УДК 551.24:550.34

ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ СЕЙСМИЧНОСТИ СЕВЕРО-ВОСТОКА АМУРСКОЙ ПЛИТЫ

^{1,2}Трофименко С.В., ²Быков В.Г.

¹*Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 677000, Нерюнгри, Кравченко, 16. e-mail: urovsky@yandex.ru*

²*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. 680000 Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.*

Представлены результаты моделирования годовой динамики сейсмической активности в различных интервалах магнитуд северо-восточного сегмента Амурской микроплиты по статистике количества землетрясений в различных фазах изменения скорости вращения Земли. Методами ранговой корреляции для интервалов магнитуд $2 \leq M < 4$ и $4 \leq M < 5$ показана теснота связи между изменением сейсмической активности и периодам уменьшения-увеличения скорости вращения Земли. Для землетрясений с магнитудами $5 \leq M < 6$ установлено пространственное группирование эпицентров в последовательность равноотстоящих в среднем через $(3.5-4)0$ однородных кластеров в направлении с востока на запад.

Ключевые слова: фазы активизации сейсмичности, скорость вращения Земли, пространственная модель сейсмических кластеров, деформационные волны, Амурская плита.

WAVE EFFECTS IN THE SPACE-TIME SEISMICITY NORTHEAST AMUR PLATE

^{1,2}Sergei V. Trofimenko, ²Victor G. Bykov

¹*Technical Institute (branch of) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Neriungry, 16 Kravchenko Str. e-mail: urovsky@yandex.ru*

²*Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia*

The simulation results of annual dynamics of seismic activity in different intervals of magnitudes of the northeastern segment of the Amur microplate according to statistics the number of earthquakes in different phases of change in the Earth's rotation. Methods rank correlation magnitudes for the intervals $2 \leq M < 4$ and $4 \leq M < 5$ shows the relationship between the change in the tightness of the seismic activity and reduce periods, increasing the speed of rotation of the Earth. For earthquakes with magnitudes $5 \leq M < 6$ established the spatial grouping of epicenters in the sequence of equally spaced an average of (3.5-4) 0 homogeneous clusters in the direction from east to west.

Keywords: seismic activation phase, the rotational speed of the Earth's, seismic spatial model of clusters, deformation waves, Amur plate.

Введение

В пределах зон взаимодействия Евразийской литосферной плиты с Амурской микроплитой по результатам сейсмологического анализа выделяются сейсмические зоны, сформированные внутриконтинентальными землетрясениями с залеганием гипоцентров в пределах от 5 до 70 км.

Область данного исследования охватывает сегменты северной, северо-восточной и восточной границ Амурской микроплиты, западным ограничением которой выбрано Темулякит-Джелтулакское сгущение эпицентров землетрясений субдолготного простирания, контролируемая Темулякитскими (Олекминскими) системами разломов [10]. Северная граница трассируется полосой эпицентров землетрясений субширотного простирания от области меридиональных Темулякитских (Олёкминских) разломов до Удской губы Охотского моря [7]. Центральная область сформирована динамическим взаимодействием кристаллических комплексов Алданского щита Сибирской платформы и Становой складчатой системы [8], где по данным

инструментальных наблюдений выделена Олекмо-Становая сейсмическая зона (ОСЗ) в пределах 56-580 СШ и 120-1390 ВД. Параллельно данной сейсмической зоне в полосе 54-560 СШ по сейсмологическим данным авторами [3] выделяется отдельная Тукурингра-Джагдинская сейсмическая зона (ТДЗ).

Для проведения анализа мы использовали данные каталогов Байкальского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.seisbykl.ru>), Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.emsd.ru>), а также данные, приведенные в сборниках «Землетрясения России» [1, 2] и региональный каталог Сахалинского филиала ГС РАН [4]. К рассмотрению приняты землетрясения с магнитудами $2 \leq M \leq 6$.

Результаты моделирования

Для проверки возможной зависимости сейсмической активности от фазы изменения скорости вращения Земли был произведен расчет числа землетрясений в интервале магнитуд $2 \leq M < 4$ при группировании событий на спадах, увеличении, минимумах и максимумах скорости. Суммирование числа землетрясений проводилось за январь-февраль-март+июль-август-сентябрь (1-3+7-9) и далее со сдвигом на один месяц. То есть всего получено шесть значений выборки числа землетрясений. Распределение количества землетрясений в данном интервале магнитуд показано на рисунке 1.

Расчет количества землетрясений по двум трехмесячным периодам в различных фазах движения показал, что максимум сейсмической активности проявляется в зимне-летний период, минимум – в весенне-осенний. То есть сейсмичность увеличивается при уменьшении изменения модуля скорости (Рис. 1), минимальна в периоды увеличения.

Рис. 1. Распределение относительного количества землетрясений в интервале магнитуд $4 \leq M \leq 5$ по фазам изменения модуля скорости горизонтального смещения блока .
 Цифры горизонтальной оси диаграммы – цифровые идентификаторы месяца года. Цифры над гистограммой – месяцы года, для которых производится суммирование числа землетрясений: 1-3 - январь-февраль-март и т.д. Кривая на диаграмме – график изменения модуля горизонтальной скорости движения блока (изменения модуля скорости вращения Земли).

Для оценки тесноты связи двух процессов (скорость-сейсмичность) был произведен расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена,

$$\rho = 1 - 6/(n^3 - n) \cdot \sum_{j=1}^n (R_j - S_j)^2$$

где $\sum_{j=1}^n (R_j - S_j)^2$ сумма квадратов разностей рангов скорости R_j и количества событий S_j , а n - число парных наблюдений.

В данном случае выборка модуля горизонтальной скорости представлена нормированными на единичный интервал значениями $v_j = (0.637, 0.401, 0.183, 0.236, 0.699, 0.843)$, а выборка числа землетрясений $N_j = (1218, 1238, 1244, 1166, 1146, 1140)$.

Соответственно, ранги, расположенные в порядке возрастания, для скорости равны $R_j = (4, 3, 1, 2, 5, 6)$ и для количества событий - $S_j = (4, 5, 6, 3, 2, 1)$.

Для шести значений критическое значение коэффициента Спирмена для уровня значимости $\alpha=0.01$ равно $\rho_a = 0.943$ (при $\alpha=0.05$, $\rho_{0.05}=0.829$). На основе экспериментальных данных получено значение коэффициента, рассчитанное по формуле (1), равное $\rho_{\text{exp}}=-0.829$. Величина ρ_{exp} по модулю равна значению 0.05 r , что указывает на обратную линейную зависимость двух процессов на уровне значимости $\square \square 0.05$. При сдвигекривой скорости на три интервала величина коэффициента становится равной $\rho_{\text{exp}} = 0.829$.

Здесь важно отметить следующее. Суммирование числа землетрясений производится по трем месяцам, следовательно, гистограмма числа землетрясений должна быть вынесена на середину интервала суммирования. То есть, сумма событий за месяцы (1-3+7-9) должна относиться к периоду (2+8) и т.д. Если сместить кривую модуля изменения скорости на интервал $\square = 1$, то коэффициент становится меньше $\text{exp } r = -0.77$, а при двукратном смещении $\square = -2$ практически равен нулю $\text{exp } r = -0.03$. Фактически, скорость вращения Земли достигает максимума в конце января, а распределение сейсмических событий за трехмесячный цикл принято равномерным, то есть без учета весов моментов времени землетрясений от начала цикла. Это означает, что с погрешностью ± 15 сут. можно считать, что сейсмическая активность непосредственно следует за изменением модуля скорости вращения Земли и коэффициент корреляции достигает максимума при нулевом сдвиге фаз (0) $\text{max exp } r \square \square \square$.

Корреляция между суммарным количеством землетрясений в интервале магнитуд $4 \leq M < 5$ и изменением модуля скорости вращения Земли.

Распределение количества землетрясений в интервале магнитуд показано на рисунке 2. Методика построения аналогична построениям в интервале магнитуд

Рис. 2. Распределение относительного количества землетрясений в интервале магнитуд $4 \leq M \leq 5$ по фазам изменения модуля скорости горизонтального смещения блока

Обозначения аналогичны Рис. 1.

Расчет количества землетрясений по трехмесячным периодам в различных фазах изменения модуля скорости показал, что максимум сейсмической активности проявляется в зимне-летний период, минимум — в весенне-осенний. Однако в данном случае зависимость прямая и сейсмичность увеличивается при увеличении скорости (Рис.2), минимальна в периоды увеличения скорости и, практически, одинакова в минимумах и максимумах модуля изменения скорости вращения Земли. Непосредственным численным моделированием установлено, что максимум коэффициента корреляции Спирмена (1) достигается при нулевом сдвиге фаз при значениях модуля горизонтальной скорости, нормированными на единичный интервал $j \square = (0.637, 0.401, 0.183, 0.236, 0.699, 0.843)$ и числа землетрясений $j N = (344, 321, 296, 301, 324, 349)$. То есть для интервалов магнитуд $4 \leq M < 5$ справедливо соотношение $(0) \max \exp r \square \square \square$. Однако значение коэффициента корреляции в данном интервале магнитуд выше чем для интервала $2 \leq M < 4$, то есть $(4 \ 5) (2 \ 4) \exp \exp r \square M \square \square r \square M \square$.

Одна из причин уменьшения коэффициента корреляции для интервала магнитуд $2 \leq M < 4$ может быть следствием миграции максимумов сейсмической активности (таблица 1, приложения). Например, если взять значения сумм по

кластерам (1-1, 2-1, 3-1), то предложенная процедура дает значение коэффициента корреляции (0) $\exp r = 0.943$, а для кластеров (1-2, 2-2, 3-2) и (1-3, 2-3, 3-3) $\exp r = (-0.257 \text{ и } -0.657)$, соответственно.

Пространственное распределение эпицентров землетрясений в интервале магнитуд $5 \leq M < 6$ в двух фазах изменения модуля скорости вращения Земли. Закономерное изменение сейсмической активности в интервалах магнитуд $2 \leq M < 5$ (Рис. 1, 2) послужили основанием для построения пространственной модели распределения эпицентров землетрясений с магнитудами от $M=5$ до $M=6$, при условии группирования их по фазовому признаку изменения модуля скорости вращения Земли. То есть, землетрясения в интервалах магнитуд $5 \leq M < 6$, объединяются в две группы по фазам уменьшения и увеличения модуля скорости. При увеличении модуля скорости происходит сжатие земной коры, при уменьшении - растяжение [6]. Таким образом, можно считать, что землетрясения сгруппированы по двум фазам «сжатие-расширение» Земли.

На рисунке 3 представлено пространственное распределение эпицентров землетрясений в данных интервалах магнитуд. Землетрясения сгруппированы по периодам из 6-ти месяцев «январь, февраль, март+июль, август, сентябрь» (фаза расширения), которые обозначены темными кружками, и «апрель, май, июнь+октябрь, ноябрь, декабрь» (фаза сжатия) - светлыми кружками. В первом приближении группы землетрясений в одинаковой фазе изменения модуля скорости разделены прямыми линиями.

Рис 3. Пространственное распределение эпицентров землетрясений с магнитудами от $M=5$ до $M=6$ северо-восточного сегмента Амурской.

Цифрами 1-4 обозначены области группирования землетрясений в фазах «сжатия - расширения» земной коры. Темные кружки - землетрясения в фазе замедления вращения Земли (расширения Земли), светлые – в фазе ускорения (сжатие Земли). Вынесены основные известные разломы различной кинематики из системы Станового Структурного шва и системы Тан Лу. Разломы: 1 – Тыркандинский; 2 – Центральнo-Сихотэ-Алинский; 3 – Ишу-Харпинский; 4 – Хинганский; 5 – Пауканский; 6 – Тугурский; 7 – Северо-Тукурингский; 8 – Становой; 9 – Тастахский; 10 – Мельгинский; 11 – Западно-Туранский; 12 – Селемджинский; 13 – Буссе-Норский; 14 – Синлунгоу; 15 – Темулякитский.

В первую (восточную) зону попадает шесть землетрясений фазы «расширения» и одно фазы «сжатия», то есть соотношение землетрясений с разными фазами равно (6-1). В тектоническом отношении данный сейсмический кластер объединяет в основном разломы восточного замыкания зоны Тан-Лу северо-восточного простираения, фрагментарно расчлененные меридиональным трансформным Тастахским разломом второго порядка. В северной части кластер объединяет восточные окончания субширотных Тугурского и Северо-Тукурингского разломов, к зоне динамического влияния которых приурочено пять землетрясений.

Три землетрясения произошли в блоке, ограниченном Ишу-Харпинским, Хинганским и Тастахским разломами. Два землетрясения в южной части

кластера можно отнести к зоне динамического влияния Тастахского трансформного разлома.

Для второй зоны землетрясений соотношение событий с разными фазами равно (12-2). Данный сейсмический кластер объединяет разломы системы Тан-Лу и субширотные структуры Станового краевого шва. За исследованный период активизации подверглись все структуры обеих систем разломов. Три группы землетрясений в южной, центральной и северной частях кластера зарегистрированы в блоках, ограниченных разломами различной кинематики и простирания.

Для третьей и четвертой зон землетрясений с разными фазами равно – (12-0) и (11-3), соответственно. Тектоническая расслоенность данных кластеров весьма мозаична. Здесь присутствуют разломы северо-восточной, северо-западной, субширотной и меридиональной ориентировки. Все системы разломов неоднократно активизировались, что отражается в группировании эпицентров землетрясений. Группа землетрясений из пяти событий в центральной части третьего кластера произошли в блоке, ограниченном сопряженной системой Буссе-Норского и Синлунгоу разломов северо-восточной ориентировки и Пауканского и Северо-Тукурингского субширотных разломов. В южной части данного кластера шесть событий контролируются разломами меридионального, субширотного и диагонального заложения. Компактная группа землетрясений в центральной части четвертого кластера зарегистрирована в блоке, ограниченном Северо-Тукурингским разломом и Становой системы разломов.

Западный кластер граничит с восточным замыканием Байкальской рифтовой зоны. Здесь зарегистрировано три землетрясения в фазе "расширения" в зоне динамического влияния меридиональных Темулякитских разломов и субширотного Северо-Станового разлома.

Из общих закономерностей можно отметить, что ширина зон группирования землетрясений в разных фазах изменения модуля скорости вращения Земли составляет в среднем (3.5-4)0. Эта величина равна половине

пространственного цикла сейсмической активности, на котором максимумы сейсмической активности замещаются минимумами, для интервалов магнитуд от $M=2$ до $M=4$, протяженность которого равна в среднем ≈ 7.260 и, идентифицирована как длина деформационной волны «сжатие-расширение» [5].

Таким образом, полученные результаты моделирования свидетельствуют о не случайном группировании землетрясений в различные периоды изменения скорости вращения Земли, а отражают реальные геофизические процессы, связанные с движением блоков земной коры [10], которые являются следствием воздействия на геологическую среду деформационных волн.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания №5.1771.2014/К Министерства образования и науки России и по программе «Дальний Восток», грант Дальневосточного отделения РАН 15-I-2-014.

Список литературы

1. Землетрясения России в 2004-2008 гг. Обнинск: ГС РАН, 2007-2010.
2. Землетрясения Северной Евразии. Обнинск: ГС РАН, 1997-2004.
3. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 5-17.
4. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104с.
5. Трофименко С. В., Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция сейсмической активности в зоне конвергентного взаимодействия Амурской и Евразийской литосферных плит // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 66-80.
6. Фридман А.М., Клименко А.В., Поляченко Е.В., Фридман М.В. О связи глобальной сейсмической активности Земли с особенностями ее вращения. // Сейсмология и вулканология. 2005. № 1. С. 67-74.
7. Ovsyuchenko, A.N., Trofimenko, S.V., Marakhanov, A.V., Karasev, P.S., and Rogozhin, E.A. (A). Source Zones of Strong Earthquakes in Southern Yakutia as Inferred from Paleoseismogeological Data //Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2009. Vol. 45. No. 2. PP. 101–117. DOI:10.1134/S1069351309020025.

8. Ovsyuchenko, A.N., Trofimenko, S.V., Marakhanov, A.V. et. al. Detailed Geological–Geophysical Studies of Active Fault Zones and the Seismic Hazard in the South Yakutia Region. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2009, Vol. 3, No. 4, pp. 356–373. DOI: 10.1134/S1819714009040046
9. Ovsyuchenko A. N., Trofimenko S. V., Marakhanov A. V., Karasev P. S., and Rogozhin E. A. Seismotectonics of the Transitional Region from the Baikal Rift Zone to Orogenic Rise of the Stanovoi Range. *Geotectonics*, 2010, Vol. 44, No. 1, pp. 25–44, Doi: 10.1134/S0016852110010036.
10. Trofimenko S.V., Bykov V.G., 2014. The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data. *Russian Journal of Pacific Geology*, V. 8. #4. pp. 247-255, doi: 10.1134/S1819714014040071.