

УДК 550.34.013.4



К.А. Статников



Г.М. Крученицкий

Статников К.А.*,
Крученицкий Г.М.**

Статистическое моделирование глобальной тектонической активности и возможности физической интерпретации его результатов

*Статников Константин Андреевич, студент Московского физико-технического института (государственного университета), инженер в филиале Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс»» (АО «РКЦ «Прогресс») – Научно-производственном предприятии «Опτικο-электронные комплексы и системы» (НПП «ОПТЭКС»)

E-mail: kos1301@mail.ru

**Крученицкий Григорий Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий отделом озонного мониторинга в ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория»

E-mail: omd@cao-rhms.ru

На основе анализа банка глобальных данных о землетрясениях предложен индикатор глобальной тектонической активности. Показано, что 84% изменчивости индикатора представляет собой гармоническое колебание с основным периодом 37,2 года. Из этого сделан вывод о наличии параметрического резонанса (ПР) глобальной тектонической активности с низкочастотными приливными явлениями.

Ключевые слова: глобальная тектоническая активность, параметрический резонанс, землетрясение, модель, статистика Фишера, база данных.

Постановка задачи и исходные данные

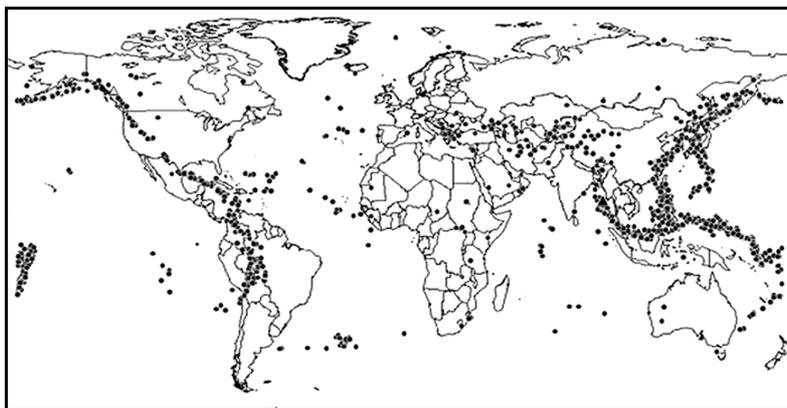


Рис. 1. Визуализация разломов сильнейшими землетрясениями недели.

Целью настоящей работы является построение статистической модели глобальной тектонической активности и анализ возможных механизмов формирования ее периодической и аperiodической изменчивости¹. Для решения этой задачи была сформирована база данных (БД) о землетрясениях, зарегистрированных мировой сетью сейсмических станций² в период 1983–2012 гг. База данных организована в виде рабочей книги электронных таблиц Excel-2010 и состоит из 92229 записей, каждая из которых соответствует одному землетрясению (событию) и содержит следующие поля: время события, широта эпицентра, долгота эпицентра, магнитуда. Для последующего анализа исходные данные были структурированы в 1509 записей, каждая из которых содержала данные, описывающие одну неделю и отраженные в следующих полях: временная привязка середины недели, количество событий, средняя магнитуда, СКО магнитуды, наибольшая магнитуда, отличие наибольшей магнитуды от средней в единицах СКО. Представительность исходных данных убедительно иллюстрирует рис. 1, на котором точки, соответствующие сильнейшим землетрясениям недели, надежно индицируют хорошо известную специалистам картину глобальных тектонических разломов.

¹ Aoki S., Ohtake M., Sato H. "Tidal Modulations of Seismicity: An Indicator of the Stress State?," *Abstracts of 29th General Assembly of International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior (IASPEI) Aug. 18–28, 1997. Thessaloniki, Greece.* Thessaloniki, 1997, p.347; Heaton T.H. "Tidal Triggering of Earthquakes." *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 43.7 (1975): 307–326; Knopoff L. "Earth Tides as a Triggering Mechanism for Earthquakes." *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 54 (1964): 1865–1870.

² Оперативный сейсмологический каталог [Электронный ресурс] // Мировой центр данных по физике твердой Земли, Москва. Режим доступа: <http://www.wdcb.ru/sep/seismology/seismology.ru.html>.

Методы моделирования

Статистическое моделирование глобальной тектонической активности (ГТА) осуществлялось методами регрессионного анализа¹. В качестве индикатора ГТА тестировались количество событий, средняя магнитуда и наибольшая магнитуда. Для каждого из предполагаемых индикаторов строилась регрессионная модель вида:

$$I(t) = \sum_{k=0}^n [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] + Rez(t) \tag{1}$$

с нахождением модельных коэффициентов (a_k, b_k, ω) методом наименьших квадратов с последующим тестированием их статистической значимости по критерию Стьюдента и оценкой качества построенной регрессионной модели по сходству остатков моделирования с белым шумом.

Сходство остатков моделирования с белым шумом, в свою очередь, количественно оценивалось по близости значения статистики Дарбина-Уотсона к 2 и близости интегрированной периодограммы остатков $Rez(t)$ к прямой, проходящей через начало координат (по значению коэффициента детерминации моделирования интегрированной периодограммы указанной прямой). Поток событий (землетрясений) моделировался как линейная комбинация пуассоновских и гауссовых потоков с различными параметрами интенсивности.

Результаты моделирования

Наибольшим коэффициентом детерминации (84%) из всех тестируемых индикаторов обладает средняя магнитуда при первой гармонике с периодом 37,2 года. Значение статистики Фишера при этом 667. Результаты моделирования иллюстрирует рис. 2.

Спектр модельного колебания отображен в таблице 1.

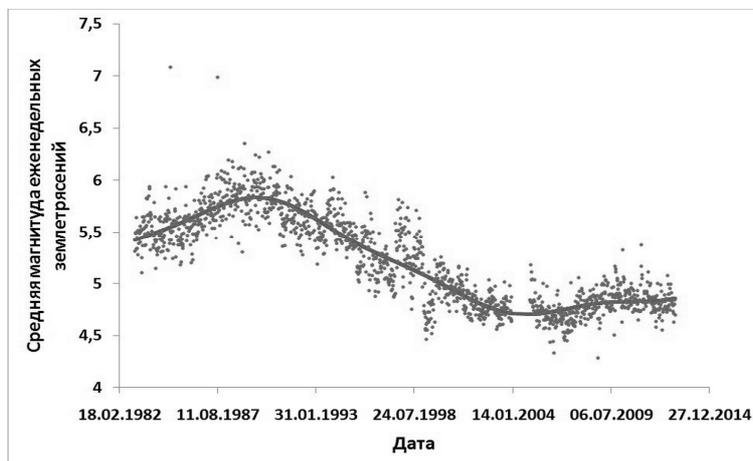


Рис. 2. Значения индикатора (точки) и модель (сплошная линия).

Спектр модельного колебания

Таблица 1

Гармоника	0	1	2	3	4
Амплитуда	5,20	0,52	0,08	0,01	0,04
Погрешность	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Курсивом и уменьшенным шрифтом выделена отброшенная при построении модели третья гармоника, значимость которой менее 80%. Значимость остальных отличается от 100% меньше, чем на 4×10^{-8} .

Непосредственное тестирование остатков модели (1) $Rez(t)$ на близость к белому шуму нецелесообразно из-за наличия хорошо известного сейсмологам «афтершокового эффекта»², длительность которого, зачастую, более недели³. Его наличие количественно подтверждается высоким значением автокорреляционной функции средней магнитуды для лага в одну неделю, $B(1) = 0,44$. Поэтому модель (1) целесообразно дополнить авторегрессионным членом:

$$I(t) = \sum_{k=0}^n [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] + B(1)I(t - \tau) + Rezar(t), \tag{2}$$

где $\tau = 1$ неделя. Для остатков модели (2) $Rezar(t)$ значение статистики Дарбина-Уотсона составляет 2,16 а вид энергетического спектра и интеграла от него иллюстрирует рис. 3. Коэффициент детерминации моделирования интеграла от энергетического спектра прямой, проходящей через начала координат, составляет 99,6%.

Построенная модель глобального потока землетрясений коэффициентом детерминации 93% (значение статистики Фишера – 8217) представляет собой сумму двух гауссовых потоков примерно равной интенсивности со средними значениями 23 и 83 события в неделю и стандартными отклонениями 9 и 30 событий в неделю соответственно. Ее вид иллюстрирует рис. 4. Интересно отметить то обстоятельство, что величина отношения земной окружности к среднему времени между землетрясениями в первой и второй из описанных выше мод потока соответствует по порядку величины скоростям звука в жидкости (~1500м/с) и упругой среде (5500м/с).

Обсуждение результатов

Основным результатом выполненного моделирования является наличие колебания с периодом 37,2 года. Такие колебания хорошо известны в физике атмосферы и океана⁴ и они представляют собой параметрический резонанс (ПР) с самым низкочастотным из приливных колебаний, имеющим период 18,6 лет⁵. Физическая природа явления традиционна

¹ Tanaka S., Ohtake M., Sato H. "Evidence for Tidal Triggering of Earthquakes as Revealed from Statistical Analysis of Global Data." *J. Geophys. Res. Solid Earth* 107.B10 (2002): ESE 1-1–ESE 1-11.

² Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19–50.

³ Тюпкин Ю.С. Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 3–10.

⁴ Дворецкая И.В., Крученицкий Г.М., Матвиенко Г.Г., Станевич И.И. Астрономические факторы в долговременной эволюции климата Земли // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 2. С. 139–149.

⁵ Марчук Г.И., Каган Б.А. Динамика океанских приливов. Л.Ж Гидрометеоздат, 1982. 359 с.; Николаев В.А. Пространствен-

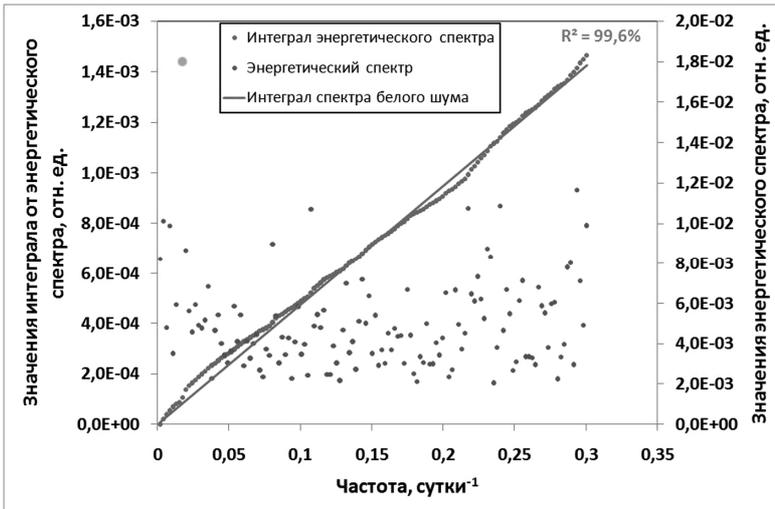


Рис. 3. Тестирование энергетического спектра остатков модели (2) на сходство с белым шумом.

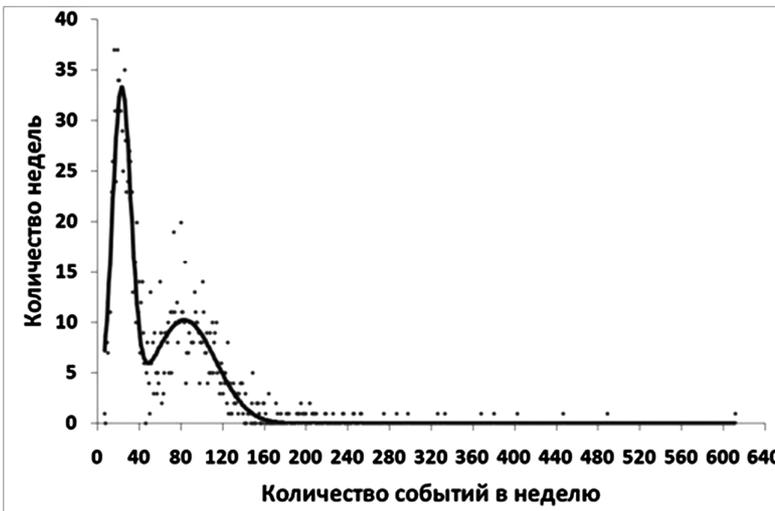


Рис. 4. Поток событий (точки) и его модель (сплошная линия).

первый взгляд отрицательным значением коэффициента корреляции ($W(1) = -0,68$, см. выше) количества землетрясений в течение недели со средней магнитудой землетрясений на предыдущей неделе. Более сильное землетрясение снимает большее количество сформировавшихся напряжений и их остается меньше для снятия на следующей неделе.

Отметим, что обнаруженный ПР является свидетельством эффективного взаимодействия геосфер на низких частотах. Дополнительно к примерам, приведенным в работе И.В. Дворецкой с соавт.⁴, укажем на наличие аналогичного ПР в озоносфере (рис. 5, 6).

Параметрический резонанс озоносферы, возбуждаемый приливными эффектами, помимо чисто атмосферно динамических причин может объясняться влиянием тектонической активности на интенсивность дегазации Земли, связь которой с состоянием озонового слоя впервые обоснована В.Л. Сывороткиным⁵. Эта связь, в частности, подтверждается высокой интенсивностью резонансного отклика на НАИМЕНЬШЕЙ из приливных частот. Атмосфера, и озоносфера, в частности, не отличается такой высокой инерционностью, как литосфера, и поэтому естественно предположить опосредованность эффекта через указанный механизм взаимодействия геосфер.

для ПР. Вариации тектонической активности порождаются не напряжениями в земной коре, обусловленными приливными силами, а изменениями параметров колебательной системы¹. Приливные силы вызывают перераспределение масс внутри Земли, и, следовательно, условий распространения ударных возбуждений². В соответствии с общей теорией параметрического резонанса³ это вызывает отклик на частотах, кратных половине возбуждающей частоты, причем именно на половинной частоте резонансный отклик наиболее устойчив. Уместно напомнить также, что при этом, в отличие от обычного резонанса, резонансный отклик нарастает со временем не линейно, а экспоненциально, т.е. система весьма чувствительна к периодическим изменениям ее параметров. Причем главные ограничения на спектр вынуждающих колебаний налагаются инерционностью системы – не случайно наиболее эффективный ПР наблюдается на возбуждающей частоте самого медленного из приливных колебаний, соответствующей периоду 18,6 года. Впрочем, на следующей по малости частоте приливных колебаний, соответствующей периоду 182,6 суток резонансный отклик, хотя и гораздо меньше, но также вполне заметен (жирная серая точка на рис. 3).

Изложенные соображения дают основания предполагать, что глобальная тектоническая активность формируется откликами на спорадически возникающие ударные возбуждения путем снятия напряжений в земной коре за счет вызванных этими возбуждения волнами. Именно поэтому условия распространения таких волн, модулируемые приливными явлениями, и вносят основной (84%) вклад в глобальную тектоническую активность. Такое предположение подтверждается и далеко не очевидным на

но-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами // Наведенная сейсмичность / Под ред. Николаева А.В., Галкина И.Н. М.: Наука, 1994. С. 103–114; Салтыков В.А., Иванов В.В., Кугаенко Ю.А. Воздействие земных приливов на сейсмичность перед землетрясением 13 ноября 1993 года $M_w = 7.0$ (Камчатка) // Физика Земли. 2004. № 7. С. 25–34.

¹ Polombo A. "Lunar and Solar Tidal Components in the Occurrence of Earthquakes in Italy." *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 84.1 (1986): 93–99.

² Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.

³ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М., Физматгиз, 1958. С. 103–109.

⁴ Дворецкая И.В., Крученицкий Г.М., Матвиенко Г.Г., Станевич И.И. Указ. соч.

⁵ Сывороткин В.Л. Дегазация Земли и разрушение озонового слоя // Природа. 1993. № 9. С. 35–45; Он же. Глубинная дегазация, озоновый слой и природные пожары в Европейской России летом 2010 года // Пространство и Время. 2010. № 2. С. 175–182; Он же. Озонная методика изучения водородной дегазации Земли [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Специальный выпуск «Система планета Земля». 2013. Т. 4. № 1. Режим доступа: http://j-spacetime.com/actual%20content/t4v1/2227-9490e-aprov_r_ast4-1.2013.21.php.

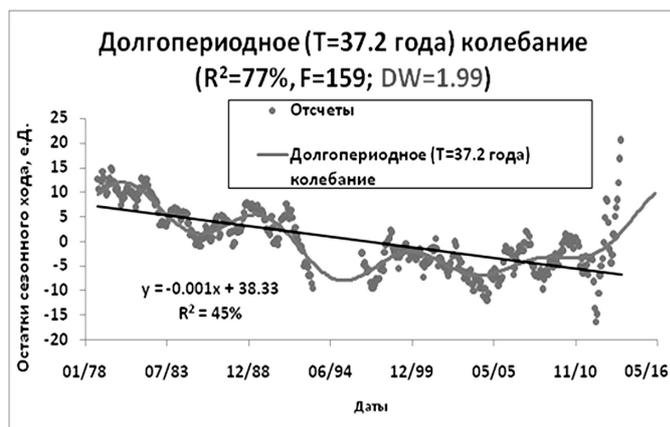


Рис. 5. Модель долговременной изменчивости среднеглобального содержания озона в атмосфере (коэффициент детерминации – 77%, статистика: Фишера – 177, Дарбина-Уотсона – 1,99).

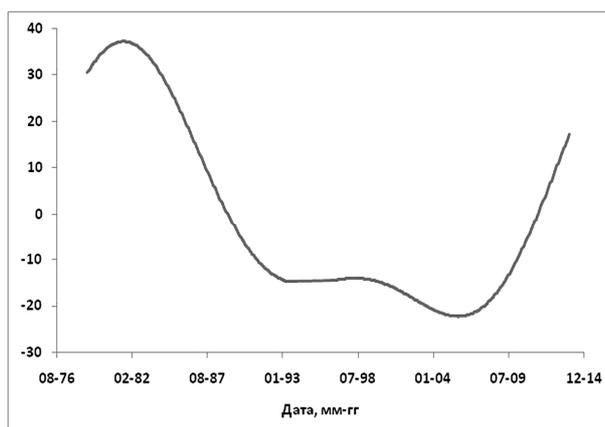


Рис. 6. Модель долговременной изменчивости общего содержания озона над Южным полюсом (коэффициент детерминации – 33%, статистика: Фишера – 20, Дарбина-Уотсона – 2,07).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворецкая И.В., Крученицкий Г.М., Матвиенко Г.Г., Станевич И.И. Астрономические факторы в долговременной эволюции климата Земли // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 2. С. 139–149.
2. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Поиск влияния гравитационных приливов на региональную сейсмичность Греции разными методами: 1. Спектральный и периодограммный анализ // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 5–26.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Физматгиз, 1958. С. 103–109.
4. Марчук Г.И., Каган Б.А. Динамика океанских приливов. Л.: Гидрометеоздат, 1982, 359 с.
5. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
6. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19–50.
7. Николаев В.А. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами // Наведенная сейсмичность / Под ред. Николаева А.В., Галкина И.Н. М.: Наука, 1994. С. 103–114.
8. Оперативный сейсмологический каталог [Электронный ресурс] // Мировой центр данных по физике твердой Земли, Москва. Режим доступа: <http://www.wdcb.ru/sep/seismology/seismology.ru.html>.
9. Салтыков В.А., Иванов В.В., Кугаенко Ю.А. Воздействие земных приливов на сейсмичность перед землетрясением 13 ноября 1993 года $M_w = 7.0$ (Камчатка) // Физика Земли. 2004. № 7. С. 25–34.
10. Сывороткин В.Л. Дегазация Земли и разрушение озонового слоя // Природа. 1993. № 9. С. 35–45.
11. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация, озоновый слой и природные пожары в Европейской России летом 2010 года // Пространство и Время. 2010. № 2. С. 175–182.
12. Сывороткин В.Л. Озонная методика изучения водородной дегазации Земли [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Специальный выпуск «Система планета Земля». 2013. Т. 4. № 1. Режим доступа: http://j-spacetime.com/actual%20content/t4v1/2227-9490e-aprovgr_e-ast4-1.2013.21.php.
13. Тюпкин Ю.С. Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 3–10.
14. Aoki S., Ohtake M., Sato H. "Tidal Modulations of Seismicity: An Indicator of the Stress State?,". *Abstracts of 29th General Assembly of International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior (IASPEI) Aug. 18-28, 1997. Thessaloniki, Greece.* Thessaloniki, 1997, p. 347.
15. Heaton T.H. "Tidal Triggering of Earthquakes." *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 43.7 (1975): 307–326.
16. Knopoff L. "Earth Tides as a Triggering Mechanism for Earthquakes." *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 54 (1964): 1865–1870.
17. Tanaka S., Ohtake M., Sato H. "Evidence for Tidal Triggering of Earthquakes as Revealed from Statistical Analysis of Global Data." *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 107.B10 (2002): ESE 1-1–ESE 1-11.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Статников, К. А., Крученицкий, Г. М. Статистическое моделирование глобальной тектонической активности и некоторые физические следствия из его результатов / К.А. Статников, Г.М. Крученицкий // Пространство и Время. — 2015. — № 1—2(19—20). — С. 314—317. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provgr_st1_2-19_20.2015.94.