

УДК 550.34.013.4

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ТРИГГЕРНОГО ЭФФЕКТА ПРИЛИВНЫХ СИЛ НА НАИБОЛЕЕ КРУПНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Чубаров Даниил Леонидович,

студент Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: convert008@mail.ru

Кочнев Владимир Алексеевич,

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела
вычислительной механики деформируемых сред Института
вычислительного моделирования СО РАН, Россия, 660036, г. Красноярск,
ул. Академгородок, 50, стр. 44. E-mail: kochnev@icm.krasn.ru

Большая часть твердых полезных ископаемых в мире (за исключением тех, что находятся на поверхности земли) добывается открытым и закрытым способом посредством штолен, шахт и других горных выработок. Немалая часть месторождений полезных ископаемых (в том числе и нефтяных) располагаются либо вблизи, либо непосредственно внутри зон повышенной сейсмологической активности (сюда можно отнести все месторождения Чили, Японии, Индонезии, некоторые месторождения США, России и других стран). Таким образом, если вблизи данных месторождений произойдет крупное землетрясение, то, вероятнее всего, это приведет, с одной стороны, к приостановке (или консервации) деятельности месторождения, с другой – к значительному числу жертв и экономическому ущербу. Чтобы избежать или хотя бы минимизировать данный ущерб, необходимо проводить полноценный сейсмологический мониторинг данных территорий, а также изучать все возможные причины возникновения землетрясений. Данная работа направлена на изучение природы землетрясений, что, несомненно, говорит об актуальности исследования.

Цель данного исследования: установить совместное триггерное воздействие гравитационных сил Луны и Солнца на сейсмологическую активность зон Земли.

Методы исследования. В данной работе за основу взята известная физико-математическая модель (приливная модель Дж. Дарвина), а также принято во внимание изменение относительного положения Луны и Солнца.

Результаты. При изучении триггерного воздействия приливных сил на сейсмологическую активность рассмотрены 6 наиболее крупных землетрясений, произошедших вблизи экваториальной широты за последние 15 лет. Построены изображения горизонтальных, вертикальных компонент и модулей вектора гравитационных сил на единичную массу в зависимости от взаимного положения Луны и Солнца в течение суток относительно исследуемого объекта с единичной массой. Проанализировано воздействие приливных сил на точки эпицентров 6 крупнейших землетрясений, произошедших вблизи экваториальной широты. Разрабатываемая технология может быть полезна в комплексе методов при изучении механизмов интегрирования и разрядки напряжений на границах блоковых структур.

Ключевые слова:

Земные приливы, приливные силы, Луна, Солнце, триггерный эффект, сейсмологическая активность, землетрясения.

1. Введение. Обзор и анализ проблемы

11 марта 2011 г. у восточного побережья острова Хонсю в Японии произошло землетрясение, ставшее причиной крупной радиационной аварии 7-го уровня по Международной шкале ядерных событий. Данное событие имело огромный резонанс во многих экологических организациях, так как нанесло огромный ущерб экологии и здоровью людей.

Стоит отметить, что в сейсмически активных зонах также располагаются и месторождения полезных ископаемых, разработка которых связана с компонентами, способными нанести вред как экологии, так и здоровью людей. Например, если вблизи Сахалинских нефтяных платформ произойдет землетрясение, которое спровоцирует цунами, не исключено их повреждение и, как следствие, – экологическая катастрофа, аналогичная разливу нефти в Мексиканском заливе в 2010 г. В связи с этим актуальным становится вопрос об изучении всех возможных механизмов возникновения землетрясений.

Одним из таких механизмов может быть воздействие приливных сил со стороны Солнца и Луны. Некоторые авторы отводят приливным силам роль в генерации магнитного поля Земли [1], аномалий электромагнитного излучения [2], не является секретом и наличие приливного горба на нашей планете.

Цель данной работы – установить наличие триггерного эффекта приливных сил в процессе подготовки наиболее крупных землетрясений.

Исследования связи приливных явлений с сейсмологической активностью берут свое начало в конце XIX века. Самые ранние статьи из тех, что удалось найти, были написаны Артуром Шустером (Arthur Shuster) [3] и Каргиллем Гильстоном Кноттом (Cargill Gilston Knott) [3] в 1897 и 1896 годах соответственно.

В своей статье [3] К.Г. Кнотт рассматривает взаимосвязь землетрясений, произошедших на территории Японии с 1885 по 1892 г., и оценивает связь частоты землетрясений с фазами Луны. В за-

ключении автор говорит о наличии доказательств связи между частотой землетрясений в изученном регионе и периодичностью, связанной с лунными сутками.

Роль триггера приливным силам в своей статье «Tidal triggering of earthquakes» [4] отвел Томас Хитон (Thomas H. Heaton). Анализируя результаты исследования, Хитон приходит к выводу, что в качестве триггера приливные силы если и могут действовать, то только для неглубоких (< 30 км) и слабых землетрясений.

В работе, выполненной группой британских ученых во главе с Р. Крокеттом (R.G.M. Crockett), проводилось исследование взаимосвязи приливных явлений с землетрясением 26 декабря 2004 года, произошедшего у берегов Суматры [5]. В заключении авторы утверждают, что корреляция между частотой землетрясений в данном регионе и фазами Луны (в период с 28 октября по 26 декабря 2004 г.) количественно оценена и довольно высока. Помимо вышеперечисленных авторов, изучением приливных сил и их способностью влиять на землетрясения, занималось большое количество исследователей из разных стран [6–12].

Из отечественных исследователей значительный вклад в развитие исследуемой тематики внес Юрий Николаевич Авсюк [13–16]. Вопросами взаимосвязи земных приливов и землетрясений занимался известный новосибирский ученый Гольдин Сергей Васильевич. В статье «Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири» [17] автор приводит результаты приливного анализа банков землетрясений азиатской части России по Байкальскому и Алтае-Саянскому регионам на примере Бусингольского землетрясения (27.12.1991).

2. Общие сведения о приливных силах.

Физико-математическая модель исследования

Рис. 1 схематически иллюстрирует происхождение и свойства приливообразующих сил, вызванных Солнцем. Из данного рисунка следует, что величина приливообразующих сил равна $ma_0\beta$, где $\beta=r/R$ – угол между направлениями на тело и на центр Земли из центра Солнца. Подставляя сюда $a_0=GM_{sun}/R^2$ для приливной силы в точке А, получаем:

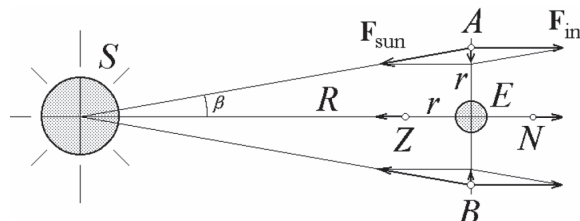


Рис. 1. Происхождение приливных сил вблизи Земли в неоднородном поле солнечного (лунного) тяготения [18]

Fig. 1. Sun-induced tide-generating forces in different points A, B, Z, and N [18]

$$F_A = G \frac{mM_{sun}}{R^2} \frac{r}{R}.$$

Если тело находится в точке Z (для которой Солнце оказывается в зените), расстояние от тела до центра Солнца меньше, чем от центра Земли. Здесь сила тяготения Солнца в точности противоположна силе инерции, но имеет несколько большую величину. Поэтому приливная сила F_z в точке Z направлена вертикально вверх, от Земли к Солнцу. Ее величина дается соответствующей разностью:

$$F_z = G \frac{mM_{sun}}{(R-r)^2} - ma_0 = G \frac{mM_{sun}}{R^2} \frac{2r}{R}. \quad (1)$$

Точно такие же формулы применимы и для влияния Луны.

Однако во всех рассмотренных выше четырех точках приливные силы имеют вертикальные направления. Оказывается, что в промежуточных точках приливные силы имеют горизонтальные составляющие (рис. 2). Горизонтальные и вертикальные составляющие вектора приливной силы рассчитываются с учетом угла θ .

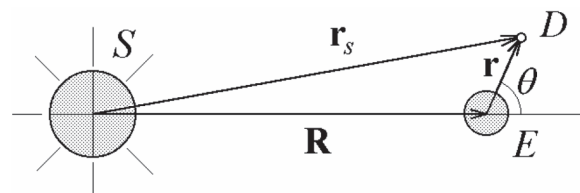


Рис. 2. Переменные r и θ , используемые для указания положения произвольной точки вблизи Земли [18]

Fig. 2. Variables r and θ , used for indicating location of an arbitrary point near the Earth surface [18]

Как видно из формулы (1), максимальные значения для горизонтальной составляющей будут наблюдаться при $\theta=45^\circ$ и 135° , а при $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ будут равны нулю. Соответствующие экстремумы вертикальной компоненты смещены на 45° .

Если же говорить о различии этих составляющих в зависимости от широты, то в таком случае нужно ввести величину r' , которая характеризует расстояние от исследуемой точки до оси вращения Земли: $r'=r \cdot \cos \alpha$, где α – широтный угол. В таком случае очевидно, что максимальное значение приливной силы будет на экваторе, минимальное – на полюсах.

Далее необходимо принять во внимание, что взаимное положение Луны и Солнца – величина переменная, поэтому для разных положений на одну и ту же точку будет оказываться разное суммарное воздействие. Данную проблему можно решить, перебрав все возможные взаимные расположения Луны и Солнца (при шаге в 1 градус таких положений насчитывается 129600). Суммарная величина горизонтальной компоненты приливной силы находится сложением аналогичных компонент для Солнца и Луны при соответствующих их положениях.

Для примера рассмотрим случай, приведенный на рис. 3. Для экваториальной широты величина горизонтальной составляющей приливной силы, действующей со стороны Солнца и Луны на точку, будет находиться по формуле (2). В первом случае (со стороны Солнца) будет задействован угол θ_1 , во втором (со стороны Луны) – θ_2 . Общее значение горизонтальной компоненты будет находиться путем сложения этих двух величин. Точно так же по формуле (3) будет рассчитываться вертикальная компонента.

$$F_{hor} = -3G \frac{mM_{sun}}{R^3} r \cos \theta \sin \theta = -\frac{3}{2} G \frac{mM_{sun}}{R^3} r \sin \theta, \quad (2)$$

$$F_{vert} = G \frac{mM_{sun}}{R^3} r (3 \cos^2 \theta - 1) = \frac{3}{2} G \frac{mM_{sun}}{R^3} r (\cos 2\theta + \frac{1}{3}). \quad (3)$$

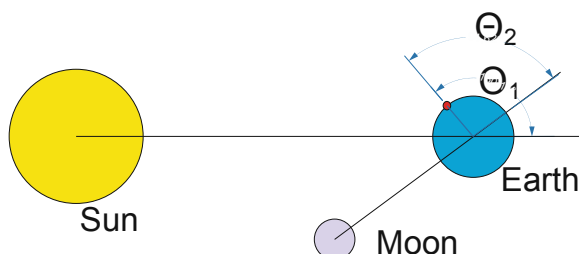


Рис. 3. Пример взаимного расположения Солнца и Луны

Fig. 3. Example of the Moon and the Sun relative position

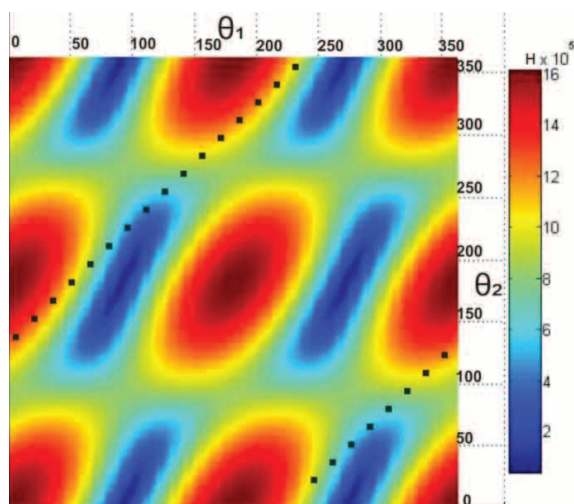


Рис. 4. Значение модуля суммарного вектора приливной силы Солнца и Луны: горизонтальная ось – значение угла θ_1 , вертикальная ось – значение угла θ_2 . ■ – суточные вариации (шаг – 1 час)

Fig. 4. Value of a module of the Moon and the Sun tidal force summarized vector. Axis: x – value of θ_1 , y – value of θ_2 ; ■ – daily variations (a step is an hour)

Рассмотрим модель действия приливных сил Луны и Солнца на тело, представляющее собой куб

с ребром 1 км, состоящий из воды плотностью 1 г/см³ (масса такого объекта будет равна 10¹² кг).

Модуль суммарного вектора приливной силы рассчитывался по формуле $F = \sqrt{F_{hor}^2 + F_{vert}^2}$. Значения этой величины представлены на рис. 4.

3. Связь приливных сил с землетрясениями

Далее проанализируем влияние приливных сил на наиболее крупные землетрясения, произошедшие вблизи экваториальной широты. Данные о выбранных землетрясениях приведены в таблице.

Таблица. Землетрясения, выбранные для изучения триггерного воздействия приливных сил

Table. Earthquakes, chosen for trigger action of tidal forces exploration

N	Место Location	Ms	Дата Date	Время Time (UTC)			Широта Latitude	Долгота Longitude
				ч h	м m	с s		
1	Индонезия (Indonesia)	8,8	26.12.2004	0	58	48	3,39	95,84
		7,3	26.12.2004	4	21	26	6,8	92,86
		6,1	26.12.2004	19	19	55	3,08	93,49
2	Суматра (Sumatra)	8,5	11.04.2012	8	38	34	2,35	92,92
		8,2	12.04.2012	10	43	7	0,85	92,5
3	Суматра (Sumatra)	8,5	28.03.2005	16	9	34	2,03	97,01
		5,5	28.03.2005	23	12	58	2,92	96,47
4	Суматра (Sumatra)	8,3	12.09.2007	11	10	23	-4,4	101,48
		8,1	12.09.2007	23	49	1	-2,54	100,85
		7,3	13.09.2007	3	35	28	-2,08	99,67
5	Папуа-Новая Гвинея (Papua-New Guinea)	7,7	16.11.2000	7	42	14	-5,54	153,42
		7,5	16.11.2000	4	54	56	-4,41	152,05
		6	16.11.2000	11	5	39	-5,33	153,09
6	Перу (Peru)	7,9	15.08.2007	23	40	56	-13,31	283,4
		5,6	16.08.2007	11	35	30	-14,34	283,06

Методика определения влияния приливных сил на эпицентр землетрясения в момент толчка состоит в следующем. По известной широте и известной угловой скорости вращения Земли определялась временная поправка для точки эпицентра землетрясения (точная до секунд разность времени по сравнению с Гринвичским). По этой поправке рассчитывалось точное местное время в момент землетрясения, и по этому времени по формуле (4) определялся угол θ_1 , характеризующий положение Солнца относительно данной точки в момент толчка:

$$\theta_1 = t \cdot v_s, \quad (4)$$

где t – местное время землетрясения; v_s – угловая скорость вращения Земли (15 град/час).

По известному времени землетрясения определялся угол элонгации между Солнцем и Луной (рис. 5). Формула связи угла α и угла элонгации α' приведена в работе бельгийского ученого Поля Дж. Мелькиора [18] и выглядит следующим образом:

$$\cos \alpha' = \cos \alpha - \frac{a}{r} \sin^2 \alpha. \quad (5)$$



Рис. 5. Угол элонгации α между Луной и Солнцем

Fig. 5. Elongation angle α between the Moon and the Sun

В конце по данному углу рассчитывался угол θ_2 , характеризующий положение Луны относительно точки эпицентра в момент толчка. Далее, зная углы θ_1 и θ_2 , можем рассчитать значение горизонтальной (и вертикальной) компоненты приливной силы, а также значение модуля суммарного вектора.

Для того что бы понять степень влияния приливных сил на то или иное землетрясение, необходимо проследить изменение значений суммарного модуля приливных сил за некоторое время до самого события. Здесь необходимо учитывать, что в каждый момент времени для точки эпицентра изменялись не только углы θ_1 и θ_2 , но и расстояния до Солнца и Луны, а также наклон земного шара относительно этих двух объектов. Иллюстрации изменения приливных сил в эпицентрах землетрясений приведены на рис. 6–8.

4. Заключение

Исследования, проводимые как российскими (Ребецкий Ю.Л., 2007), так и зарубежными (Melti- ever L. и др., 2009) исследователями, показывают, что в целом роль приливных сил при подготовке землетрясений численно не велика. Тем не менее, полностью отрицать участие приливных сил в фор-

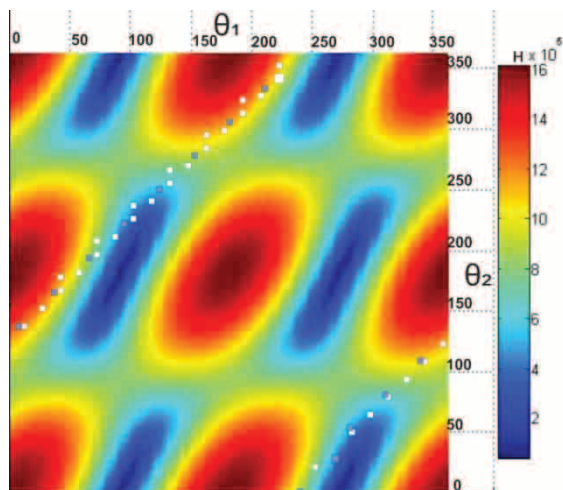


Рис. 6. Влияние приливных сил на точки эпицентров землетрясений на Суматре и в Папуа-Новой Гвинее в течение суток до толчка

Fig. 6. Influence of variation of tidal forces summarized vector on earthquake epicenter points in Sumatra and Papua-New Guinea during the day before the shock

	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения на Суматре 11.04.2012 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 1 час
	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения в Папуа-Новой Гвинее 16.11.2000 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 2 часа

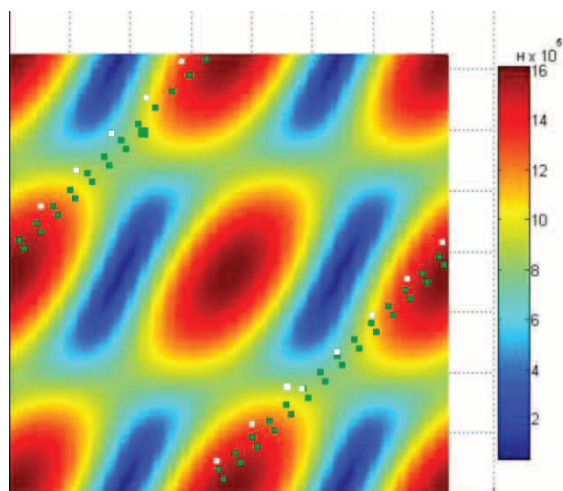


Рис. 7. Влияние приливных сил на точки эпицентров землетрясений в Японии и Индонезии в течение суток до толчка

Fig. 7. Influence of variation of tidal forces summarized vector on earthquake epicenter points in Indonesia and Japan during the day before the shock

	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения в Японии 11.03.2011 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 2 часа
	Воздействие приливных сил на эпицентр землетрясения в Индонезии 26.12.2004 г. в течение суток до момента толчка (сам толчок отмечен увеличенным квадратом), шаг – 1 час

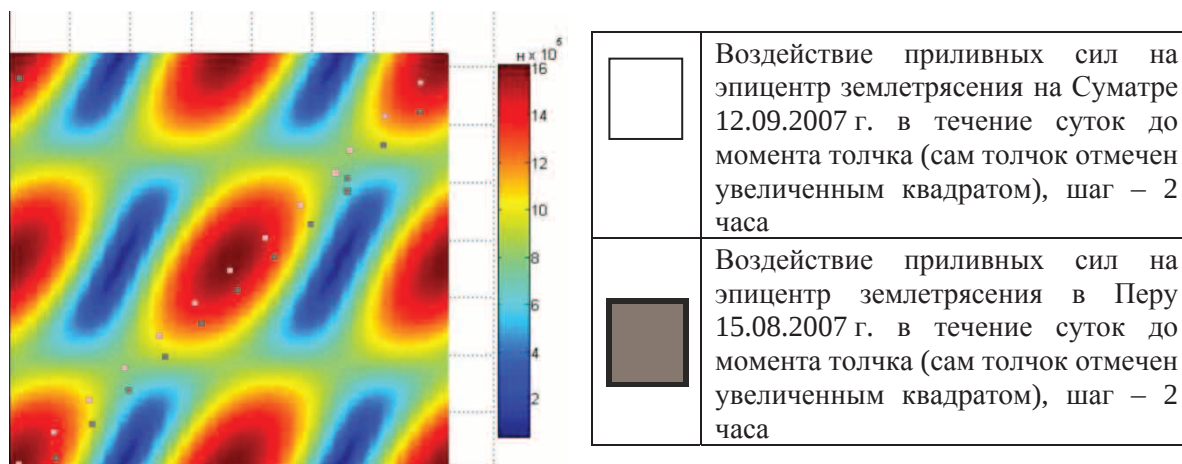


Рис. 8. Влияние приливных сил на точки эпицентров землетрясений на Суматре и в Перу в течение суток до толчка

Fig. 8. Influence of variation of tidal forces summarized vector on earthquake epicenter points in Sumatra and Peru during the day before the shock

мировании поля напряжений в земной коре не берется ни один исследователь, и для регионов, где сейсмологическая активность наиболее высока (Япония, Индонезия и т. д.), изучение любых возможных механизмов, приводящих к землетрясениям, является весьма актуальной проблемой.

Данное исследование может быть полезно в комплексе методов при изучении механизмов интегрирования и разрядки напряжений на границах блоковых структур, а также для более точного понимания и численного описания процесса подготовки землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочнев В.А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 3–15.
2. Степанов М.В. Изучение краткосрочных предвестников землетрясений методом электромагнитной эмиссии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2004. – 190 с.
3. Schuster A. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes // Proc. R. Soc. Lond. – 1897. – № 61. – P. 455–465.
4. Knott C.G. On Lunar Periodicities in Earthquake Frequency // Proc. R. Soc. Lond. – 1896. – № 60. – P. 457–466.
5. Heaton T.H. Tidal triggering of earthquakes // Geophys. J. R. astr. Soc. – 1975. – № 43. – P. 307–326.
6. Tidal synchronicity of the 26 December 2004 Sumatran earthquake and its aftershocks / R.G.M. Crockett, G.K. Gillmore, P.S. Phillips, D.D. Gilbertson // Geophys. Res. Lett. – 2006. – № 33. L19302. DOI: 10.1029/2006GL027074.
7. Emter D. Tidal triggering of earthquakes and volcanic events // Tidal Phenomena / Ed. by H. Wilhelm, W. Zurn, H.G. Wenzel. – New York: Springer, 1997. – P. 293–310.
8. Knopoff L. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes // Bull. seism. Soc. Am. – 1964. – № 54. – P. 1865–1870.
9. Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan / C.H. Lin, Y.H. Yeh, Y.I. Chen, J.Y. Liu, K.J. Chen // TAO. – 2003. – V. 14. – № 3. – P. 1–10.
10. Palumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy // Geophys. J. R. Astr. Soc. – 1986. – № 84. – P. 93–99.
11. Rydelek P.A., Davies P.M., Koyanagi R.Y. Tidal triggering of earthquake swarms at Kilauea Volcano, Hawaii // J. Geophys. Res. – 1988. – № 95. – P. 4401–4411.
12. Shirley J.H. Lunar and solar periodicities of large earthquake: Southern California and Alaska-Aleutian islands seismic region // Geophys. J. – 1988. – № 92. – P. 403–420.
13. Wilcock W.S.D. Tidal triggering of micro earthquakes on the Juan de Fuca Ridge // Geophys. Res. Lett. – 2001. – № 28 (20). – P. 3999–4002.
14. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – 188 с.
15. Авсюк Ю.Н. Связь приливной эволюции системы Земля–Луна с проблемами геодинамики // Вестник Российской академии наук. – 1996. – Т. 66. – № 2. – С. 129–134.
16. Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля–Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. – 1993. – № 1. – С. 13–22.
17. Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири / С.В. Гольдин, В.Ю. Тимофеев, М. ван Раумбеке, Д.Г. Ардюков, М.Е. Лаврентьев, Р.Г. Седусов // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 4. – С. 81–93.
18. Butikov E. A Dynamical Picture of the Oceanic Tides // American Journal of Physics. – 2002. – V. 70. – № 10. – P. 1001–1011.
19. Melchior P. Earth tides // Geophysical Surveys. – 1974. – № 1. – P. 275–303.
20. Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений, обусловленный гравитационными силами, пластическим течением и вертикальными перемещениями // Девятые геофизические чтения Федынского: тез. докладов. – М.: Изд-во «Геос», 2007. – С. 80–81.
21. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides / L. Meltievers, O. de Viron, C.P. Conrad, S. Renault, M. Diamant, G. Patau // Earth Planet. Sci. Lett. – 200. – № 278. – P. 370–375. DOI:10.1016/j.epsl.2008.12.024.

Поступила 25.01.2016 г.

CALCULATION AND ANALYSIS OF TIDAL FORCES TRIGGER EFFECT ON THE GREATEST EARTHQUAKES

Daniil L. Chubarov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: convert008@mail.ru

Vladimir A. Kochnev,

Institute of Calculation Modeling SB RAS, 50/44, Akademgorodok Street,
Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: kochnev@icm.krasn.ru

The majority of solid minerals in the world (excluding those, which are on the Earth's surface) are mined by the open- and close-cut techniques using adits, mines and other minings. A large part of deposits of minerals (including the oil ones) occur either close or just inside the areas of higher seismological activity (all deposits in Chilly, Japan, Indonesia, some deposits in the USA, Russia and other countries can be referred to this type). Thus, if a major earthquake occurs near such deposit it will probably result in suspension (conservation) of the deposit activity, on the one hand, and on the other hand in significant amount of victims and economic damage. In order to avoid or at least to minimize the damage it is necessary to monitor the seismological situation in these territories and to study all possible causes of earthquake occurrence. The paper is devoted to the study of the earthquake nature. This is the relevance of the research.

The aim of the study is to establish the combined effect of the gravitational forces of the Moon and Sun on the Earth's seismological activity zones.

Methods. Physical and mathematical model (G. Darwin tidal model) is taken as a basis, and the combined effect of the Moon and Sun and their relative positions are taken into account.

Results. The authors have studied six largest earthquakes with epicenters located near the equator during the last 15 years and prepared a map of horizontal and vertical components and the magnitudes of gravitational force, depending on the relative position of the moon and the sun. The influence of tidal forces on epicenters of six greatest earthquakes, located near the equator, was analyzed. The developed technique can be useful for studying the mechanisms of stress at the boundaries of block structures.

Key words:

Earth tides, tidal forces, Moon, Sun, trigger effect, seismological activity, earthquakes.

REFERENCES

- Kochnev V.A. Kinematiko-gravitatsionnaya model gedynamo [Geodynamo kinematics and gravitational model]. *Geophysical journal*, 2013, vol. 35, no. 4, pp. 3–15.
- Stepanov M.V. *Izycheniye kratkosrochnykh predvestnikov zemletryaseniya metodom elektromagnitnoy emissii*. Dis. Dokt. nauk [Research of short earthquakes precursors by the electromagnetic emission method. Dr. Diss]. Moscow, 2004. 190 p.
- Schuster A. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes. *Proc. R. Soc. Lond.* 1897, no. 61, pp. 455–465.
- Knott C.G. On Lunar Periodicities in Earthquake Frequency. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1896, no. 60, pp. 457–466.
- Heaton T.H. Tidal triggering of earthquakes. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1975, no. 43, pp. 307–326.
- Crockett R.G.M., Gillmore G.K., Phillips P.S., Gilbertson D.D. Tidal synchronicity of the 26 December 2004 Sumatran earthquake and its aftershocks. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, no. 33, L19302. DOI: 10.1029/2006GL027074.
- Emter D. Tidal triggering of earthquakes and volcanic events. *Tidal Phenomena*. Eds. H. Wilhelm, W. Zurn, H.G. Wenzel. New York, Springer, 1997. pp. 293–310.
- Knopoff L. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes. *Bull. seism. SOC. Am.*, 1964, no. 54, pp. 1865–1870.
- Lin C.H., Yeh Y.H., Chen Y.I., Liu J.Y., Chen K.J. Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan. *TAO*, 2003, September, 14, no. 3, pp. 1–10.
- Palumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1986, no. 84, pp. 93–99.
- Rydelek P.A., Davies P.M., Koyanagi R.Y. Tidal triggering of earthquake swarms at Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 1988, no. 95, pp. 4401–4411.
- Shirley J.H. Lunar and solar periodicities of large earthquake: Southern California and Alaska-Aleutian islands seismic region. *Geophys. J.*, 1988, no. 92, pp. 403–420.
- Wilcock W.S.D. Tidal triggering of micro earthquakes on the Juan de Fuca Ridge. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, no. 28 (20), pp. 3999–4002.
- Avsyuk Yu.N. *Prilivnye sily i prirodnye protsessy* [Tidal forces and natural processes]. Moscow, OIPE RAS Press, 1996. 188 p.
- Avsyuk Yu.N. Svyaz prilivnoy evolyutsii sistemy Zemlya–Luna s problemami geodinamiki [Relation between tidal evolution of the Earth–Moon system and problems of geodynamic]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 1996, 66, no. 2, pp.129–134.
- Avsyuk Yu.N. Evolyutsia sistemy Zemlya–Luna i ee mesto sredi problem nelineynoy geodinamiki [Evolution of the Earth–Moon system and its place in problems of nonlinear geodynamic]. *Geotectonics*, 1993, no. 1, pp. 13–22.
- Goldin S.V., Timofeev V.Yu., van Ruymbeke M. Prilivnaya modulatsiya slaboy seysmichnosti dlya yuzhnoy chaste Sibiri [Tidal modulation of low seismicity in Southern Siberia]. *Physical Mesomechanics*, 2008, vol. 11, no. 4, pp. 81–93.
- Butikov E. A Dynamical Picture of the Oceanic Tides. *American Journal of Physics*, 2002, October, vol. 70, no. 10, pp. 1001–1011.
- Melchior P. Earth tides. *Geophysical Surveys*, 1974, no. 1, pp. 275–303.
- Rebetsky Yu.L. Mekhanizm generatsii tektonicheskikh napryazheniy obuslovlennyy gravitatsionnymi silami, plasticheskimi techeniyami i vertikalnymi peremeshcheniyami [Mechanism of tectonic stress generation by gravitational forces, plastic flow and vertical movement]. *Devyatye geofizicheskie chteniya Fedynskogo* [Fedynsky Ninth geophysical conference. Abstracts]. Moscow, 1–3 of March 2007. Moscow, Gers Publ., 2007. pp. 80–81.
- Meltieiev L., de Viron O., Conrad C.P., Renault S., Diamant M., Patau G. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, no. 278, pp. 370–375. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.12.024.

Received: 25 January 2016.