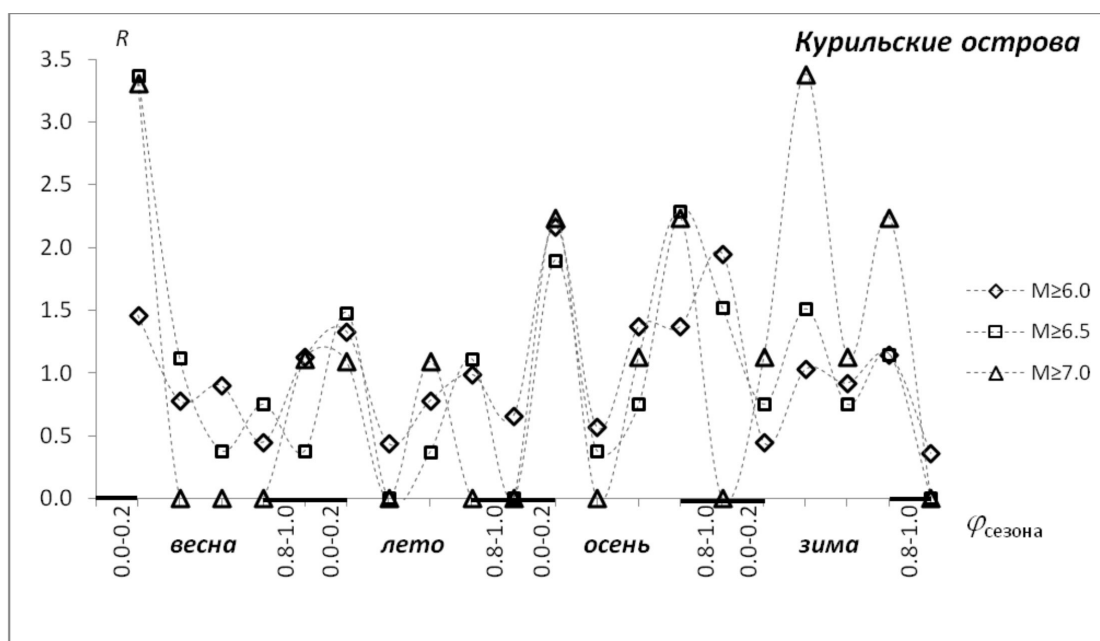


Рис. 8. Изменение параметра надежности оценки связи между отдельными диапазонами фаз астрономических сезонов и возникновением землетрясений Курильских островов ( $R$ ). Жирными горизонтальными линиями выделены диапазоны фаз, соответствующие смене сезонов.

Результаты ретроспективных оценок эффективности использования признака «смена сезонов»  $J_{\text{пр}}$  для Курильских островов приводятся в табл. 5, а ее изменение в зависимости от величины магнитуды — на рис. 9.

#### Обсуждение результатов

Анализ распределения сильных землетрясений Камчатки и Курильских островов в зависимости от фаз астрономических сезонов (рис. 2, б) показывает, что при переходах от осени к зиме и, в меньшей степени, от весны к лету количество сильных землетрясений (с  $Ks \geq 13.0$  для Камчатки и с  $M \geq 6.5$  для Курильских островов) увеличивается и это увеличение является статистически значимым. Можно предположить, что смена астрономических сезонов является некоторым внешним воздействием, обусловленным взаимодействиями в системе Солнце — Земля — Луна, на изменение сейсмичности.

При оценке надежности связи между конкретным диапазоном фаз и возникновением сильных землетрясений Камчатки с использованием параметра  $R$  обнаружено, что максимальные его значения соответствуют переходам от одного сезона к другому. Это позволяет использовать выявленный эффект при прогнозировании сильных камчатских землетрясений. Оценки ретроспективной сейсмопрогностической эффективности признака «смена сезона» приводятся в табл. 5.

Повышенные величины эффективности признака «смена сезона» при переходе от осени к зиме ( $J_{\text{пр}} \geq 1.5$ ) позволяют использовать его в практике работы по оценке сейсмической опасности на Камчатке для уточнения времени возникновения сильных землетрясений с  $Ks \geq 12.6$  (вероятность случайного возникновения таких землетрясений на интервале 36(37) суток  $p = 0.22$ ). При этом наибольшая величина ретроспективной сейсмопрогностической эффективности  $J_{\text{пр}} = 2.65$  установлены для землетрясений с  $Ks \geq 14.0$  (при  $p = 0.07$ ).

«Опасный» интервал, соответствующий окончанию осени и началу зимы приходится на период времени с 04 декабря по 08 января.

Для землетрясений из района Курильских островов использование признака «смена сезонов» не приводит к повышению эффективности в прогнозировании времени их возникновения. Для этого района более характерно тяготение моментов сильных землетрясений к началу астрономических сезонов, в частности, к началу весны. Максимальное значение величины ретроспективной эффективности  $J_{\text{пр}} = 1.47$  соответствует переходу «весна-лето» для землетрясений с  $M \geq 6$  (табл. 5).

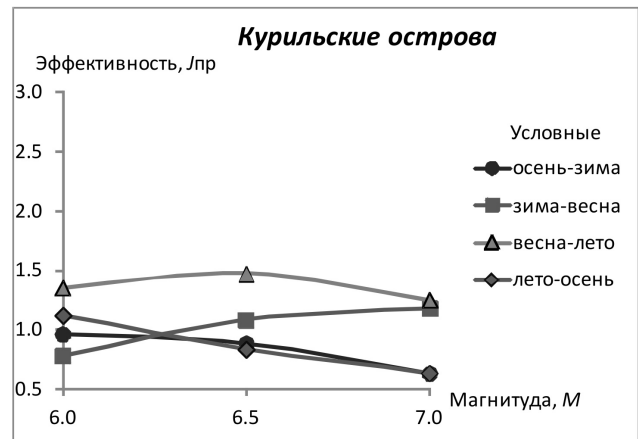


Рис. 9. Изменение эффективности использования сейсмопрогностического признака «смена сезонов» при прогнозировании времени сильных землетрясений Курильских островов в зависимости от магнитуды.

#### ВЫВОДЫ

Для распределения во времени сильных землетрясений Камчатки и Курильских островов характерно увеличение их числа в течение переходов от осени к зиме и, в меньшей степени, от весны к лету. Это позволяет рассматривать смену астрономических сезонов в качестве возможного фактора влияния на возникновение сильных ( $M \geq 6$ ) землетрясений.

Установлена статистически значимая связь между определенными фазами астрономических сезонов и возникновением сильных землетрясений Камчатки с  $Ks \geq 13.0$  и Курильских островов с  $M \geq 6.5$ .

Результаты ретроспективной оценки сейсмопрогностической эффективности признака «смена сезона» при переходе от осени к зиме при прогнозировании времени камчатских землетрясений с  $Ks \geq 14.0$  показывают возможность его использования в практике работы специализированных советов по прогнозу землетрясений. Интервал времени повышенной опасности таких землетрясений — с 04 декабря по 08 января.

Автор выражает благодарность д.г.-м.н. Копыловой Галине Николаевне за проявленный интерес к работе и полезные обсуждения полученных результатов, а также рецензентам за внимательное отношение к статье и сделанные конструктивные замечания.

#### Список литературы

- Андреева М.Ю., Сасорова Е.В., Левин Б.Ф. Особенности внутригодового распределения землетрясений Курильского региона // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 85–95.  
Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие зем-

- летрясений // Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Геофизика-99» «Геофизические методы исследования Земли и недр», Санкт-Петербург, 9–12 ноября 1999 г. М. 2000. С. 8–19.
- Бузевич А.В.* Солнечная активность и сейсмичность на Камчатке // Сборник докладов III международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», с. Паратунка, 16–21 августа 2004 г. Электронный ресурс [http://www.kcs.iks.ru/ikir].
- Гланц С.* Медико-биологическая статистика. Пер. с англ. М.: Практика, 1998. 459 с.
- Гусев А.А.* Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Отв. ред. член-корр. АН СССР С.А. Федотов. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Гусев А.А., Петухин А.Г.* О возможной синхронизации сильных землетрясений лунным 18.6-летним циклом, его долями и кратными // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 64–79.
- Климишин И.А.* Календарь и хронология. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 480 с.
- Куликовский П.Г.* Справочник любителя астрономии. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1961. 494 с.
- Левин Б.Ф., Сасорова Е.В., Журавлев С.А.* Внутригодовая повторяемость активизации сейсмического процесса для Тихоокеанского региона // ДАН. 2005. Т. 403. № 4. С. 534–540.
- Серафимова Ю.К.* О новом подходе к анализу внутригодового распределения землетрясений // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 30 марта–1 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 207–212.
- Серафимова Ю.К.* О связи сезонности и сильных ( $M \geq 6.0$ ) землетрясений Курило-Камчатского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 200–204.
- Серафимова Ю.К.* О связи сильных ( $M_w \geq 7.5$ ) землетрясений Камчатки с солнечной активностью // Материалы научно-технической конференции «Геофизический мониторинг Камчатки», 17–18 января 2006 г., г. Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. В.Н. Чебров, Г.Н. Копылова. Петропавловск-Камчатский: Отгиск, 2006. С. 171–177.
- Сытинский А.Д.* О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–30.
- Федотов С.А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды Ин-та физики Земли АН СССР, № 36 (203). Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1965. С. 66–93.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Широков В.А.* Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западной части Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 103–115.
- Широков В.А., Серафимова Ю.К.* О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 120–133.

**EFFECTS OF THE SEASONAL CHANGES IN THE OCCURRENCE OF STRONG ( $M \geq 6$ ) EARTHQUAKES: A CASE STUDY FOR THE KURIL-KAMCHATKA REGION**

**Yu.K. Serafimova**

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

The author considers on the example of the Kuril-Kamchatka region the relationship between the occurrence of strong ( $M \geq 6.0$ , energy class  $Ks \geq 12.6$ ) earthquakes and the changing seasons. A key feature of the methodical approach to the analysis of such a connection is to use the astronomical seasons, which are determined by the dates solstices and equinoxes. The paper shows that the relationship between a particular phase of the season and the occurrence of large earthquakes is statistically significant for earthquakes  $Ks \geq 13.0$  for Kamchatka and  $M \geq 6.5$  for the Kuril Islands. The paper presents the retrospective evaluations of the effectiveness of using the criterion "change of seasons" for predicting the time of occurrence of strong Kamchatka earthquakes.

*Keywords: astronomical seasons, strong earthquakes, seismicity, Kamchatka, the Kurile Islands.*