

ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛЬСКОГО РЕГИОНА

М.Ю. Андреева¹, Е.В. Сасорова², Б.В. Левин¹

¹*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск.*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 20 января 2009 г.

Исследования последних лет показывают, что вероятность появления землетрясений в конкретном регионе зависит, в том числе, и от таких факторов, как диапазон географических широт региона, сила притяжения, вызванная Солнцем и Луной, которая определяется взаимным расположением тел в системе Солнце–Земля–Луна. Целью данной работы являлось доказательство того, что неравномерность в распределении сейсмических событий в течение года для Тихоокеанских регионов (Курильские о-ва, о. Хоккайдо) является статистически значимой; по-разному проявляется для землетрясений разного энергетического уровня и с различной глубиной очагов. Опровергается гипотеза о равномерном распределении событий в течение года для неглубоких землетрясений, но показано, что глубокие события распределены равномерно. В работе впервые делается попытка определить степень устойчивости внутригодовой неравномерности сейсмических событий к изменению длительности интервала наблюдения (от 28 до 5 лет). Отмечено два заметных пика в годовом распределении землетрясений. Рассматривается связь пиков внутригодовой сейсмической активности с положением Земли на плоскости эклиптики и как меняется положение этих пиков в зависимости от магнитудного диапазона событий и расположения субрегиона. Основной максимум числа сейсмических событий в году приходится на период с ноября по март, который соответствует минимальному расстоянию между Солнцем и Землей.

Ключевые слова: региональная сейсмичность, внутригодовые распределения землетрясений, Курильские о-ва, о. Хоккайдо.

ВВЕДЕНИЕ

Выявление периодичностей в активизации сейсмического процесса для сейсмических событий различных энергетических уровней является актуальной проблемой в сейсмологии и проливает свет на физические механизмы, управляющие процессом подготовки и генерации землетрясений. Особый интерес вызывает внутригодовая периодичность или повторяемость активизации сейсмичности в отдельных регионах, отмечаемая в ряде работ [4–6, 18, 20–22, 24, 25]. Впервые статистически обоснованное доказательство существования внутригодовых периодичностей в распределении сейсмических событий для ряда Тихоокеанских регионов было сделано, видимо, в работах [9, 27, 28]

Современные представления о структурных элементах литосферы и происходящих в них процессах, которые характеризуются иерархией простран-

ственных и временных масштабов, привели к необходимости сравнительных оценок энергетического вклада внутренних и внешних воздействий на элементы литосферы [7, 8, 16]. Эти оценки указывают на сопоставимость энергии, передаваемой земной коре приливными воздействиями, с энергией, выделяющейся при землетрясениях. В то же время, все внешние воздействия (приливные силы, неравномерность вращения Земли, Чандлерово качание полюса) имеют ярко выраженный периодический характер. Если внутригодовая периодичность действительно существует, то проявление сейсмических событий зависит от позиции системы Земля–Луна на плоскости эклиптики или от факторов, которые изменяются во время продвижения системы Земля–Луна вдоль плоскости эклиптики.

Сейсмологами не раз отмечалась визуально заметная неравномерность в распределении сейсмических событий в течение года. Целью данной рабо-

ты являлся поиск доказательств того, что визуально отмечаемая неравномерность в распределении сейсмических событий в течение года для выбранных для исследования Тихоокеанских субрегионах является статистически значимой.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОДБОРА И ГРУППИРОВКИ СОБЫТИЙ

Для исследования был выбран район Курильских островов и о. Хоккайдо (восточная часть островов, примыкающая к глубоководной впадине). Весь выбранный район был разбит на 4 субрегиона: Северные, Средние и Южные Курильские острова и о. Хоккайдо (СЕК, СРК, ЮК, ХОК).

На рис.1 приведено расположение этих субрегионов на карте северо-западной части Тихоокеанского бассейна, а в табл. 1 представлены их координаты и суммарное количество землетрясений в каждом из них за изучаемый период (1980–2007 гг.).

Для анализа пространственных и временных регулярностей в распределении землетрясений в первую очередь необходимо создать базы данных по сейсмическим событиям в исследуемых регионах. База данных по сейсмическим событиям для выбранных субрегионов была составлена на основании каталога Курильского региона, созданного в электронном виде на основе Regional catalogue of earthquakes (International Seismological Centre, ISC) [23] за 1980–2005 гг., сборника “Землетрясения Северной Евразии” за 1991–2001 гг. и каталога NEIC [26] за 2006–2007 гг. общим периодом с 1980 по 2007 годы. В настоящее время База содержит записи о 22246 событиях. Выбирались события с известными магнитудами M_s и m_b . На первом этапе обработки все события были приведены к одной магнитудой шкале M_s по переводной формуле:

$$M_s = 0.31 \cdot m_b^2 - 2.28 \cdot m_b + 8.34.$$

Далее из списка событий были удалены афтершоки. Известно, что после сильного события непосредственно за ним идет рой афтершоков, который может существенно исказить картину временного распределения событий. Для удаления афтершоков использовалась программа, разработанная в Московском государственном университете Смирновым В.Б. [19]. После удаления афтершоков осталось 16444 события. Известно, что магнитуда землетрясения является энергетической характеристикой сейсмического события: $\lg E = 11.3 + 1.8 \cdot M_s$ или $\lg E = 5.8 + 2.4 \cdot M_b$ (по Рихтеру [17]), где E – энергия (в эрг), выделяемая при землетрясении.

Для анализа пространственных и временных регулярностей в распределении землетрясений вся со-

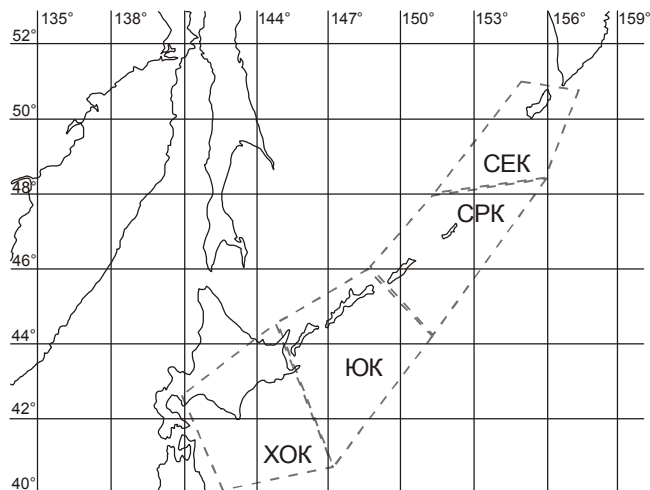


Рис. 1. Карта Курильских о-вов и о. Хоккайдо с выделенными субрегионами.

Границы субрегионов Хоккайдо (ХОК), Южные Курилы (ЮК), Средние Курилы (СРК), Северные Курилы (СЕК) обозначены пунктирными четырехугольниками.

Таблица 1. Координаты границ изучаемых субрегионов Курильского региона и суммарное количество событий в каждом из них до и после удаления афтершоков.

Название субрегиона на рис. 1	Границы широт		Границы долгот		Общее число событий	
	угловые градусы		угловые градусы		с афтершоками	без афтершоков
	от φ_1°, N	до φ_2°, N	от λ_1°, E	до λ_2°, E		
Хоккайдо (ХОК)	39°.7	44°.7	140°.8	147°.3	3237	2210
Ю. Курилы (ЮК)	40°.9	46°.7	143°.5	152°.0	10464	7211
Ср. Курилы (СРК)	43°.3	48°.6	147°.6	160°.0	5009	4120
Сев. Курилы (СЕК)	48°.2	51°.1	151°.0	162°.0	3536	2903
Итого					22246	16444

вокупность исследуемых событий разделялась на несколько подгрупп по энергетическим уровням (значениям магнитуд). Значения магнитуд (M_s) были разбиты на следующие интервалы: $3.0 \leq M_s \leq 4.0$; $4.0 < M_s \leq 5.0$, $5.0 < M_s \leq 6.0$; $M_s > 6.0$ (далее будем обозначать M). Разделение событий на подмножества по разным магнитудным диапазонам ($MД$) дает возможность рассматривать отдельно особенности сейсмического процесса на разных энергетических уровнях. В каждой подгруппе событий произведено разделение событий на две группы: глубокие события с глубиной залегания гипоцентра $H > H_{por}$ и неглубокие с $H \leq H_{por}$, где H_{por} – пороговое значение глу-

бины. На первом этапе исследования $N_{\text{пор}}$ было выбрано равным 70 км.

Будем называть *выборкой* фрагмент базы данных для заданного региона, заданного МД и заданного интервала глубин (по всем событиям, по глубоким событиям или по неглубоким событиям). Количество событий в выборке (без разбиения по глубине) каталога будем обозначать как N , для неглубоких землетрясений – $N_{\text{ш}}$, а для глубоких – $N_{\text{г}}$. *Полным периодом наблюдений* будем называть интервал времени, в котором расположены все события, содержащиеся в исследуемой базе данных, а *выборочным периодом наблюдений* – события, содержащиеся в базе данных внутри заданного временного интервала, входящего в полный период наблюдений. Аргументом для каждого события в базе данных с точки зрения проводимого в работе исследования является время начала землетрясения. Каждому событию поставлен в соответствие день года происхождения события. Таким образом мы получаем дискретную временную шкалу, разбитую на 365 (366) интервалов. В работе параллельно используются две дискретные шкалы: месячная и десятидневная. Всего рассмотрено 336 выборок (4 категории магнитуд, 3 диапазона глубин, 7 временных интервалов (по годам), 4 субрегиона).

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Внутригодовые распределения землетрясений (или годовой ход) для ряда Тихоокеанских регионов имеет явную тенденцию к неравномерности (рис.2).

Для того, чтобы утверждать, что неравномерность статистически значима, необходимо опровергнуть гипотезу о равномерном распределении событий в течение года. За нулевую гипотезу принимается предположение о равномерности распределения, и задача сводится к сравнению теоретического распределения и выборки по статистическому критерию. Однако именно выбор статистического критерия для нашего случая не является тривиальной задачей. Для различных МД количество землетрясений в выборке варьирует от 1 до 3549 событий. И если для больших выборок в каждый день года происходит несколько событий, то для малых выборок иногда даже в месяц не происходит ни одного события. Будем называть выборку хорошо заполненной, если в каждом интервале выборки есть не менее 5-ти событий и, соответственно, – слабо заполненной, если это условие не выполняется хотя бы для одного интервала. Для хорошо заполненных выборок используется критерий χ^2 (критерий Пирсона), который применяется, когда данные в выборке разделены на несколько дискретных интервалов [3], при этом в формировании значе-

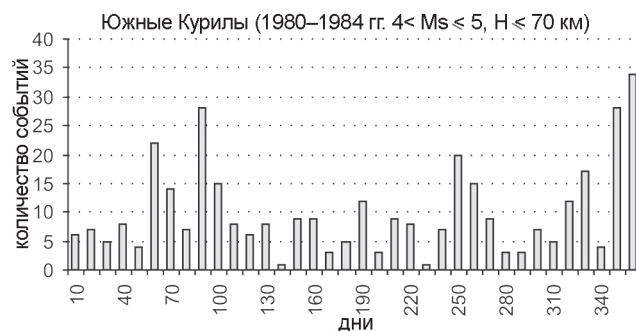


Рис. 2. Внутригодовое распределение неглубоких событий субрегиона Южные Курилы для магнитудного диапазона $4 < M_s \leq 5$ за период 1980–1984 гг.

ния χ^2 участвуют все дискретные интервалы. Для любых выборок (в том числе и разреженных) можно применить прямую оценку вероятности того расклада событий по интервалам, который представлен в выборке, применяя метод статистических испытаний (метод Монте-Карло (М-С)). Практически для всех выборок критерий χ^2 и метод М-С применялись одновременно. Исключение составляли выборки, для которых количество событий во всех дискретных интервалах было более 10, в этих случаях применение метода М-С блокировалось программно (счет по методу М-С занимает много времени). Также параллельно при каждом анализе использовались две шкалы: месячная и десятидневная. Для реализации этого подхода написан комплекс программ в системе MathLab.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВНУТРИГODOVЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Полный период наблюдений для сейсмических событий в рассматриваемой базе данных составляет 28 лет. Поэтому для построения годовых статистических рядов (СР) использовался метод наложения эпох. Для полного периода наблюдений 28 годовых выборок суммировались по интервалам применяемой в конкретном случае дискретной временной шкалы. В результате анализа одного СР определялась вероятность P_M (для месячной дискретной шкалы) и $P_{10д}$ (для десятидневной) того, что данный дискретный ряд можно отнести к неравномерному распределению. Результаты анализа СР для четырех выбранных субрегионов по четырем магнитудным диапазонам для трех диапазонов по глубине представлены в табл. 2. Анализ таблицы показывает, что для большей части выборок распределение событий может считаться неравномерным с вероятностью $P > 0.9$ как для месячной шкалы (P_M), так и для 10-ти дневной шкалы ($P_{10д}$). Это справедливо, даже если не

производить дифференцирования событий по глубинам. Но в отдельных случаях P принимает значение существенно ниже, например $P_M = 0.37$ для о. Хоккайдо в магнитудном диапазоне $5 < M \leq 6$ или $P_M = 0.55$ для Северных Курил в этом же МД. Если разделить события на две группы: неглубокие и глубокие, то значения P для неглубоких событий, как правило, увеличиваются, а для глубоких – уменьшаются. Следует отметить также, что при использовании 10-ти дневной шкалы для некоторых субрегионов (например, Хоккайдо для МД $4.0 < M \leq 5.0$) значения $P_{10д}$ (0.9976) значительно превышают значения P_M (0.6182). Это объясняется тем, что для некоторых субрегионов именно в 10-ти дневные интервалы происходит резкий скачок количества событий, а в предыдущие и последующие 10 дней происходит резкий спад, и если для них использовать месячную шкалу, то этот скачок может быть существенно сглажен.

Будем далее обозначать P_{sh} – как вероятность того, что распределение неравномерно для выборки, состоящей из неглубоких землетрясений; а P_{dp} – как ту же вероятность для выборки из глубоких со-

бытий. Для хорошо заполненных выборок в таблицах представлены результаты анализа по критерию χ^2 (прямой шрифт); а по слабо заполненным выборкам – по методу М-С (курсив). Когда количество событий в СР было вдвое меньше, чем количество дискретных интервалов временной шкалы, то, как правило, эти СР не могли быть использованы для корректного анализа (в таблицах ставились символы: н/д). При количестве событий в выборке $N \leq 5$ статистический анализ блокировался программно.

Далее был проанализировано, как распределились значения P по совокупности всех 16-ти выборок (4 субрегиона и 4 МД) для неглубоких событий и глубоких событий отдельно (тоже 16 выборок). Использовались обе дискретные шкалы (месячная и десятидневная), но для каждой из 16 выборок использовалась та шкала, для которой наиболее ярко выражены максимумы в распределении неглубоких событий по временным интервалам и наблюдается большее значение для величины $P_{sh} - P_{dp}$. Следует отметить, что реальное количество выборок несколько меньше: 15 для неглубоких событий и 14 для глубоких (не учитывались выборки с $N < 5$).

Таблица 2. Результаты тестирования статистических рядов для отдельных субрегионов для месячной дискретной шкалы.

Название субрегиона	Для интервалов – 1 месяц			Для интервалов – 10 дней			Кол-во событий		
	Н – все	Н ≤ 70км	Н > 70км	Н – все	Н ≤ 70км	Н > 70км	Н – все	Н ≤ 70км	Н > 70км
	P_M	P_M	P_M	$P_{10д}$	$P_{10д}$	$P_{10д}$	N	N sh	Ndp
$3 \leq M \leq 4$									
Ю.Курилы	0.9999	0.9999	0.8321	0.9999	0.9999	0.3486	3549	2826	66
Ср.Курилы	0.9925	0.9999	0.9227	0.9831	0.9998	0.6391	1014	844	197
Сев.Курилы	0.9378	0.9156	0.8682	0.8356	0.5571	0.7723	1381	1143	238
о. Хоккайдо	0.9545	0.8918	0.8737	0.9765	0.9340	0.8675	799	489	310
$4 < M \leq 5$									
Ю.Курилы	0.9999	0.9999	0.8373	0.9999	0.9999	0.9974	3407	2715	692
Ср.Курилы	0.9999	0.9999	0.1922	0.9999	0.9999	0.2446	2802	2256	546
Сев.Курилы	0.9989	0.9973	0.9731	0.9594	0.9966	0.9314	1370	1123	247
о. Хоккайдо	0.8529	0.6182	0.9308	0.9584	0.9976	0.9250	1271	726	545
$5 < M \leq 6$									
Ю.Курилы	0.9881	0.9978	0.3608	0.9587	0.9973	0.2145	237	190	47
Ср.Курилы	0.9313	0.9630	0.1564	0.9689	0.9855	0.3074	287	241	46
Сев.Курилы	0.5501	0.5713	0.5480	0.9900	0.9880	0.9980	141	118	23
о. Хоккайдо	0.3734	0.7319	0.0441	0.9980	0.9950	0.9970	129	89	40
$M > 6$									
Ю.Курилы	0.8180	0.6460	н/д	н/д	н/д	н/д	18	15	3
Ср.Курилы	0.9500	0.9800	н/д	н/д	н/д	н/д	17	13	4
Сев.Курилы	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	11	10	1
о. Хоккайдо	0.9980	0.8900	н/д	н/д	н/д	н/д	11	7	4

Примечания. P_M – вероятность того, что выборка по месячной дискретной временной шкале не подчиняется равномерному закону распределения; $P_{10д}$ – та же вероятность для 10-ти дневной временной шкалы; N – количество элементов в выборке; Nsh – количество элементов в выборке для неглубоких событий; Ndp – количество элементов в выборке для глубоких событий. Запись “н/д” – недостаточное количество данных в выборке для тестирования. Значения вероятностей в таблице, полученные с применением критерия Пирсона, приведены прямым шрифтом; для критерия Монте-Карло – курсивом.

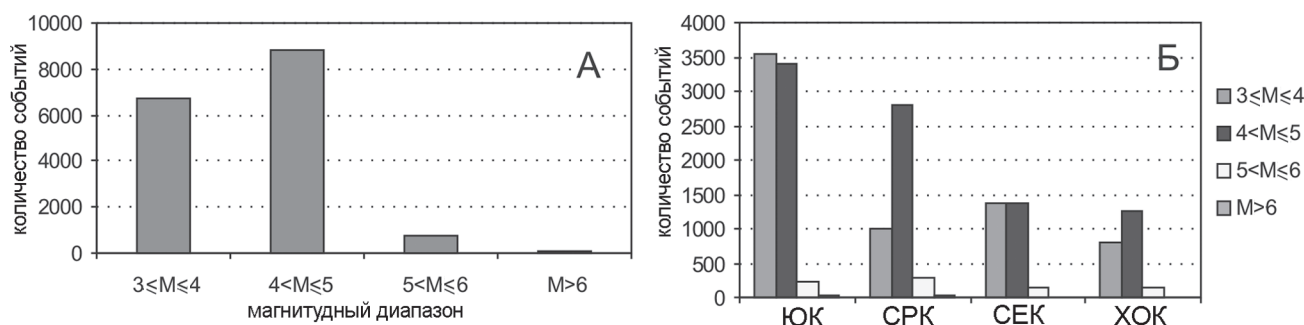


Рис. 3. Распределение сейсмических событий по магнитудным диапазонам для полного интервала наблюдений. А – для всего исследуемого региона. Б – для каждого исследуемого субрегиона отдельно.

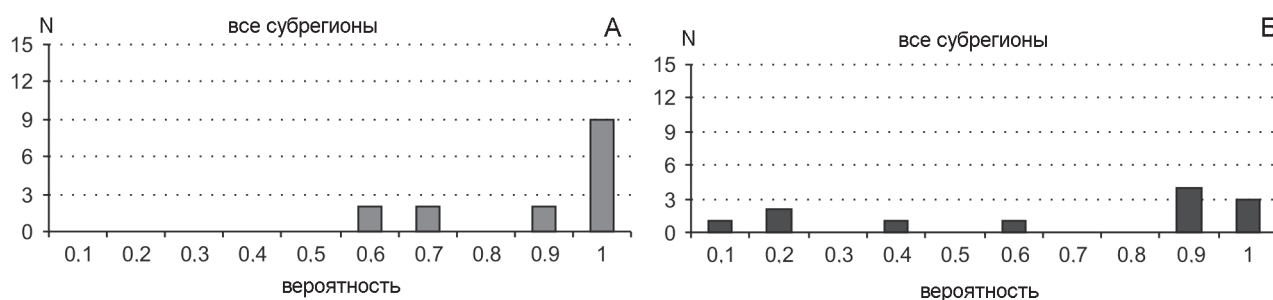


Рис. 4. Распределение значения вероятности по месячной шкале по совокупности всех тестируемых выборок. По горизонтальной оси – значения вероятности того, что выборка не является равномерной, по вертикальной оси – количество протестированных выборок: А – для выборок неглубоких событий; Б – для выборок глубокофокусных событий.

Реальное количество событий, которые были обработаны после предварительной очистки каталога, составило 16444 события. Суммарная гистограмма распределения событий по магнитудным диапазонам по всему исследуемому региону представлена на рис. 3А. На рис. 3Б представлено распределение землетрясений по МД в базе данных для каждого субрегиона. Анализ гистограмм по полному интервалу наблюдений показывает, что как для всего региона, так и для отдельных субрегионов (СРК и ХОК) магнитудный диапазон $3.0 \leq M \leq 4.0$ нельзя считать представительным. С некоторой натяжкой можно использовать данные для анализа по ЮК и СЕК. Далее мы вернемся к этим распределениям событий по МД для выборочных временных интервалов для всех рассматриваемых субрегионов.

На рис. 4А показано, как распределились значения вероятностей для 15 выборок по неглубоким событиям, а на рис. 4Б – для 12 выборок по глубоким событиям. Видно, что для неглубоких событий по 11 выборкам из 15 значения P_{sh} расположены между 0.9 и 0.9999, для одной выборки $P_{sh} = 0.89$. Таким образом, показано, что подавляющее большинство неглубоких землетрясений распределено в течение года неравномерно. Выборку для неглубоких событий по

Южным Курилам для магнитудного диапазона $M > 6$ с $P_{sh} = 0.646$ некорректно признать неравномерной. Общее количество событий в ней 18, а неглубоких событий – 15. Как правило, для Южных Курил и Хоккайдо лучше использовать 10-ти дневную временную шкалу (именно на ней возникают резкие максимумы в отдельных временных интервалах, но для столь малого количества событий применение 10-ти дневной шкалы (36 временных интервалов в течение года) некорректно. Для 12 выборок из глубоких событий (рис. 4Б) значения P_{dp} занимают всю шкалу оси абсцисс от интервала 0–0.1 до 0.9–0.999. Ярко выраженного максимума на этом графике нет, и большую часть глубоких событий следует признать распределенными в течение года равномерно. Практически все выборки с $P_{dp} > 0.8$ приходятся на границу субрегиона Южные Курилы и Хоккайдо, что может быть признаком того, что значение N_{por} , используемое для разделения событий на глубокие и неглубокие, в этом регионе находится глубже. Таким образом, для неглубоких событий нулевая гипотеза о равномерности распределения событий в течение года опровергается, неравномерность распределения этих событий статистически значима. Для глубоких событий нулевая гипотеза, напротив, подтверждается.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ВО ВРЕМЕНИ

Далее проведен анализ: где располагаются наиболее существенные экстремумы в распределении событий во времени, как меняется положение этих экстремумов в зависимости от магнитудного диапазона и от расположения субрегиона. Для этого по каждой выборке определялись моменты времени (в течение года), когда происходят статистически значимые всплески количества событий в течение одного дискретного временного интервала. Отбиралось не более 3 таких временных интервалов. Рассматривались только выборки с неглубокими событиями. Положение этих максимумов иногда меняется для разных МД в пределах одного субрегиона и от субрегиона к субрегиону. По совокупности всех выборок (все субрегионы, все МД) по полному интервалу наблюдения для всех изучаемых регионов и МД определялась степень сейсмической активности, проявляющейся на дискретных интервалах в течение года.

На рис. 5 приведено суммарное распределение максимумов сейсмической активности по месяцам года на круговой диаграмме. Светло-серый круг в центре диаграммы соответствует равномерному распределению максимумов по месячной годовой шкале. Можно утверждать, что в общем случае максимальное количество событий приходится на зимние месяцы: декабрь, январь, февраль и март, с наиболее ярко выраженным максимумом в декабре. Второй пик активности приходится на июль. Между периодами активности расположены периоды спада (апрель, май, сентябрь).

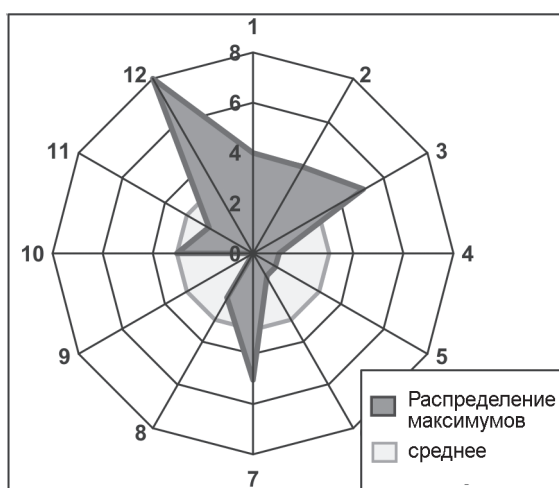


Рис. 5. Круговая диаграмма максимумов сейсмической активности по всем выборкам.

Круговая шкала – месяцы года. Радиальная шкала – количество максимумов.

Далее полный интервал наблюдений (28 лет) был поделен на несколько пятилетних выборочных интервалов для определения степени устойчивости феномена внутригодовой неравномерности сейсмических событий и степени изменчивости положения максимумов сейсмической активности к изменению длительности интервала наблюдения. Устойчивость рассматривалась отдельно для каждого субрегиона по всем МД для следующих годовых интервалов: 1980–1984, 1985–1989, 1990–1994, 1995–1999, 2000–2007. Для двух субрегионов (ЮК и ХОК) вместо интервала 2000–2007 использовалось два интервала: 2000–2004 и 2005–2007 (трехлетний). В качестве примера ниже приводится подробный анализ и сопоставление внутригодовой неравномерности сейсмической активности для полного и всех выборочных временных интервалов для субрегиона СРК.

Исходно в базе для СРК было 5009 событий, а после предварительной очистки каталога осталось 4120 событий. Результаты анализа выборок для пяти временных интервалов по четырем магнитудным диапазонам для трех диапазонов по глубине представлены в табл. 3.

На рис. 6 показано, как распределились значения вероятностей для полного интервала наблюдений для 16 выборок по неглубоким событиям (P_{sh} , рис. 6А), а на рис. 6Б – для 13 выборок по глубоким событиям (P_{dp}). Для неглубоких событий 14 выборок (из 16) имеют $P_{sh} > 0.9$ и две выборки – $P_{sh} = 0.886$ и $P_{sh} = 0.798$. Последняя выборка относится к магнитудному интервалу $3 \leq M \leq 4$, который нельзя считать представительным для данного субрегиона. Среднее значение $P_{sh} = 0.958$ для всех МД по полному интервалу наблюдений. Для 13 выборок из глубоких событий (рис. 6Б) значения P_{dp} занимают практически всю шкалу оси абсцисс от интервала 0–0.1 до 0.8–0.9. Яркого выраженного максимума на этом графике нет. Среднее значение $P_{dp} = 0.496$ по полному интервалу наблюдений для всех МД, следовательно большую часть глубоких событий следует признать распределенными в течение года равномерно.

Далее были определены средние значения P_{sh} и P_{dp} для всех пяти выборочных временных интервалов наблюдений (среднее определялось по четырем МД в каждом временном интервале). Полученные значения представлены в табл. 4. Значения P_{sh} для всех выборочных интервалов незначительно отклоняются от значения P_{sh} для полного интервала (максимальная разница около 0.05), так же как и значения P_{dp} (здесь максимальное расхождение около 0.12).

Установлено: 1. Неглубокие землетрясения равномерно считать распределенными неравномерно в

Таблица 3. Результаты тестирования выборок по субрегиону Средние Курилы для месячной и 10-ти дневной дискретных шкал для четырех магнитных диапазонов и пяти выборочных интервалов наблюдений.

Период наблюдений	Для интервалов – 1 месяц			Для интервалов – 10 дней			Количество событий		
	Н – все	Н ≤ 70 км	Н > 70 км	Н – все	Н ≤ 70 км	Н > 70 км	Н – все	Н ≤ 70 км	Н > 70 км
	P_M	P_M	P_M	$P_{10д}$	$P_{10д}$	$P_{10д}$	N	Nsh	Ndp
$3 \leq M \leq 4$									
1980–1984	0.6555	0.9177	0.1847	0.9220	0.9870	0.9225	59	41	18
1985–1989	0.0271	0.1969	0.9645	0.4883	0.8861	0.8096	271	231	40
1990–1994	0.9999	0.9999	0.8572	0.9999	0.9999	0.8869	257	222	35
1995–1999	0.9997	0.9999	0.3352	0.9891	0.9990	0.7925	223	166	57
2000–2007	0.7053	0.5671	0.5077	0.7937	0.7980	0.7277	231	184	47
$4 < M \leq 5$									
1980–1984	0.9981	0.9951	0.5298	0.9960	0.9958	0.3980	291	246	45
1985–1989	0.9999	0.9999	0.5218	0.9999	0.9999	0.4360	510	434	76
1990–1994	0.9999	0.9999	0.6903	0.9999	0.9999	0.3712	559	447	112
1995–1999	0.9999	0.9999	0.7450	0.9999	0.9999	0.9319	541	406	135
2000–2007	0.9999	0.9999	0.4690	0.9999	0.9999	0.9197	901	723	178
$5 < M \leq 6$									
1980–1984	0.9280	0.9480	н/д	0.9943	0.9942	н/д	30	28	2
1985–1989	0.8087	0.9179	н/д	0.9999	0.9998	н/д	39	36	3
1990–1994	0.9918	0.9992	0.4037	0.9999	0.9999	н/д	59	50	9
1995–1999	0.9860	0.9860	0.9660	0.9920	0.9970	н/д	49	40	9
2000–2007	0.8837	0.9089	0.0868	0.9900	0.9920	0.8800	110	87	23
$M > 6$									
1980–1984	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	1		
1985–1989	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	1		
1990–1994	0.9400	0.9600	н/д	н/д	н/д	н/д	5	4	1
1995–1999	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	2		
2000–2007	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	8	5	3

Примечание. В первом столбце приведены границы выборочных временных интервалов. Обозначения см. табл. 2.

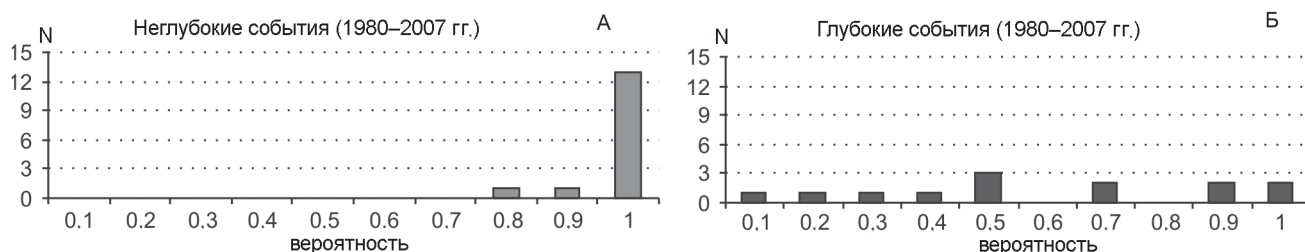


Рис. 6. Распределение значения вероятности по совокупности тестируемых выборок по Средним Курилам. По горизонтальной оси – значения вероятности того, что выборка не является равномерной, по вертикальной оси – количество протестированных выборок: А – для выборок из неглубоких событий; Б – для выборок из глубоких событий.

течение года на месячной и десятидневной дискретных временных шкалах, и эта неравномерность одинаково проявляется как на длительных, так и на более коротких интервалах наблюдений. 2. Глубокие землетрясения правомерно считать равномерно распределенными в течение года на месячной и десятидневной дискретных временных шкалах, и эта равномерность одинаково проявляется как на длительных, так и на более коротких интервалах наблюдений.

Таким образом, показана устойчивость феномена внутригодовой неравномерности к уменьшению интервала наблюдения вплоть до пятилетнего для

Таблица 4. Средние значения вероятностей P_{sh} и P_{dp} для полного и пяти выборочных интервалов наблюдений.

	Временные интервалы	Среднее значение вероятности P по всем МД для выборок с	
		неглубокими событиями	глубокими событиями
		P_{sh}	P_{dp}
1	1980–2007	0.9571	0.496
2	1980–1984	0.9536	0.357
3	1985–1989	0.9346	0.623
4	1990–1994	0.9997	0.544
5	1995–1999	0.9953	0.540
6	2000–2007	0.9023	0.428

неглубоких событий и эффекта равномерности для глубоких событий. Использование более коротких интервалов наблюдений нецелесообразно для землетрясений с $M > 5$. По табл. 3 можно видеть, что при пятилетних интервалах наблюдений с $M > 6$ практически во всех выборках количество остающихся событий недостаточно для проведения статистического анализа. Такой же эффект наблюдается и для части выборок с $5 < M \leq 6$. При дальнейшем дроблении для корректного анализа может остаться лишь один МД: $4.0 < M \leq 5.0$.

Далее рассматривалась степень изменчивости положения максимумов сейсмической активности к изменению длительности интервала наблюдения. Анализировалось положение максимумов для СРК субрегиона для полного и всех пятилетних выборочных интервалов наблюдений. Для этого применялись те же процедуры, которые использовались ранее при суммарном анализе максимумов сейсмической активности по всем изучаемым субрегионам. На рис. 7 приведено распределение максимумов сейсмической активности по месяцам года на круговой диаграмме по полному интервалу наблюдений по всем МД (фрагмент во второй строке в двойной рамке) и для пяти выборочных интервалов наблюдений (пять фрагментов в одинарных рамках).

Для полного интервала наблюдений наиболее резкий пик сейсмической активности приходится на два зимних месяца: декабрь и январь. Отмечаются всплески активности, существенно превышающие средние значения в октябре и мае. Все остальные месячные дискретные интервалы характеризуются отсутствием значимых максимумов сейсмической активности, либо их количество меньше среднего. Анализ круговых диаграмм для выборочных интервалов наблюдений показывает наличие значимых максимумов в декабре или январе для всех интервалов

Таким образом, подтверждается устойчивость положения максимумов сейсмической активности к изменению длительности интервала наблюдения для событий с $M < 6.0$. Анализ для более сильных событий на таких интервалах некорректен из-за очень малого количества событий в выборке. Так же, как и при анализе внутригодовой неравномерности, дробление интервала наблюдения нецелесообразно для сильных событий с $M > 6$. Для таких событий интервалы наблюдений должны быть не менее 40–50 лет.

Результаты анализа по степени устойчивости внутригодовой неравномерности сейсмических событий к изменению длительности интервала наблюдения для остальных трех субрегионов (СЕК, ЮК и ХОК) аналогичны рассмотренному примеру для СРК.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате статистической обработки сейсмических данных показано:

1. Для исследованных субрегионов неглубокие землетрясения со средней вероятностью $P_{sh} = 0.955$ правомерно считать распределенными неравномерно на месячной и десятидневной дискретных временных шкалах. Эта неравномерность одинаково проявляется как для длительных, так и для более коротких интервалов наблюдений.

2. Глубокие землетрясения правомерно считать распределенными (среднее $P_{dp} = 0.556$) в течение года равномерно на месячной и десятидневной дискретных временных шкалах. Эта равномерность одинаково проявляется как для длительных, так и для более коротких интервалов наблюдений.

3. Показана устойчивость феномена внутригодовой неравномерности к уменьшению интервала наблюдения вплоть до пятилетнего для неглубоких событий и эффекта равномерности для глубоких событий при условии представительности выборок для исследуемой группы событий.

4. Обнаружено, что в общем случае максимальное количество событий приходится на зимние месяцы: декабрь, январь, февраль и март, с наиболее ярко выраженным максимумом в декабре. Другой заметный пик активности приходится на июль. Между периодами активности расположены периоды спада.

5. Подтверждается устойчивость положения максимумов сейсмической активности к изменению длительности интервала наблюдения для событий с $M < 6.0$. Для сильных событий с $M > 6$ для получения представительных выборок по этим землетрясениям интервалы наблюдений должны быть не менее 40–50 лет.

Таким образом, можно сделать заключение, что на неглубокие землетрясения воздействует дополнительный фактор, который вызывает неравномерную активизацию этих событий в течение года. Если внутригодовая периодичность действительно существует, то проявление сейсмических событий зависит от позиции системы Земля–Луна на плоскости эклиптики или от факторов, которые изменяются во время продвижения системы Земля–Луна вдоль плоскости эклиптики.

Известно, что система Земля–Луна (точнее, центр масс этой системы – барицентр) движется в плоскости эклиптики вокруг Солнца по эллиптической орбите. Наименьшее расстояние от Солнца (перигелий) приходится в настоящее время на 4 января (а наибольшее (афелий) – на 4 июля). Т.е. приливные

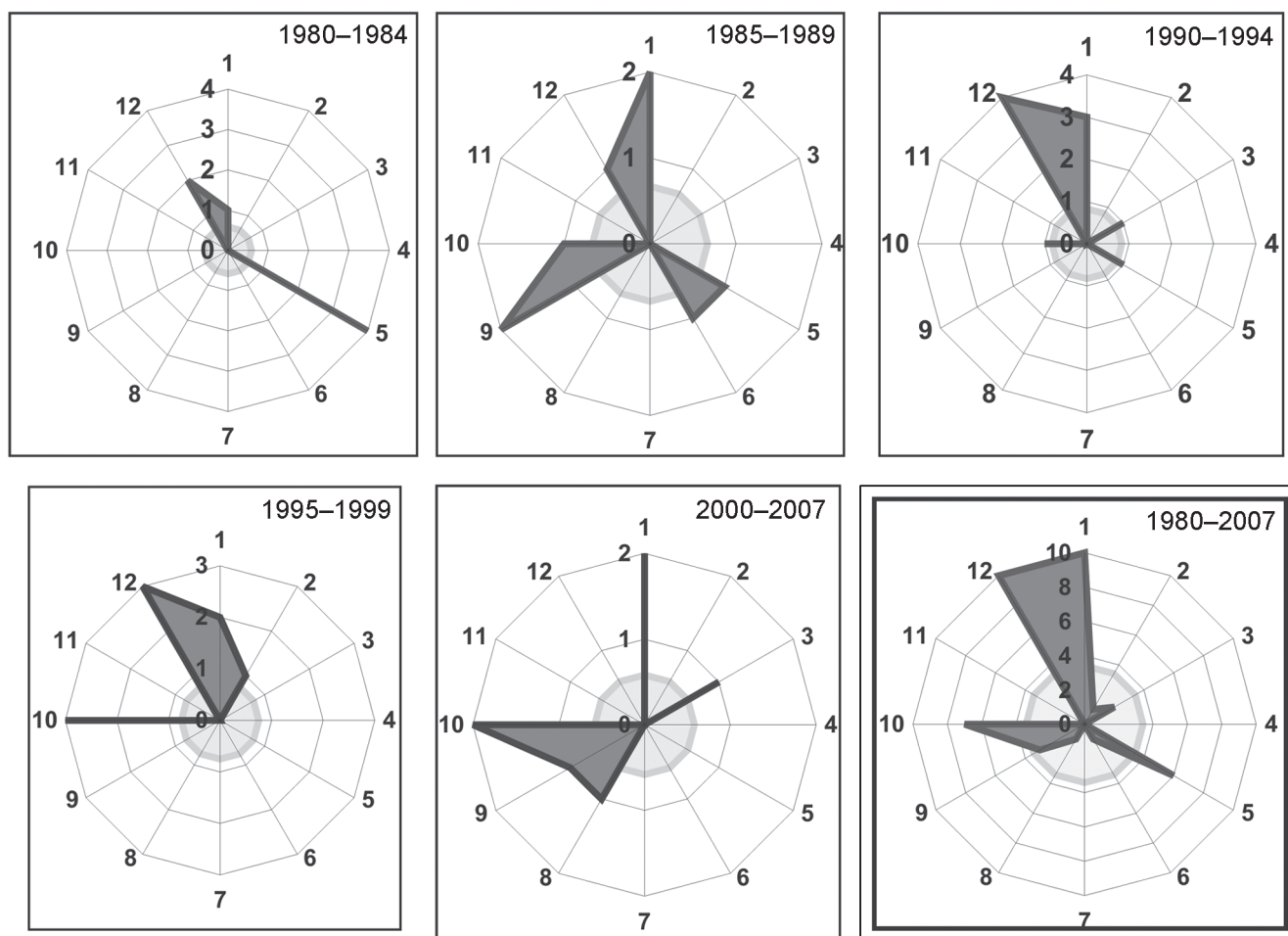


Рис. 7. Круговые диаграммы значимых максимумов сейсмической активности по Средним Курилам для выборочных и полного интервалов наблюдений.

Диаграмма для полного интервала наблюдения в двойной рамке. Круговая шкала – месяцы года. Радиальная шкала – количество максимумов. Светлый круг в центре диаграммы – среднее значение количества максимумов на один дискретный интервал шкалы. Там, где максимум окружен двумя дискретными интервалами с отсутствием значимых максимумов, круговая диаграмма вырождается в толстую линию.

воздействия от Солнца максимальны именно в зимние месяцы.

В связи со сказанным выше хотелось бы процитировать В.А. Магницкого [12]: “Хотя землетрясения вызываются явно тектонической деятельностью Земли, тем не менее делаются многочисленные попытки установить связь между ними и другими явлениями. В настоящее время наибольшего внимания заслуживает связь числа землетрясений с годичным обращением Земли вокруг Солнца. Из всех других зависимостей эта связь проявляется статистически с наибольшей надежностью. Однако природа такой связи, если она действительно есть, остается совершенно неясной”.

Основным аргументом против попытки связать внутригодовую периодичность в распределении сейсмических событий с солнечными приливами яв-

ляется незначительная величина приливных солнечных воздействий, даже по сравнению с лунными суточными приливами (считается, что суточные солнечные приливы в 2.17 раза меньше лунных). В то же время, задача взаимного притяжения для трех тел (Земля–Луна–Солнце) остается аналитически нерешенной.

Относительно второго пика сейсмической активности в летние периоды можно отметить, что его возникновение находит объяснение в теории приливов [13]. Зональная функция, определяющая лапласовские приливы первого типа, имеет период, равный 14 суткам в случае Луны и 6 месяцам – в случае Солнца. Эти приливы изменяют главный момент инерции планеты. Поэтому “следует ожидать вариаций в скорости вращения Земли с указанными перио-

дами". Обнаружение 6-месячной периодичности в сейсмической активизации подтверждает физическую связь внутренних земных процессов с внешними возмущающими воздействиями.

Изменение приливных сил за счет изменения расстояния между Солнцем и Землей может считаться незначительным, так как расстояние меняется всего на 3.28 %. В работе [10] указывается, что при уменьшении расстояния между Солнцем и Землей на 3.3 % (от максимального в афелии до минимального к перигелию) сила приливного воздействия увеличивается примерно на 6.7 %.

Полная упругая энергия Земли, вызванная гравитационным притяжением Земли и Луны, не равна сумме энергий, соответствующих приливным деформациям от Солнца и Луны по отдельности. Ряд авторов [1, 2] указывают на возможность проявления значительных нелинейных эффектов в гравитационном взаимодействии тел такой системы в некоторые промежутки времени, что может быть причиной резкого усиления сейсмических процессов в эти периоды. Этими же авторами указывалось на некорректность простого суммирования воздействия от различных приливных составляющих.

В работе [2] показано, что полная упругая энергия Земли содержит третье слагаемое, обусловленное совместным влиянием этих небесных тел (зависящим от взаимного расположения небесных тел в пространстве), и этот дополнительный член очень существенен, что приводит к большим периодическим вариациям упругой энергии.

В работах [14, 15] при изучении влияния лунных приливов на сейсмическую активность на Земле указывается, что статистически значимое влияние вызывают длиннопериодные приливные воздействия, месячные и полумесячные, в отличие от суточных, хотя приливные силы от последних в несколько раз больше. Т.е. длительность воздействия в этом случае является более важным фактором, чем его сила, что хорошо согласуется с высказанным в работе [11] предположением о влиянии флюидов на процесс генерации коровых землетрясений. Максимальная фаза солнечного прилива продолжается около двух месяцев (декабрь–январь), и именно с этим периодом связаны максимумы сейсмической активности в рассматриваемых в данной работе дальневосточных субрегионах.

Полезно напомнить даты катастрофических землетрясений последних лет: Индонезийское землетрясение 2004 г. – 26 декабря (в это время Земля подходила к перигелию и было новолуние); Иранское землетрясение 2003 г. – 26 декабря; Симуширское

землетрясение 2006 г. – 15 ноября, Симуширское землетрясение 2007 г. – 13 января.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы приносят искреннюю благодарность к.ф.-м.н. Ким Ч.У. за предоставление региональных баз данных, полезные обсуждения и ценные рекомендации, к.ф.-м. н. Поплавской Л. Н. за критический анализ статьи и полезные советы, к.ф.-м. н. Лихачевой О. Н. за полезные замечания и правку статьи. Отдельная благодарность рецензенту д.ф.-м.н. Родкину М. В.

Работа была частично поддержана грантами РФФИ: 07-05-00142а и 08-05-99098.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
2. Баркин Ю.В., Феррандиш Х.М., Наварро Х.Ф. Приливы, движение плит, землетрясения // Материалы 37-го Тектонического совещания. Новосибирск, 10-13 февраля 2004 г. Т. 1. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2004. С. 41–43.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
4. Дещеревская Е.В., Сидорин А.Я. Ложная годовая периодичность землетрясений, обусловленная сезонными изменениями помех // Докл. РАН. 2005. Т. 400, № 6. С. 798–802.
5. Иванов-Холодный Г.С., Боярчук К.А., Чертопруд В.Е. Суточный эффект в глобальной сейсмичности Земли. Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений // Тезисы докладов III-ей международной конференции. Паратунка, Камчатка. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 13–14.
6. Иващенко А.И. О повторяемости сильных цунами в северо-западной части Тихого океана за последние 50 лет. Волны Цунами // Сб. статей АН СССР, СахКНИИ. Южно-Сахалинск, 1972. Вып. 29. С. 208–216.
7. Левин Б.В., Павлов В.П. Теоретико-полевой метод восстановления тензора напряжений в Земле с подвижным ядром // Теоретическая и математическая физика. 2001. Т. 128, № 3. С. 439–445.
8. Левин Б.В., Павлов В.П. Влияние астрономических факторов на вариации плотности энергии в твердой оболочке Земли // Физика Земли. 2003. № 7. С. 71–76.
9. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А. Внутригодовая повторяемость активизации сейсмического процесса для Тихоокеанского региона // Докл РАН. 2005. Т. 403, № 4. С. 1–7.
10. Левин Б.В. О природе некоторых периодических изменений в сейсмическом режиме Земли // Вестн. ДВО РАН. 2006. № 1. С. 51–58.
11. Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. О возможной природе сейсмической границы на глубине 70 км // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 1. С. 101–104.
12. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Наука, 2006. 390 с.

13. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
14. Моргунов В.А., Боярский Э.А., Степанов М.В. Землетрясения и фазы прилива // Физика Земли. 2005. № 1. С. 74–88.
15. Моргунов В.А., Боярский Э.А., Степанов М. В. // Докл. РАН. 2006. Т. 406, № 3. С 380–386.
16. Павлов В.П. Теория возмущения для тензора напряжений в Земле // Теоретическая и математическая физика. 2004. Т. 141. С. 117–130.
17. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
18. Родкин М. В. О возможной связи колебаний уровня Каспийского моря с сейсмичностью // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 6. С. 112–122.
19. Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93-105.
20. Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Овчинников В.М. Периодичности микросейсмических процессов // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 3. С. 400–403.
21. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–30.
22. Федоров В.М. Гравитационные факторы и астрономическая хронология геосферных процессов. М.: Изд-во МГУ, 2000. 367 с.
23. ISC. International Seismological Center. <http://www.isc.ac.uk>.
24. Kokus Martin, Ritter Darren. Lunar and Solar cycles in earthquakes of American West // Cycles. 1988. V. 39, N 8. P. 266–270.
25. Polumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy // Geophys J. Roy. Astron. Soc. 1986. V. 84, N 1. P. 93–99.
26. NEIC. National Earthquake Informational Center. <http://neic.usgs.gov>.
27. Sasorova E.V., Zhuravlev S.A. The peculiar properties of the within-year periodicity for seismic event distributions for some Pacific regions and astronomical factors. Proceedings. Topical problems of nonlinear wave physics. NWP-3. Nizhny Novgorod. 2005. P. 98–99.
28. Sasorova E.V., Zhuravlev S.A. The peculiar properties of the within-year periodicity for seismic event distributions for some Pacific regions and astronomical factors. Is. "Earthquake Prediction". Earthquake Prediction / Ed. S. Mukherjee. Brill. Leiden-Boston. 2006. P. 9–20.

M. Yu. Andreeva, Ye. V. Sasorova, B. V. Levin

The features of within-year earthquake distributions in the Kuril region

It was shown in the last years that the earthquake occurrence probability in some regions depended on the latitude of the study region and on the Moon and Sun tidal forces, which are determined by the mutual arrangement of the bodies in the Sun-Earth-Moon system. The observed irregularity in the Far Eastern regions (South, Central, and North Kuril Islands, and Hokkaido Island) was noticed before. The objective of our work is to prove statistical significance of irregularity in seismic events distribution in the course of year, and also to indicate that this irregularity manifests itself in different ways for earthquakes with various source depths and with various energy levels. The hypothesis about uniform earthquakes distributions in the course of year for shallow events is rejected; however, it is shown that deep earthquakes are distributed uniformly. It is first attempted to determine the stability degree of within-year irregularity of seismic events with respect to the duration of the observation time interval (from 28 to 5 years). Two peaks are noted in the earthquake annual distribution. The relation of peaks of within-year seismic activity to the position of the Earth on the ecliptic plane is considered. The principal maximum of seismic activity falls on November-March (corresponding to the minimum Earth-Sun distance).

Key words: regional seismicity, goodness measures, within-year earthquake distribution, Kuril Islands, .