

УДК 550.348.436(571)

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОЙ ПОЗИЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭЛЕМЕНТОВ ГЛУБИННОЙ РАЗРЫВНОЙ ТЕКТониКИ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА ПРИМАГАДАНСКОМ ШЕЛЬФЕ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2009 г. **Ю. Я. Ващилов**¹, Л. Ю. Калинина²

¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, Магадан, 685000

²Северо-Восточный государственный университет, Магадан, 685000

Поступила в редакцию 22.01.2009 г.

Представлены результаты количественного анализа связи землетрясений с тектонической раздробленностью земной коры на основании корреляционного анализа плотности и меры дискордантности разломов с показателями сейсмической активности (удельным количеством и удельной энергией землетрясений) для Примагаданского участка шельфа Охотского моря. На основании этих материалов выявлены принципиальные различия в структурном положении эпицентров землетрясений на суше и на море. В пределах Примагаданского шельфа Охотского моря наиболее вероятны землетрясения энергетического класса $K \geq 12$ на участках с пониженными значениями плотности ($0.04 < \tau \leq 0.06 \text{ км}^{-1}$) и меры дискордантности разломов ($2 < \|D\| \leq 4$), выделенных по гравиметрическим данным. Одной из причин подобной структурно-геодинамической особенности в пространственном положении эпицентров землетрясений, по мнению авторов, является термоизостазия – остывание литосферы и астеносферы при выделении тепла в окружающее Землю пространство (тепло поступало в верхние этажи Земли из мантии на мезокайнозойском этапе ее развития) и проседании вследствие этого океанического дна. Опускание дна океанов и воздымание материков приводят к возникновению ротационных тангенциальных сил, влияющих, на накопление напряжений в Тихоокеанском сейсмическом поясе. Годовой расход энергии ротационных сил и землетрясений имеют величину одного порядка 10^{18} Дж/г.

ВВЕДЕНИЕ

В [5] проведена количественная оценка связи землетрясений с тектонической раздробленностью земной коры на суше Северо-Востока России путем совместного анализа плотности и меры дискордантности разломов с показателями сейсмической активности (удельным количеством землетрясений и удельной энергией землетрясений).

Полученные результаты позволили выделить особенности пространственного распределения землетрясений на суше Охотско-Ленского сейсмического района: максимальный уровень сейсмической активности соответствует участкам со средними значениями меры дискордантности разломов, выделенных по гравиметрическим данным, и зонам повышенных горизонтальных градиентов изодискордант. Максимальная вероятность возникновения землетрясений энергетического класса $K \geq 12$ здесь соответствует средним значениям плотности разломов, выходящих на поверхность.

Подобное исследование было также проведено для территории, ранее никогда не изучавшейся количественными сейсмогеологическими методами. Таким районом является Примагаданский участок шельфа Охотского моря, где планируются и ведутся интенсивные поиски нефти и газа. Исследование

корреляционных связей землетрясений с разрывными структурами и узлами их пересечения проводилось, как и для юго-восточного фланга Охотско-Ленского сейсмического района, на основании расчетов следующих характеристик:

1. Для выявления связи землетрясений с разломами использовалась плотность (удельная длина) разломов – величина, характеризующая распределение интенсивности тектонической раздробленности земной коры по площади. На возможность применения плотности разломов для определения раздробленности земной коры указывают в своих работах Б.М. Богачкин и др., В.С. Имаев и др., В.Н. Смирнов и другие исследователи [8, 9, 13].

Значение плотности (удельной длины) разломов определялось по формуле:

$$\tau = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^m l_i, \quad (1)$$

где l_i – длина разлома; m – общее число разломов в квадрате палетки; S – площадь квадрата палетки, для которого вычисляется значение плотности разломов.

2. Для исследования пространственной связи землетрясений с разрывами и узлами их пересече-

ния использовалась введенная Ю.Я. Ващиловым мера дискордантности разломов [2, 3]. Мера дискордантности – это величина, характеризующая степень раздробленности поверхностей различных объектов разнонаправленными разломами, трещинами. Мера дискордантности может быть ненормированной D , и нормированной по площади $\|D\|$. Значение меры дискордантности определяется суммой модулей попарных векторных произведений прямолинейных отрезков разломов:

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{m-i} [\vec{l}_i \times \vec{l}_{i+k}] = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{m-i} |l_i l_{i+k} \sin(\alpha_{i+k} - \alpha_i)|, \quad (2)$$

$$\|D\| = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{m-i} [\vec{l}_i \times \vec{l}_{i+k}] = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{m-i} |l_i l_{i+k} \sin(\alpha_{i+k} - \alpha_i)|, \quad (3)$$

где \vec{l}_i – вектор-разлом, m – общее число разломов, $(\alpha_{i+k} - \alpha_i)$ – угол между направлениями простираний разломов, S – площадь, для которой вычисляется D и $\|D\|$.

3. Определение количественных корреляционных связей землетрясений с разломами и узлами их пересечения проводилось на основании введенных авторами показателей сейсмической активности – удельного количества землетрясений δN и удельной энергии землетрясений δE .

Значения данных величин определялись по формулам:

$$\delta N = \frac{N}{S}; \delta E = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (4)$$

где N, E_i – число и энергия землетрясений, эпицентры которых расположены в пределах участков с определенными значениями плотности или меры дискордантности разломов, S – площадь данных участков.

Результаты исследования представлены в следующем разделе.

Дискордантность, плотность разломов и сейсмичность Примагаданского участка шельфа Охотского моря. Сейсмическая активность района рассматривалась на основании построенной схемы пространственного распределения эпицентров землетрясений. При этом рассматривались землетрясения энергетического класса $K \geq 8.5$, зарегистрированные с 1963 по 2002 гг.

Были составлены схемы изолиний плотности и изодискордант разломов, выделенных по гравиметрическим данным (рис. 1, 2). Для построения схемы разломов по гравиметрическим данным на шельфе так же, как и на суше, использовались карты аномалий силы тяжести в редукции Буге. Выделение разломов по гравиметрическим и другим геофизическим данным практически является единственным методом изучения разрывной тектоники дна шельфа морей. Обнаружение сети разломов геолого-геоморфологическими методами под толщей воды невозможно или в значительной степени затруднено.

Схемы изолиний плотности и меры дискордантности разломов строились аналогично подобным схемам юго-восточного фланга Охотско-Ленского сейсмического района [5]. Величина плотности разломов рассчитывалась по формуле (1) в центре окна со стороной 25 км, нормированной меры дискордантности $\|D\|$ разломов – по формуле (3) в центре скользящего окна 50×50 км с шагом 25. Значения плотности разломов для исследуемого участка лежат в диапазоне $0 \leq \tau \leq 0.18$ (км⁻¹), меры дискордантности – $0 \leq \|D\| \leq 13$. Для дальнейшего количественного анализа были построены диаграммы зависимостей показателей сейсмической активности δN (км⁻¹) и δE (Дж/км²) от значений плотности и меры дискордантности разломов (рис. 3).

Анализ построенных распределений позволяет сделать вывод, что максимальное удельное количество землетрясений на шельфе приходится на участки с максимальными значениями плотности разломов, в то время как удельная энергия землетрясений имеет максимальное значение на участках, ограниченных изолиниями 4–6 (рис. 3а и 3б). Таким образом, максимальное число землетрясений $K \geq 8.5$ приурочено к участкам, с максимальной раздробленностью земной коры, в то время как землетрясения $K \geq 12$ тяготеют к участкам с минимальной тектонической раздробленностью (рис. 3а врезка).

Анализируя рис. 3, можно также отметить, что максимальное удельное количество землетрясений для моря приходится на участки со средними значениями меры дискордантности разломов (рис. 3в), в то время как максимальное значение удельной энергии землетрясений (рис. 3г) и максимальное удельное количество землетрясений энергетического класса $K \geq 12$ (рис. 3е врезка) имеют максимальное значение на участках, ограниченных изодискордантами 2–4.

Таким образом, комплексный анализ связи землетрясений с разломами и узлами их пересечения показал принципиальные отличия в пространственном распределении землетрясений на суше и на море. Максимальное удельное количество землетрясений энергетического класса $K \geq 12$, а, следова-

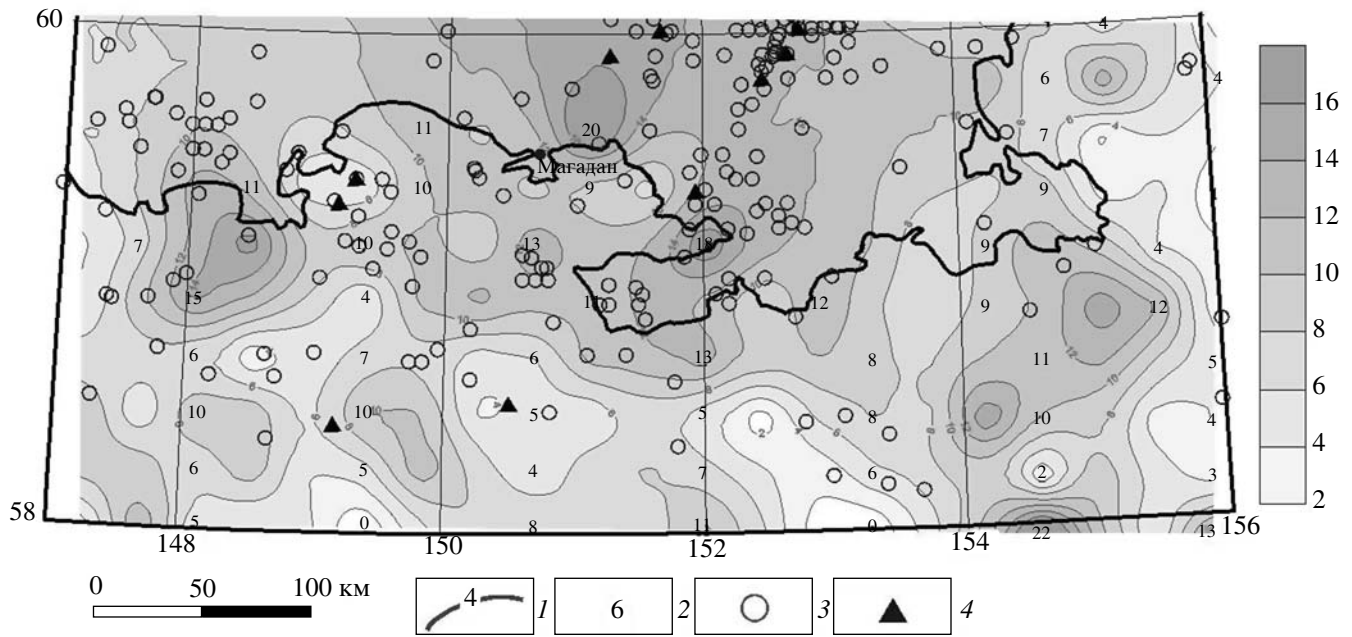


Рис. 1. Схема изолиний плотности разломов, выделенных по гравиметрическим данным, и пространственного распределения эпицентров землетрясений Примагаданского участка шельфа Охотского моря. 1 – изолинии плотности разломов; 2 – расчетные значения плотности разломов; 3–4 – эпицентры землетрясений энергетического класса: 3 – $8.5 \leq K < 12$; 4 – $K \geq 12$.

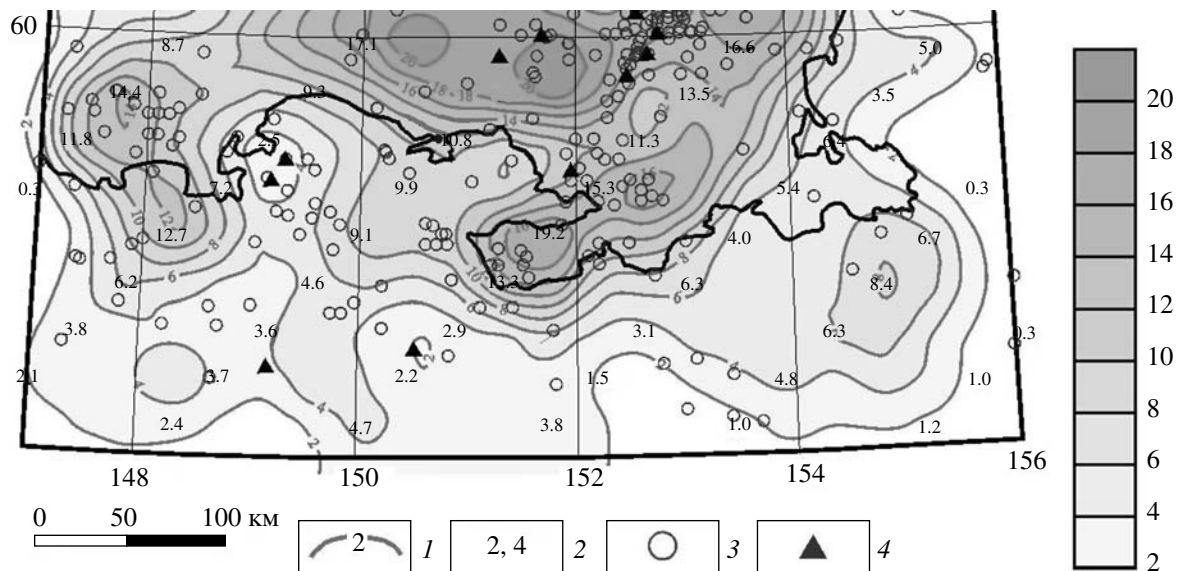


Рис. 2. Схема изодискордант разломов, выделенных по гравиметрическим данным, и пространственного распределения эпицентров землетрясений Примагаданского участка шельфа Охотского моря. 1 – изодискорданты; 2 – расчетные значения меры дискордантности разломов; 3–4 – эпицентры землетрясений энергетического класса: 3 – $8.5 \leq K < 12$; 4 – $K \geq 12$.

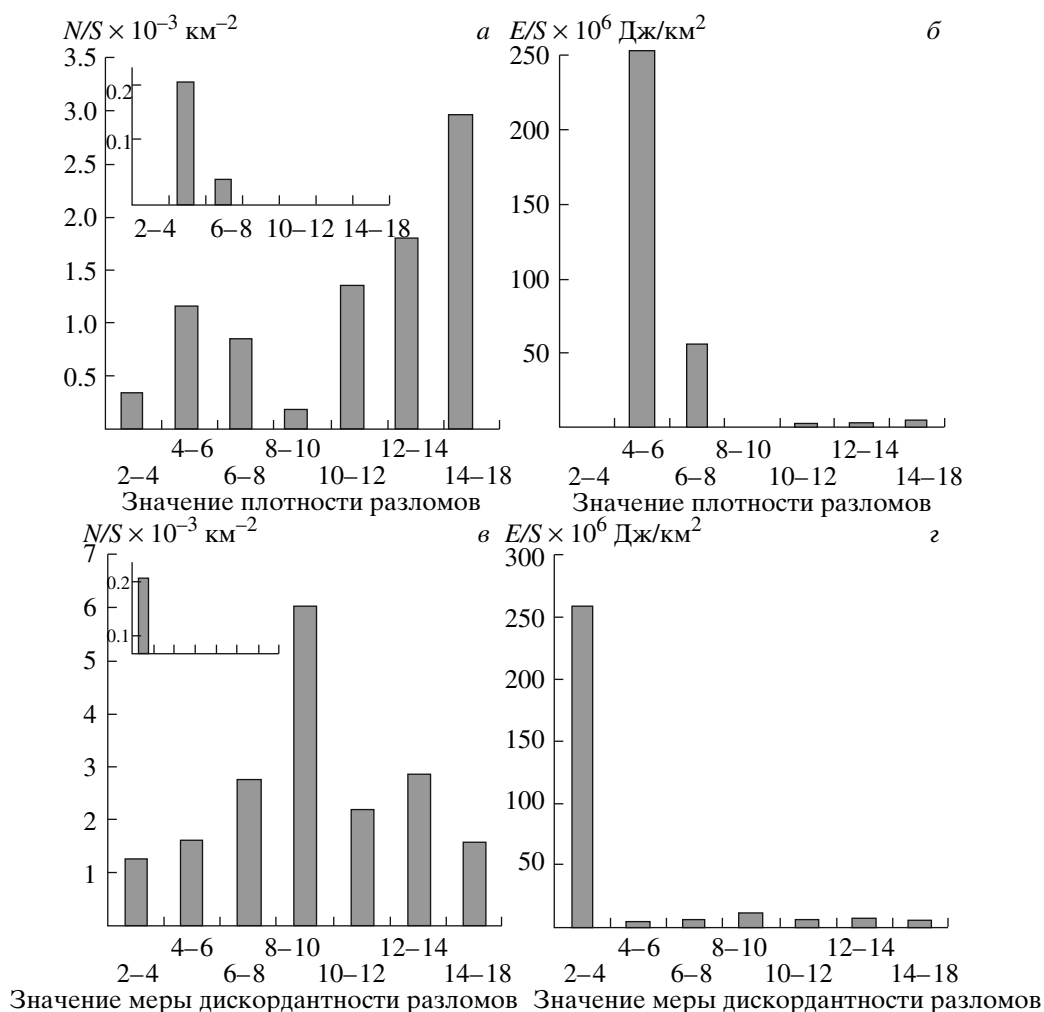


Рис. 3. Результаты анализа степени корреляции плотности и меры дискордантности разломов, выделенных по гравиметрическим данным, с показателями сейсмической активности Примагаданского шельфа Охотского моря. *а* – Зависимость удельного количества землетрясений ($N/S \times 10^{-3} \text{ км}^{-2}$) от значений плотности разломов (на врезке приведена зависимость удельного количества землетрясений ($N/S \times 10^{-3} \text{ км}^{-2}$) от значений плотности разломов для землетрясений энергетических классов $K \geq 12$); *б* – Зависимость удельной энергии землетрясений ($E/S \times 10^6 \text{ Дж/км}^2$) от значений плотности разломов; *в* – Зависимость удельного количества землетрясений ($N/S \times 10^{-3} \text{ км}^{-2}$) от значений меры дискордантности разломов (на врезке приведена зависимость удельного количества землетрясений ($N/S \times 10^{-3} \text{ км}^{-2}$) от значений меры дискордантности разломов для землетрясений энергетических классов $K \geq 12$); *г* – Зависимость удельной энергии землетрясений ($E/S \times 10^6 \text{ Дж/км}^2$) от значений меры дискордантности разломов.

тельно, и максимальная удельная энергия землетрясений тяготеют к областям с пониженными значениями плотности ($0.04 < \tau \leq 0.06 \text{ км}^{-1}$) и меры дискордантности разломов ($2 < \|D\| \leq 4$). Т. е. ощутимые землетрясения энергетического класса $K \geq 12$ наиболее вероятны на участках земной коры с пониженными значениями тектонической раздробленности и с минимальной дискордантностью разрывных нарушений.

Структурно-геодинамические особенности в пространственном положении эпицентров землетрясений на Примагаданском шельфе. Двойственная приуроченность участков выделения максимальной энергии землетрясений на шельфе – к зонам с пониженными значениями меры дискордантности и

плотности разломов – позволяет интерпретировать это явление как тяготение эпицентров сейсмических толчков к центральным частям блоков. Более тщательный анализ показывает, что часто такие блоки представляют собой локальные впадины мезокайнозойского осадочного чехла и современных осадков шельфа, отмечаемые пониженными значениями поля силы тяжести. Более детальный анализ показывает, что такие блоки чаще представляют собой грабенообразные впадины.

К близким по смыслу выводам относительно внеразломного положения эпицентров землетрясений пришли С.А. Федотов, его ученики и последователи при исследованиях структурной позиции эпицентров коровых землетрясений п-ов Камчатка [6,

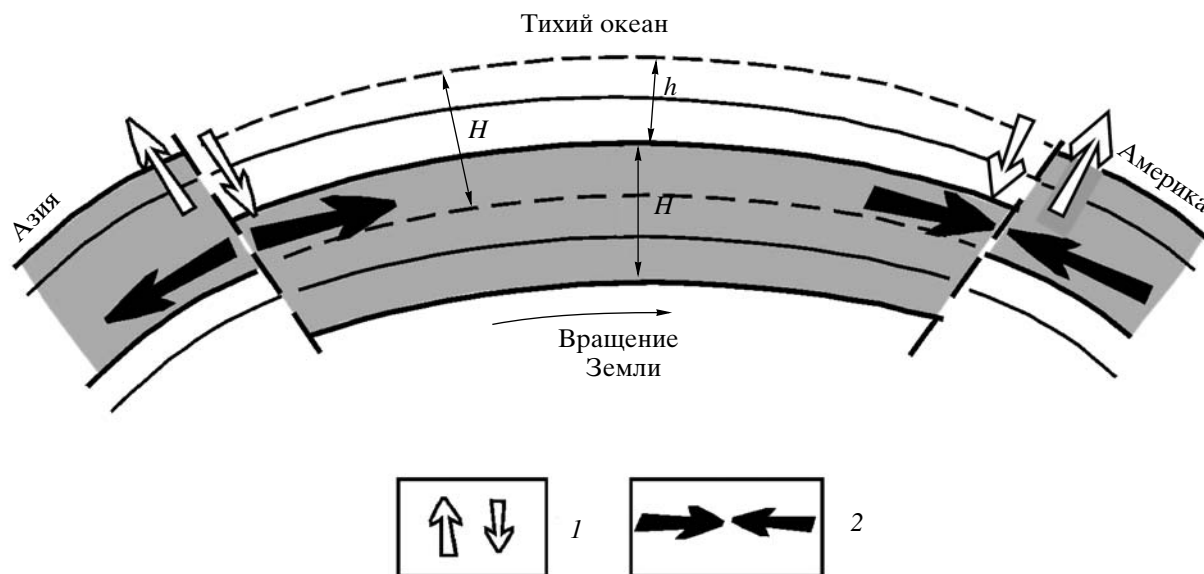


Рис. 4. Схема возникновения ротационных сил [17]. 1 – Первичные вертикальные перемещения материков и океанов; 2 – Вторичные тангенциальные силы ротационного происхождения.

15, 16]. Они показали отсутствие связи в пространственном распределении эпицентров коровых землетрясений и голоценовых разломов.

Для накопления больших напряжений и подготовки сильных землетрясений необходимо существование крупных нераздробленных блоков, т. к. энергетический потенциал землетрясений (магнитуда и энергетический класс) зависит от размеров сейсмического очага [7, 14]. В сейсмических районах Средней Азии при изменении размеров очага в $\sqrt[3]{10} = 2.15$ раза значение сейсмической энергии увеличивается на один десятичный порядок [14]. Расположение гипоцентров в середине блока и удаленность от существующих разломов существенно увеличивают объем ненарушенных пород, которые могут быть вовлеченными в процесс землетрясения. Такая постановка вопроса как будто бы указывает на возможность сильных землетрясений на Примагаданском шельфе. Подтверждения этому предположению в виде сейсмических событий пока нет.

Внеразломное положение очагов землетрясений характерно для западной акватории Тихого океана и зоны перехода от материка к океану с ее окраинными морями и островной и полуостровной сушей. Генезис таких землетрясений обусловлен процессами, которые приводят к углублению океанов и поднятию материков [17, 19]. На углубление океанов указывает факт существования гайотов – плосковершинных подводных гор на глубинах 1000–2000 м. Гайоты представляют собой изолированные плосковершинные подводные горы, вершины которых

срезаны абразией или увенчаны коралловым рифом. Большинство исследователей считают, что гайоты испытали опускание вместе с образующим их основанием океаническим дном. Аналогичная картина опускания подтверждается и данными бурения на атоллах, где породы коралловых рифов встречаются на глубинах 1200–1400 м при нормальном жизненном развитии кораллов до 50–60 м.

Причиной таких процессов является термоизоляция (или термоусадка) планетарного (океаны, окраинные и внутренние моря), регионального (впадины внутри морей и океанов) и локального масштабов, связанная с остыванием литосферы и астеносферы после весьма заметного в геологической истории Земли позднемезозойского теплового события с выходом мощной волны тепла к поверхности. Дно океанов, внутренних и окраинных морей в позднем мезозое было наиболее существенным проводником внутреннего тепла Земли во внешнее пространство [11]. Именно в зоне перехода от Азиатского и Австралийского материков образовались и продолжают формироваться упомянутые впадины окраинных морей [18] и Восточно-Азиатский грабенный пояс [1].

Роль сил Кориолиса в формировании сейсмичности на востоке и западе Тихоокеанского бассейна. Опускание дна Тихого океана и воздымание материков приводят к возникновению тангенциальных ротационных сил, направленных на восток при опускании участков океана и направленных на запад при поднятии суши. Небольшие по величине, но имеющие планетарный характер и действующие в одном направлении в течение десятков миллионов

лет, эти силы оказывают существенное влияние на многие тектонические процессы. В частности, многочисленные геологические и геофизические признаки асимметрии Тихого океана могут объясняться преобладанием в течение длительного времени сил сжатия на востоке и сил растяжения на западе Тихого океана [17] (рис. 4).

Авторами произведен расчет энергий, обусловленных силами Кориолиса, при поднятии или опускании блоков Земли, и сравнительный анализ полученных значений с энергией землетрясений [10]. Величина энергии, создаваемой ротационными силами, определялась по формуле (4):

$$\begin{aligned} \Delta E = & 0.1\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1) \times \\ & \times \left((\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) - \frac{1}{3}(\sin^3 \varphi_2 - \sin^3 \varphi_1) \right) \times \\ & \times (p_2((R \pm h)^5 - (R - H \pm h)^5) - \\ & - \rho_1(R^5 - (R - H)^5)) \\ \rho_2 = & \rho_1 \frac{[R^3 - (R - H)^3]}{[(R \pm h)^3 - (R - H \pm h)^3]}, \end{aligned} \quad (5)$$

где: $\omega = 7.3 \times 10^5$ рад/с – угловая скорость вращения Земли; $\lambda_1, \lambda_2, \varphi_1, \varphi_2$ – географические широта и долгота выбранного блока.; H – толщина блока, равная 700 км, т.е. определяется максимальной глубиной очагов землетрясений; h – величина поднятия или опускания блока; ρ_1 – плотность блока при отсутствии вертикальных перемещений $\rho_1 = 3.7$ г/см³; ρ_2 – плотность блока поднявшегося или опустившегося относительно уровня моря на величину h .

Энергия землетрясений определялась по формуле $\lg E = K = 4.6 + 1.65M$, где K – энергетический класс землетрясений, M – магнитуда землетрясений [12]. При определении энергии учитывались землетрясения с магнитудами от 7.5 до 8.7, произошедшие на суше и в море с 1897 по 1956 гг. При этом рассматривались как поверхностные землетрясения с глубиной очага 0–70 км, так и глубокофокусные с очагами 70–300 км.

Значения энергии ротационных сил рассчитывались в три этапа:

1. Вся земная поверхность была разбита на блоки. При этом величина $(\varphi_2 - \varphi_1)$ для всех блоков была одинаковой, и равной 5°, долготы λ_1 и λ_2 выбирались таким образом, чтобы учесть особенности рельефа, т.е. высота или глубина поверхности выбранного участка относительно уровня моря

была приблизительно одинаковой. Для всех выбранных блоков определялись значения энергии по формуле (5). Амплитуда поднятия ($h > 0$) и опускания ($h < 0$) равнялась фактической высоте (глубине) поверхности блока относительно уровня моря. Далее для каждой 5° широты суммировались полученные значения энергий всех поднявшихся (опустившихся) блоков;

2. На втором этапе определялась ротационная энергия только для океанического дна с глубиной более 1500 км. При этом амплитуда опускания для всех блоков считалась одинаковой и равной средней глубине гайотов, т. е. 1500 м. Далее для каждой 5° широты суммировались полученные значения энергий всех опустившихся блоков;

3. На третьем этапе определялась суммарная энергия, выделяющаяся в результате поднятия (опускания) всех блоков Южного и Северного полушарий.

Результаты расчетов энергии землетрясений и ротационных сил представлены в таблице.

Как следует из таблицы суммарная энергия ротационных сил и для Северного и для Южного полушария составляет величину порядка $E \sim 10^{25}$ Дж. Суммарная энергия землетрясений оценивается величиной порядка $E \sim 10^{20}$ Дж. Опускание вершин гайотов и атоллов, вероятно, происходило непрерывно в течение 10 млн. лет, начиная примерно с мела [17]. Тогда годовой расход энергии ротационных сил составит величину порядка $\frac{E}{t} \sim 10^{18}$ Дж/г.

Более вероятно предположение о скачкообразном характере погружения дна океанов. Тогда в моменты максимальной скорости погружения энергии будет выделяться больше, в периоды более медленного погружения – меньше. Годовой расход энергии землетрясений также составляет энергию порядка $\frac{E}{t} \sim 10^{18}$ Дж/г.

Таким образом приблизительные оценки показали, что годовые энергии “ротационного” происхождения и землетрясений имеют одинаковый порядок величин (10^{18} Дж/г). Следовательно, силы Кориолиса, возникающие при увеличении степени гипсометрической контрастности океанических впадин и обрамляющих материков, являются одним из факторов, влияющих на накопление напряжений в зоне Тихоокеанского сейсмического кольца, и, следовательно, на возникновение очагов землетрясений.

Статья написана при поддержке РФФИ № 02-05-64010.

Энергия, обусловленная ротационными силами при поднятии (опускании) участков земного шара, и выделяющаяся при поверхностных и глубинных землетрясениях

φ_1°	φ_2°	Энергия (10^{24} Дж), обусловленная силами Кориолиса при опускании океанического дна		Энергия (10^{24} Дж), обусловленная силами Кориолиса при поднятии суши с амплитудой, равной высоте участков	Энергия (10^{19} Дж) поверхностных землетрясений 1897–1956 гг. [12]	Энергия (10^{19} Дж) поверхностных и глубокофокусных землетрясений 1897–1956 гг. [12]
		С амплитудой, равной глубине участков	С амплитудой $h = -1500$ м			
Северное полушарие						
0	5	4.76	1.86	2.01	1.36	2.17
5	10	4.26	1.73	2.73	2.96	3
10	15	4.43	1.67	1.91	2.02	2.17
15	20	4.02	1.46	1.81	1.96	2.08
20	25	3.31	1.09	2.81	0.51	2.31
25	30	3.01	1.03	4.32	2.44	3.49
30	35	2.44	0.74	6.25	2.45	2.98
35	40	1.86	0.56	5.51	3.12	3.64
40	45	1.3	0.47	2.83	2.75	2.87
45	50	0.76	0.26	1.96	1.55	1.76
50	55	0.41	0.18	1.25	1.88	2.08
55	60	0.17	0.08	0.65	1.14	1.27
Суммарная энергия		30.73	11.13	34.04	24.14	29.82
Южное полушарие						
0	5	4.52	1.6	1.98	2.26	2.56
5	10	4.71	1.61	2.43	1.12	1.36
10	15	4.70	1.70	2.85	2.42	2.70
15	20	4	1.51	5.85	0.72	2.03
20	25	3.74	1.45	2.56	0.42	1.11
25	30	3.19	1.21	4.49	1.18	1.39
30	35	3.16	1.21	0.75	1.29	1.29
35	40	3.21	1.12	0.06	0.24	0.24
40	45	2.52	0.9	0.13	0.03	0.03
45	50	1.94	0.73	0.09	0.24	0.24
50	55	1.36	0.53	0.02	0.22	0.22
55	60	1.1	0.39	0	0.16	0.16
Суммарная энергия		38.15	13.96	21.21	10.3	13.33

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варнавский В.Г., Мальшев Ю.Ф. Восточно-Азиатский грабеновый пояс // Тихоокеанская геология. 1986. № 3. С. 3–13.
2. Ващилов Ю.Я. Сейсмичность и вопросы глубинного строения Северо-Востока СССР // Геофизические исследования структуры и геодинамики земной коры и верхней мантии Северо-Востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1979. С. 138–157.
3. Ващилов Ю.Я., Калинина Л.Ю. Геолого-геофизические условия возникновения землетрясений на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1996. 90 с.
4. Ващилов Ю.Я., Калинина Л.Ю. Об оценках энергетических эффектов, связанных с силами Кориолиса вращающейся Земли // Глубинная тектоника и вопросы сейсмогеологии, металлогении, нефтегазоносности Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1999. С. 217–224.

5. Ваццлов Ю.Я., Калинина Л.Ю. Глубинные разломы и линейменты и размещение эпицентров землетрясений на суше северо-востока России // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 19–31.
6. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др. Сейсмоструктура полуострова Камчатка // Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2005. № 1. С. 24–32.
7. Губин И.Е. Закономерность в дифференциации сейсмогенных зон, обусловленных разрывами земной коры // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 1. С. 166–169.
8. Богачкин Б.М., Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А. и др. Результаты совместного анализа наземной и аэрокосмической информации при изучении эпицентральных зон сильных землетрясений // Геоморфология. 1993. № 4. С. 48–60.
9. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б. М. Активные разломы и сейсмоструктура Северо-Восточной Якутии. Якутск. 1990. С. 131.
10. Калинина Л.Ю. Сравнительный анализ энергии сил Кориолиса вращающейся Земли с энергией землетрясений // Астеносфера и литосфера Северо-Востока России (структура, геокинематика, эволюция). Магадан. 2003. С. 143–148.
11. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
12. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: ИЛ, 1963. 670 с.
13. Смирнов В.Н. Морфотектоника областей горообразования Северо-Востока Азии. Автореф. докт. дисс. М.: МГУ, 1995. 41 с.
14. Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 24–44.
15. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // М.: Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. 1965. № 36 (203). С. 66–93.
16. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
17. Шило Н.А., Ваццлов Ю.Я. Формирование коренных различий глубинной структуры на западе и востоке Тихого океана // Геофизические исследования структуры и геодинамики земной коры и верхней мантии Северо-Востока СССР. Магадан: Магадан. кн. изд-во, 1979. С. 92–112.
18. Штиле Г. Избранные труды. М.: Мир, 1964. 888 с.
19. Shilo N.A., Vashchilov Yu.Ya. Formation of principal differences in the deep structure of the western and eastern Pacific // *Pacific Geol.* 1982. № 16. P. 39–52.

The Structural Setting of Earthquakes Relative to Elements of Deep-Seated Fault Tectonics and Their Interpretation for the Magadan Shelf of the Sea of Okhotsk

Yu.Ya Vashchilov¹, L. Yu. Kalinina²

¹*Northeast Institute of Multidisciplinary Research, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Magadan, 685000, Russia*

²*Northeast State University, Magadan, 685000, Russia*

This paper presents results from a quantitative analysis of the relationship between earthquakes and tectonic fragmentation of the crust based on the correlation analysis of density and discordance measure of the faults with parameters of seismic activity (specific rate and specific energy of earthquakes) for the Magadan shelf of the Sea of Okhotsk. These materials revealed essential differences in the structural setting of earthquake epicenters on land and in sea. The Magadan shelf of the Sea of Okhotsk is most likely to generate earthquakes of energy class $K \leq 12$ in areas with lower density ($0.04 < \tau \leq 0.06 \text{ km}^{-1}$) and lower discordance measure of faults ($2 < \|D\| \leq 4$) identified from gravity data. One cause of this structural geodynamic peculiarity in the spatial positions of earthquake epicenters is, in these authors' opinion, thermal isostasy, which is the cooling of the lithosphere and the asthenosphere as heat is released into the circumterrestrial space (the heat was coming toward the upper horizons of the Earth from the mantle during the Mesozoic/Cenozoic phase of the Earth's evolution) with the resulting seafloor subsidence. Seafloor subsidence and continental uplift produce rotational tangential forces which affect the stress buildup in the Pacific seismic belt. The annual consumption of the energy of rotational forces and of earthquakes have the same order of magnitude, 10^{18} J/yr .