

УДК 550.34:528.2

О влиянии скорости вращения Земли на глобальную сейсмичность (по материалам наблюдений с 1720 по 2016 г.)

© Б.В. Левин^{1,2}, Е.В. Сасорова²

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия;

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия.

E-mail: levinbw@mail.ru; sasorova_lena@mail.ru

Сейсмическая активность Земли демонстрирует отчетливую неравномерность (неоднородность) как в пространстве, так и во времени. Периоды усиления сейсмической активности (СА) сменяются периодами ее спада. Усиление СА в одном регионе может сопровождаться ее ослаблением в другом. В работе впервые сделана попытка определить влияние низкочастотных составляющих вариаций угловой скорости вращения Земли на динамику ее сейсмической активности. Анализ временных рядов плотности сейсмических событий и вариаций скорости вращения Земли длительностью около 300 лет показывает, что каждый этап уменьшения угловой скорости вращения (торможения) сопровождается увеличением плотности сейсмических событий, а этапы увеличения угловой скорости вращения (разгона) сопровождаются уменьшением плотности событий. В настоящее время Земля входит в начальную фазу нового процесса торможения, что может привести к усилению глобальной сейсмической активности.

Ключевые слова: глобальная сейсмичность, землетрясения, магнитуда, угловая скорость вращения Земли, режим торможения.

On the influence of the Earth's rotation velocity on global seismicity on the basis of observations from 1720 to 2016

B. V. Levin^{1,2}, E. V. Sasorova².

¹*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;*

²*Shirshov Oceanology Institute, RAS, Moscow, Russia*

E-mail: levinbw@mail.ru; sasorova_lena@mail.ru

Earth's seismic activity demonstrates a distinct nonuniformity (heterogeneity) both in space and in time. The periods of intensification of seismic activity (SA) are followed by periods of its decline. Strengthening the SA in one region may be accompanied by a decrease in the SA in another region. In the present work, an attempt has been made at first to determine the effect of low-frequency components of the variations in the angular velocity of the Earth's rotation on the dynamics of its seismic activity. The analysis of the time series of the density of seismic events and variations in the Earth's rotation velocity during period of about 300 years shows that each stage of reducing the angular velocity of rotation is accompanied by an increase in the density of seismic events, and the stages of increasing the angular velocity of rotation are accompanied by a decrease in the density of events. At present, the Earth enters the initial phase of the new rotation reducing process, which can lead to an increase in global seismic activity.

Keywords: global seismicity, earthquakes, magnitude, angular velocity of Earth's rotation, regime of retardation.

Введение

Известно, что сейсмическая активность Земли демонстрирует отчетливую неравномерность (неоднородность) как в пространстве, так и во времени. Периоды усиления сейсмической активности (СА) сменяются

периодами ее спада. И эти периоды по-разному проявляются в различных регионах Земли. Усиление СА в одном регионе может сопровождаться ее ослаблением в другом. Для сильных землетрясений эти циклы продолжаются по несколько десятков лет (около

30, 55 и 70 лет [Лутиков, Рогожин, 2014; Левин Б.В., Сасорова, 2015 а, б]).

Отчетливая неоднородность пространственного распределения эпицентров землетрясений на Земле была обнаружена уже в эпоху становления сейсмологической науки. Впервые неравномерность распределения событий по широтам отмечена в работе [Gutenberg, Richter, 1942] (рассматривались землетрясения с $M > 7$). В работах [Mogi, 1979, 1985] автор анализировал распределение сильных землетрясений с $M > 7$ одновременно по широтам (в диапазоне от 60°N до 60°S) и по временной шкале. Он обнаружил «сгущения» в распределениях в районе средних широт, ослабление активности в районе экватора и практически полное ее отсутствие на высоких широтах.

В последние годы отмечается возрождение интереса к проблеме поиска глобальных пространственных и временных регулярностей в распределении сейсмических событий на Земле и к влиянию внешних (астрономических) воздействий на сейсмические процессы. Анализ движений Земли как небесного тела в Солнечной системе показывает, что кроме основных сил, действующих на элементы геосфер, т.е. гравитационных и центробежных, важную роль играют и более слабые воздействия. Эти силы вызваны приливными воздействиями, вариациями угловой скорости вращения Земли и перемещением оси вращения из-за смещения внутреннего ядра.

В работах [Левин, Павлов, 2001, 2003] была предложена теоретическая модель, в рамках которой на единой основе учитывалось влияние приливных эффектов, неравномерности вращения Земли и Чандлера качания полюса на изменение напряженного состояния литосферы. Количественной мерой изменения служат вариации плотности свободной энергии в литосфере. Эти вариации вычислялись в рамках линейной теории упругости и выражались через тензор напряжений, который реконструируется по условиям равновесия элемента литосферы под действием учитываемых в модели сил.

Предложенная в работах [Левин и др., 2011; Levin et al., 2014] теоретическая модель

описывает развитие двух симметричных относительно экватора зон гидродинамической неустойчивости в средних широтах планеты, обусловленных ее вращением (для моделей однородной и слоисто-неоднородной плотности Земли). И именно в районе этих широт по наблюдательным данным отмечаются максимумы сейсмической активности.

В монографии [Левин, Сасорова, 2012] показано, что широтные распределения плотности землетрясений и выделенной энергии характеризуются устойчивой бимодальной формой распределения. В районе полюсов и высоких широт плотность землетрясений близка к нулю. В средних широтах Северного и Южного полушарий эта величина имеет по одному ярко выраженному максимуму, а вблизи экватора образует локальный минимум. Было обнаружено, что эта бимодальность проявляется с незначительными различиями для коровых (мелкофокусных), промежуточных и глубокофокусных событий. Для доказательства устойчивости обнаруженной бимодальности в пространстве были опробованы разные широтные шкалы. Поверхность Земли разделялась на широтные пояса размером в 10° , 5° , 2° . При этом все найденные основные характерные черты пространственных распределений сейсмических событий сохранялись. Однако пространственно-временные особенности распределений сейсмических событий, наличие в них периодичности в этой работе практически не рассматривались.

В настоящее время проблема пространственно-временных распределений сейсмических событий на нашей планете остается одной из наиболее интересных. Цель данной работы состоит в установлении связи пространственно-временных закономерностей в распределении плотности сейсмических событий с вариациями угловой скорости вращения Земли (ВСВЗ) за период с 1720 по 2016 г.

Попытки обнаружить связь между глобальной сейсмической активностью и особенностями вращения Земли предпринимались неоднократно. Условно эти работы можно разделить на два направления.

В работах первого направления исследовалась корреляционная зависимость между количеством (плотностью) землетрясений (ЗТ) и значениями относительного изменения скорости вращения Земли (безразмерной величиной ν) [Горькавый и др., 1994; Фридман и др., 2005]. В них подсчитывались корреляционные коэффициенты для событий с разными магнитудными диапазонами ($M \geq 4.0$, $M \geq 4.5$, $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, $M \geq 6.5$, $M \geq 7.0$, $M \geq 7.5$), с разными глубинами гипоцентров (от 0 до 800 км), с различными регионами расположения эпицентров, с различными интервалами осреднения данных (по времени от 1 до 5 лет), с разными сдвигами временных рядов по времени (от -3 до $+3$ года). Энергия, выделенная от землетрясений, не определялась, и ее связь с вариациями скорости вращения Земли не рассматривалась.

Удалось обнаружить, что только для слабых событий с $M \geq 4.0$ коэффициенты корреляции достигают значений 0.5–0.6 (по модулю) [Горькавый и др., 1994; Фридман и др., 2005]. И эти результаты вполне закономерны, так как длительность исследуемых временных рядов не превышала 40 лет: использовались рабочие каталоги по сейсмическим событиям длительностью с 1964 по 2000 г. (а часто и меньше), а для данных по ВСВЗ – только база данных IERS (данные с 1962 г.).

Попытки установить связь между глобальной сейсмической активностью и особенностями вращения Земли предпринимались в работах [Varga et al., 2005; Ma, Li-Hua et al., 2007]. Авторы [Trofimenko et al., 2011] рассматривали годовые и суточные циклы сейсмической активности начиная с 1955 г. для четырех районов Дальнего Востока и Сибири и их связь с динамикой вращения Земли и циклами возникновения солнечных пятен. Попытки увязать влияние вращения Земли и приливных сил на плитовую тектонику Земли предприняты в работе [Riguzzi et al., 2010], но в ней не удалось найти объяснения обнаруженным закономерностям широтных и глубинных распределений землетрясений.

Авторы второй группы работ (Ostrihansky, 2010, 2012 а, б) пытаются найти связь между высокочастотной составляющей ВСВЗ

(с периодом 13.66 сут) и землетрясениями с $M \geq 6.0$. В основном эти работы характеризуются поиском совпадений пиков этой составляющей со временем возникновения ЗТ на коротком интервале наблюдений (1–3 года). Наличие нескольких совпадений трактуется как доказательство влияния данной составляющей на сейсмическую активность. Рассматривались короткие временные интервалы (от 3 до 10 лет). Следует отметить, что за три года эта гармоника достигает максимума 79 раз, и наличие одного или двух совпадений не может считаться доказательством связи высокочастотной составляющей ВСВЗ с сейсмической активностью Земли. Работы в этом направлении стали особенно популярны после последних мегаземлетрясений (Индонезийского, 2004 г., и Тохоку, 2011 г.).

В настоящей работе впервые сделана попытка определить влияние низкочастотных составляющих вариаций угловой скорости вращения Земли на динамику ее сейсмической активности на основе анализа длительных рядов наблюдательных данных как по вариациям угловой скорости вращения Земли (около 300 лет), так и по сейсмическим событиям. Если удастся показать временную корреляцию между сейсмическим процессом и ВСВЗ, а также существование зональности в распределении энергии, выделенной вследствие изменения угловой скорости вращения, то эти результаты могут оказаться существенным вкладом в понимание природы возникновения неоднородности в распределении геофизических процессов на Земле.

1. Подготовка сейсмических данных

Для получения корректных статистических результатов каждый подготовленный рабочий каталог по сейсмическим событиям должен содержать представительный набор событий. По оценкам разных авторов, для начала XX в. представительными могут считаться события с магнитудой $M \geq 7.5$. Оценка представительной магнитуды для каждого региона имеет большое значение. Она осуществлялась по рабочим каталогам, очищенным от афтершоков.

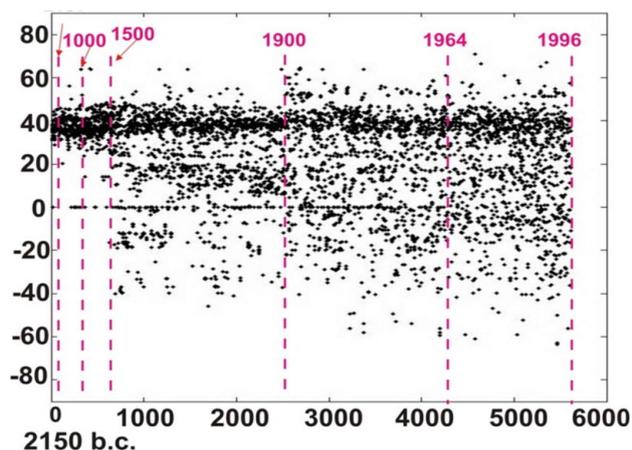


Рис. 1. Широтное распределение сильных исторических землетрясений (с 2150 г. до н.э. по 1996 г. н.э.) согласно каталогу NEIC/USGS. Вертикальная ось – широтное расположение сейсмических событий. Нижняя горизонтальная ось – порядковый номер события в каталоге; верхняя – время возникновения событий (год).

Для формирования рабочего каталога сильных ЗТ за период с 1720 по 2016 г. использовались два подмножества баз всемирного каталога NEIC/USGS (<http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>): каталог USGS/NEIC с 1973 по 2016 г. и каталог значительных землетрясений на Земле с 2150 г. до н.э. по 1994 г. н.э., скомпилированный NEIC на основе базы данных агентства NOAA (рис. 1). Для пополнения списка сильных событий в период 1720–1895 гг. использовались и другие источники (например, база данных по цунами [HTDB/WLD]).

Заметна отчетливая неоднородность пространственного распределения эпицентров ЗТ: явно выраженное сгущение событий в районе 50°–30°N, ослабление активности в районе экватора и практически полное ее отсутствие на высоких широтах. Можно отметить также незначительное количество за-

регистрированных событий в Южном полушарии, что нивелируется к 1964 г.

Для подготовки рабочих версий каталогов сначала было проведено несколько этапов предварительной обработки: исключение дублей, выделение и правка записей с пустыми полями, стандартизация магнитудных шкал и удаление афтершоковых последовательностей.

Следует отметить, что унификация магнитудных шкал превратилась для этого проекта в отдельную проблему. В каталоге значительных землетрясений магнитуда событий описывается в шкале агентства NOAA (M_{noaa}), а в каталоге NEIC с 1973 г. магнитуда каждого события может быть представлена одновременно несколькими значениями: M_b , M_s , M_w и другими. Магнитуды M_w начинают активно использоваться с 1985 г., а в настоящее время эта шкала становится основной для описания сильных событий. Для рабочего каталога сильных событий с 1720 г. мы использовали магнитудную шкалу M_s , так как для периода 1720–1980 не было возможности получить диаграммы рассеивания для шкал M_{noaa} и M_w . Заметим, что с 1973 по 1994 г. оба используемые нами подмножества каталога NEIC пересекаются (накладываются друг на друга). Это дало нам возможность сначала выделить те события, которые присутствуют в обоих подмножествах, а далее из них выделяли те события, для которых одновременно определена пара магнитуд (например: M_{noaa} и M_s или M_{noaa} и M_b). После этого определялись соотношения линейной регрессии (рис. 2). Для соотношения $M_s = f(M_{noaa})$ уравнение линейной регрессии имеет вид: $M_s = 0.9099 M_{noaa} + 0.5146$, а значение R^2 (несмещенная оценка коэффициента соот-

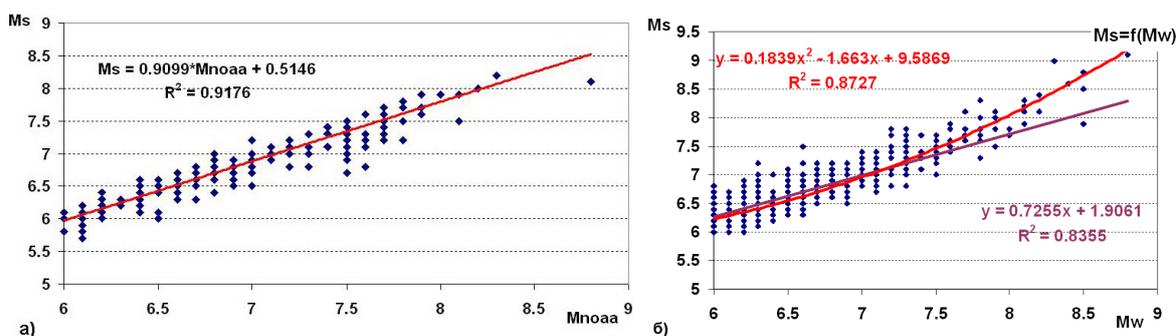


Рис. 2. Регрессионные зависимости: а – для магнитуд M_s и M_{noaa} (по данным за 1973–1994 гг.), б – зависимости линейная и квадратичная для магнитуд M_s и M_w (по данным за 1985–2013), а также значения R^2 .

ветствия полученного линейного уравнения регрессии по наблюдательным данным) равно 0.91, что показывает очень хорошее соответствие полученного линейного уравнения регрессии наблюдательным данным.

Затем такая же процедура была повторена для периода с 1985 по 2016 г. для магнитуд M_s и M_w (определялась зависимость $M_s = f(M_w)$). При использовании уравнения линейной регрессии ($M_s = 0.7255 M_w + 1.9061$) значение $R^2 = 0.8355$, а при использовании уравнения квадратичной регрессии ($0.1839 M_w^2 - 1.663 M_w + 9.5869$) $R^2 = 0.8727$. Уравнения регрессии, их графики и значения R^2 приведены на рис 2. Таким образом, пошагово была выполнена процедура унификации магнитуды в рабочем каталоге событий за весь рассматриваемый период. Следует сказать, что для событий, произошедших ранее 1890 г. (до начала инструментальных наблюдений), параметры сейсмических событий оценивали в основном по макросейсмическим данным.

Далее, с помощью широко известной программы В.Б. Смирнова была произведена обработка полученной версии рабочего каталога для маркировки афтершоковых последовательностей, и затем создана дополнительная версия рабочего каталога без афтершоков.

Для построения пространственных распределений очагов ЗТ поверхность Земли была разбита на 18 широтных поясов с размером широтного пояса 10° . Иногда анализировались отдельно три множества событий: события по всей Земле, события в Северном и Южном полушариях. Для анализа временных распределений весь интервал наблюдений разбивался на 5-летние интервалы, и рассматривалось суммарное количество событий и суммарная выделенная энергия в каждом интервале. Каждый 5-летний интервал определялся как множество событий, закрытое слева и открытое справа. Например, если задан интервал с 1900 по 1905 гг., то это означает, что в него попадают все события, у которых $1900 \leq t_i < 1905$ (t_i – время начала события).

Так как большинство сейсмических событий приурочено к границам литосферных плит, то для оценки сейсмической активности использовали плотность событий и плот-

ность энергии – количество землетрясений и выделенной энергии, нормированные на длину границ литосферных плит в каждом широтном поясе. Такое нормирование позволяет оценить мощность данного участка границы плиты (среднее число землетрясений, генерируемое на каждые 100 км плитовой границы). Использование этой характеристики, имеющей ясный физический смысл, позволяет сравнивать сейсмическую активность широтных поясов и различных частей земного шара.

1.1. Периодичность сейсмических событий

Распределение ЗТ за период с 1720 по 2016 г. по 10-летним интервалам представлено на рис. 3.

С началом эры инструментальных наблюдений (1895 г.) резко увеличивается количество зарегистрированных сейсмических событий (с 3–4 событий за 5 лет в 1720–1895 гг. до 26 событий в 1895–2015 гг.). Поэтому сравнительный анализ сейсмической активности (СА) и вариаций скорости вращения Земли в периоды 1720–1895 и 1895–2015 выполнялся отдельно.

Распределения сильных землетрясений ($M \geq 7.5$) по 5-летним интервалам за период 1895–2015 г. представлены на рис. 4 (для всей Земли, для Северного и Южного полушарий). По вертикальным осям дано относительное количество землетрясений $N_{rel} = N_i / N_{sum}$, где N_i – количество событий в i -м интервале, а N_{sum} – суммарное количество событий по всем временным интервалам. Всего было зарегистрировано 640 событий, в том числе 404 в Северном полушарии и 236 в Южном.

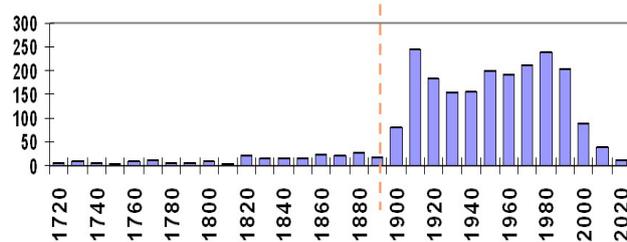


Рис. 3. Распределение сильных землетрясений ($M \geq 7.5$) по 10-летним интервалам за период 1720–2016 гг. Штриховая линия показывает начало эпохи инструментальных наблюдений.

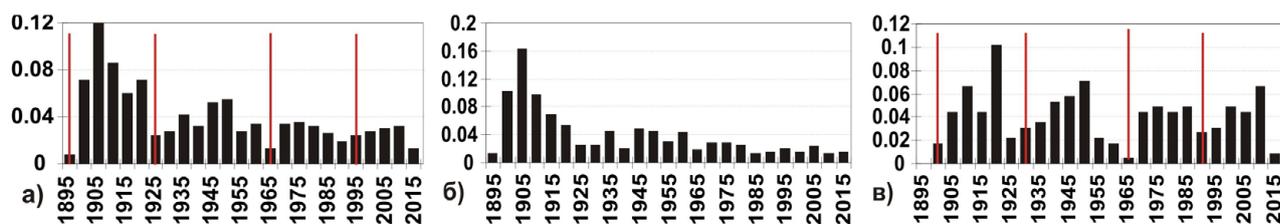


Рис. 4. Распределения сильных землетрясений ($M \geq 7.5$) по 5-летним интервалам с 1895 по 2015 г.: для всей Земли (а), для Северного полушария (б) и для Южного (в). Горизонтальная ось – верхние границы 5-летних интервалов; вертикальная ось – относительное количество землетрясений. Вертикальными линиями показаны локальные минимумы СА.

Значительный пик сейсмической активности в начале XX столетия видим на всех трех фрагментах рис. 4, но наиболее заметное увеличение сейсмической активности за исследуемый период наблюдается в Северном полушарии. Здесь за 1895–1920 гг. (5 пятилетних интервалов) зарегистрировано 190 событий, в среднем 38 событий за каждый 5-летний интервал. В то же время с 1925 по 2015 г. (19 пятилетних интервалов) произошло 198 событий, в среднем 10 событий за каждый 5-летний интервал (т.е. практически 4-кратное уменьшение). Еще большее уменьшение количества событий по сравнению с 1895–1920 гг. наблюдается с 1980 по 2010 г. (6 пятилетних интервалов), когда произошло 39 событий, в среднем около 6 событий за каждый 5-летний интервал.

Анализ динамики сейсмической активности во времени в Южном полушарии за период с 1895 по 2013 г. (рис. 4в) дает иную картину. Здесь можно отметить небольшое увеличение СА в начале XX в. В среднем 10 событий за 5 лет для периода 1896–1920 и 9 событий за 5 лет для периода 1925–2010 гг. Однако на этом графике бросается в глаза ярко выраженная периодичность последовательного увеличения и уменьшения СА. Можно выделить 3 таких периода: 1895–1925 (30 лет), 1930–1960 (30 лет), 1965–1990 (25 лет). На рис. 4в эти периоды отмечены вертикальными линиями. Анализ динамики сейсмической активности во времени за период с 1720 по 1890 гг. показан на рис. 5.

Визуальный анализ распределений сильных землетрясений во времени позволяет выделить наличие цикличности СА с периодом около 25–35 лет.

1.2. Анализ динамики сейсмической активности

Известно, что периоды усиления СА для сильных землетрясений сменяются периодами ее спада, и эти циклы продолжаются по несколько десятков лет (по разным оценкам – около 30, 55 и 70 лет).

Попытка выделить характерные периоды возникновения сильных ЗТ предпринималась рядом исследователей. Наиболее полный анализ был произведен в работе [Лутиков и Рогожин, 2014]. Анализируя периодичности в появлении сильных ЗТ за период с 1900 по 2013 г., авторы выделили характерные периоды усиления СА: 25, 30 и 55 лет (для разных магнитудных диапазонов начиная с $M_w \geq 6.8$), для разных глубин очагов землетрясений. Рассматривались все события на Земле без дифференциации их по пространственному признаку, и не учитывалась широтная зональность в распределении землетрясений.

Для оценки периодичностей в проявлении сейсмического процесса нами использован метод автокорреляционного анализа. Зависимости коэффициентов автокорреляции от длительности временного сдвига исследуемого ряда посчитаны для СА по всей Земле, для Северного и Южного полушарий (рис. 6).

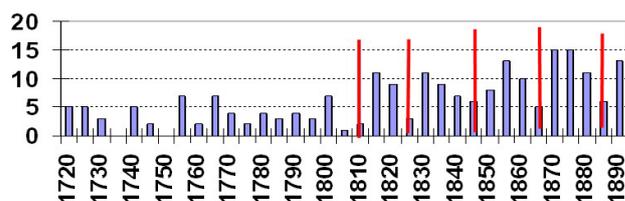


Рис. 5. Распределение сильных землетрясений ($M \geq 7.5$) по 5-летним интервалам за период 1720–1890 гг. Вертикальными линиями показаны локальные минимумы СА.

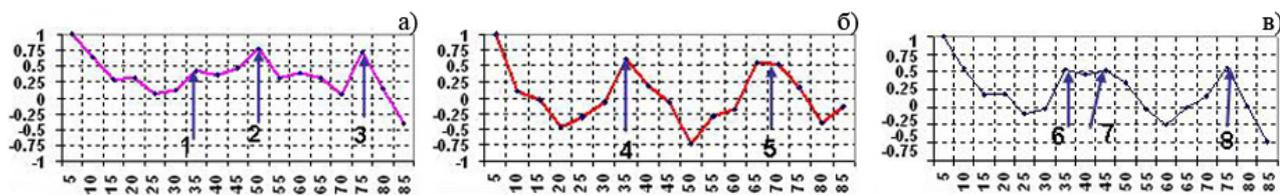


Рис. 6. Автокорреляционные зависимости для временных распределений сейсмической активности для Северного полушария (а), Южного полушария (б) и для всей Земли (в). Горизонтальная ось – сдвиг (время в годах); вертикальная – значения коэффициента автокорреляции. Стрелками помечены пики значений автокорреляционной функции.

Графики позволяют выделить цикличности с периодами около 35, 50 и 70 лет (последний можно расценить как период кратный 35 годам). Пики значений коэффициентов автокорреляции: для Северного полушария (рис. 6а) – 0.42 (сдвиг 35 лет, метка 1), 0.77 (сдвиг 50 лет, метка 2) и 0.77 (сдвиг 70 лет, метка 3); для Южного полушария (рис. 6б) – 0.61 (сдвиг 35 лет, метка 4), 0.55 (сдвиг 70 лет, метка 5); для всей Земли (рис. 6в) – 0.54 (сдвиг 35 лет, метка 6), 0.52 (сдвиг 45 лет, метка 7) и 0.56 (сдвиг 75 лет, метка 8).

Известно, что в начале XXI в. произошло несколько очень сильных событий (с $M_w \approx 9$), которые сейчас в литературе иногда называют мегаземлетрясениями. Поэтому далее для анализа СА мы рассматриваем и распределения энергии, выделенной от землетрясений по 5-летним интервалам за полный период наблюдений с 1895 по 2016 г. Они представлены на рис. 7. Отмечены локальные максимумы выделенной энергии в начале XX и XXI вв. Можно выделить также два локальных максимума для Северного полушария – за периоды 1930–1950 и 1950–1970, а для Южного – за периоды 1935–1955 и 1970–1990.

Интересно отметить, что пики наиболее активного выделения энергии в Южном полушарии (рис. 7в) сдвинуты относительно пиков наиболее активного выделения энергии в Северном полушарии (рис. 7б) на 5–10 лет. Максимумы в начале XXI в. обусловлены серией мегаземлетрясений. На рис. 7б номером 3 помечено индонезийское землетрясение 26.12.2004, номером 4 – ЗТ в Тохоку 11.03.2011, Япония, а на рис. 7в – чилийское ЗТ 27.02.2010. Максимумы выделенной энергии в начале XX в., отмеченные цифрами 1, 2, 5 и 6, обусловлены тем, что в эти 5-летние интервалы происходило по несколько ЗТ с $M \geq 8.0$ (от 6 до 10 событий за 1–2 года: 1897–1899, 1906 и 1917–1918 гг.).

При анализе динамики сильных ЗТ с $M_s \geq 7$ [Сасорова и др., 2013; Левин, Сасорова, 2012] в Курильском регионе и на Алеутских островах за 1910–2009 гг. отмечалось, что пики сейсмической активности разделены 30–35-летними периодами спада активности (рис. 8), а плотность землетрясений в первую треть XX в. в 4 раза выше, чем в период с 1980 по 2010 г. (рис. 9).

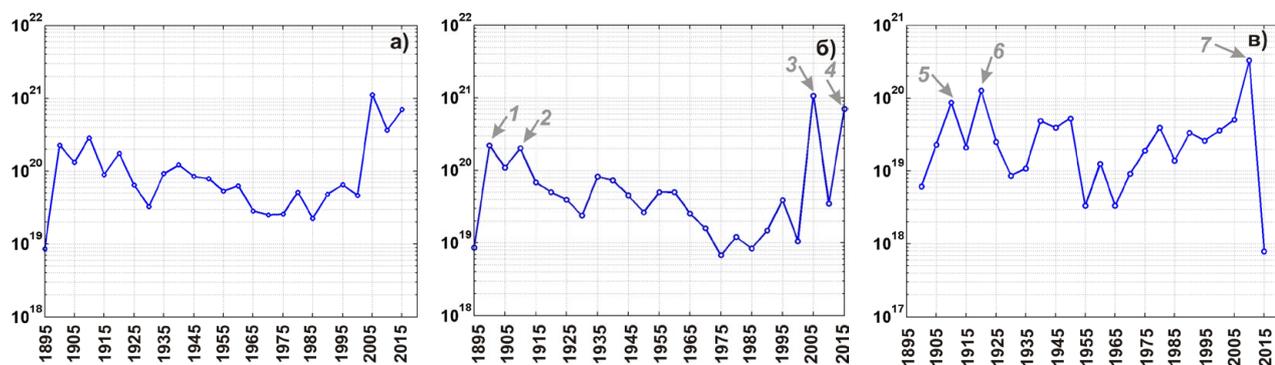


Рис. 7. Распределения энергии, выделившейся от сильных землетрясений с 1895 по 2015 г. по 5-летним интервалам: а – для всей Земли, б – для Северного полушария, в – для Южного полушария. Горизонтальная ось – верхние границы 5-летних интервалов; вертикальная ось (логарифмическая шкала) – энергия (в Дж). Стрелками с цифрами помечены локальные максимумы энергии.



Рис. 8. Распределение относительного количества энергии, выделившейся от событий с $M \geq 7.5$ за период с 1910 по 2009 г. Горизонтальная ось гистограммы – 5-тилетние временные интервалы. Интенсивность серого цвета задает процентное распределение событий по четырем глубинным диапазонам.

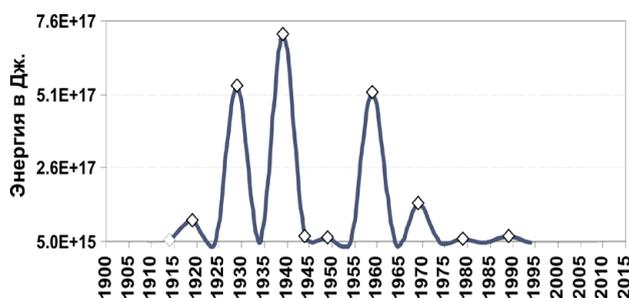


Рис. 9. Распределение количества выделенной энергии для сейсмических событий с $M \geq 7.5$ по 5-летним интервалам. Горизонтальная ось – год начала каждого интервала.

Ранее [Левин, Сасорова, 2012] было показано, что наиболее информативным и наглядным является представление данных о сейсмической активности в виде двумерных распределений (в данном случае в виде пространственно-временных распределений). Как сказано выше, для построения пространственных распределений очагов ЗТ поверхность Земли разбили на 18 широтных поясов с размером широтного пояса 10° ; разделили события, произошедшие в Северном и Южном полушариях Земли. Всего в рабочем каталоге собрано 640 событий с $M \geq 7.5$, в том числе 404 в Северном полушарии и 236 – в Южном.

Отмечена также связь глубины очага ЗТ с выделенными периодичностями в распределении событий. Основная часть очагов исследованных событий (87 %) расположена в диапазоне глубин 0–70 км, и именно они определяли периодические увеличения и спады СА в выделенных широтных поясах. Большая часть промежуточных ЗТ ($70 \text{ км} < H < 30 \text{ км}$) и глубоких событий ($300 \text{ км} \leq H$) приходится

на начало XX и XXI вв. (1900–1909 и 2002–2012 гг.). В остальные временные интервалы всплески глубинной активности часто совпадают по времени с максимумами усиления сейсмической активности для неглубоких землетрясений, но их плотность и выделенная от них энергия существенно меньше, чем у событий с $H < 70 \text{ км}$.

Показано [Левин, Сасорова, 2015б], что существует явно выраженная временная и пространственная кластеризация сейсмических событий. В каждые 25–30 лет четко выделяются периоды усиления СА, за которыми следуют периоды ее спада. Пространственное расположение этих кластеров в Южном полушарии всегда связано с широтами $0^\circ\text{--}30^\circ\text{S}$. Такая же периодичность отмечалась и на рис. 4 для временных распределений ЗТ (без привязки к широтным поясам).

На рис. 10 даны двумерные распределения плотности сейсмических событий с $M \geq 7.5$ по широтам и времени и двумерные распределения плотности энергии, выделенной от этих ЗТ, за период 1985–2014 гг.

Пространственные пики СА в Северном полушарии (рис. 10а) отмечаются в широтах $70^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$ и $50^\circ\text{--}30^\circ\text{N}$. Самый значительный всплеск СА отмечается в начале XX в., в период 1900–1915 гг. В некоторые интервалы времени (1895–1920) всплески СА происходят практически одновременно как в широтах $70^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$, так и в $50^\circ\text{--}30^\circ\text{N}$. После 1925 г. на протяжении всего оставшегося периода наблюдения пики СА в указанных широтах смещены друг относительно друга на 5–10 лет. Также смещены пики СА в Северном и Южном полушариях, что особенно заметно на рис. 10. В Северном полушарии временные интервалы между пиками СА не столь постоянны, как в Южном.

При анализе двумерных распределений энергии, выделенной от ЗТ (рис. 10б), также бросается в глаза ярко выраженная периодичность СА в Южном полушарии с периодом в 25–30 лет, что уже было отмечено выше.

Следует отметить, что анализ распределений по 5-летним интервалам для всех широтных поясов продемонстрировал явно выраженную периодичность в распределении сейсмических событий для поясов $50^\circ\text{--}30^\circ\text{N}$ и

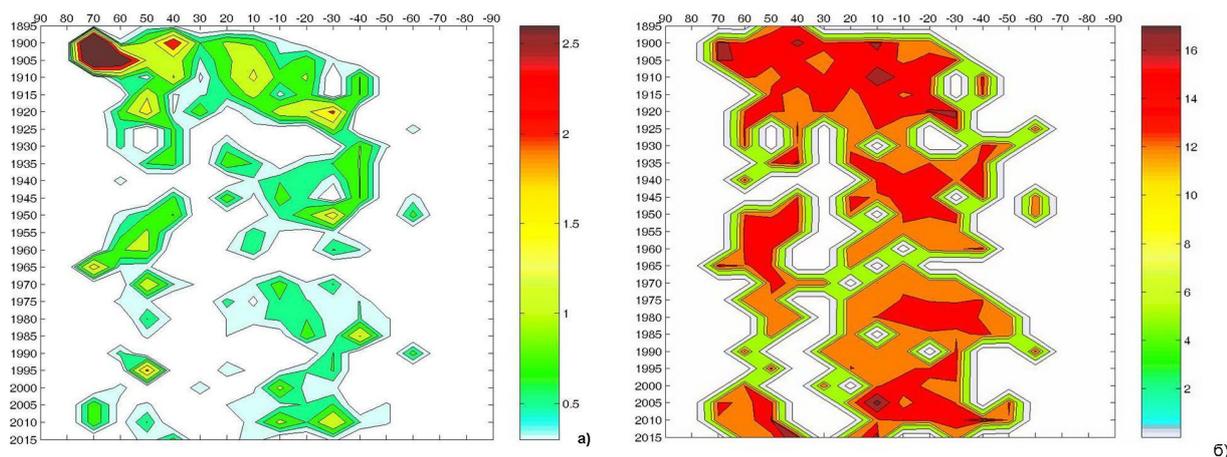


Рис. 10. Двумерные распределения плотности землетрясений (а) и плотности выделенной от них энергии (б) за период 1895–2015 гг. Вертикальная ось – верхние границы 5-летних интервалов; горизонтальная ось – широтные пояса. Шкала в правой части каждого рисунка задает значение плотности событий и плотности выделенной энергии.

0°–30°S. Однако для северной части западного полушария (тихоокеанского побережья Северной Америки) такой периодичности в широтном диапазоне 50°–30°N не наблюдается. Это позволяет предположить, что периодичность СА проявляется в основном в зонах субдукции, к которым относятся все остальные области с выраженной периодичностью СА.

Кластеры наибольшей сейсмической активности (как плотности сейсмических событий, так и выделенной энергии) на двумерных распределениях в Южном полушарии сдвинуты относительно кластеров наибольшей СА в Северном полушарии.

На рис. 11 представлены двумерные распределения плотности сейсмических событий (с $M \geq 7.5$) по широтам и времени за период с 1720 по 1890 г.

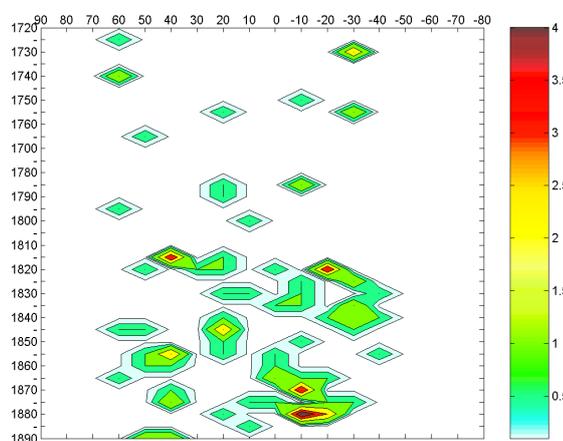


Рис. 11. Двумерные распределения плотности сейсмических событий (с $M \geq 7.5$) по широтам и времени за период 1720–1890 гг.

2. Подготовка данных по вариациям скорости вращения Земли

Для анализа вариаций скорости вращения Земли были адаптированы два источника данных.

В первом собраны общедоступные данные агентства International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) (<http://hpiers.obspm.fr/iers/>) о ежесуточных наблюдениях за изменениями длительности суток с 1962 по 2016 г. Эти данные стали основой для рабочего каталога (далее в тексте – SCAT) ежесуточных наблюдений за период 1962–2016 гг.

Во втором источнике [McCarthy, Babcock, 1986; Morrison, 1973] собраны данные за 1657–1984 гг. с частотой наблюдения один раз в полгода. На интервале 1657–1720 имеются годовые и полуторагодовые пропуски наблюдений, поэтому для подготовки рабочего каталога был использован период с 1720 по 1984 г. (общая продолжительность наблюдений 264 года, длина каталога – 528 отсчетов). Приготовлена электронная версия каталога (LCAT). Оба каталога имеют общий (накладывающийся) период наблюдения с 1962 по 1984 г.

В рассматриваемых источниках представлены значения LOD (Length of Day), определяемые как разность величин периодов ($P_z - P_a$), где P_a – период астрономических суток (86 400 с), а P_z – наблюдаемый период земных суток (P_z и P_a измерены в мс). Относительная вариация угловой скорости ν определяется как относительное изменение

угловой скорости, выраженное через их периоды: $v = (\omega - \Omega)/\Omega \approx -(Pz - Pa)/Pa$. Здесь ω и Ω угловые скорости, соответствующие наблюдаемым и стандартным суткам. Относительная безразмерная величина вариации угловой скорости вращения оценивается как $dv/v \approx 10^{-8}$ [Сидоренков, 2002].

В процессе предварительной обработки были выбракованы многочисленные ошибочные и неполные записи данных в обоих каталогах, определены значения v для каталогов LCAT и SCAT, которые стали основой для дальнейшего анализа.

Сопоставление двух временных рядов за общий для обоих каталогов период (рис. 12) показало, что средняя относительная ошибка от усреднения за указанный период не превышает 5%. Затем каталог LCAT был расширен на 32 года за счет добавления значений с 1984 по 2016 г. из каталога SCAT. Добавленные значения получались за счет усреднения ежесуточных наблюдений на каждом полугодовом промежутке (для временного интервала начиная с 1962 г.). Полученный таким

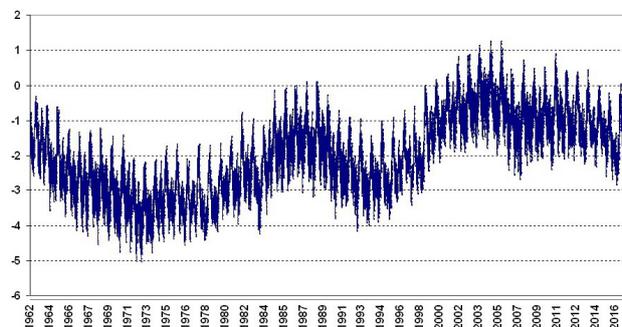


Рис. 13. Изменение относительной угловой скорости вращения Земли v за 1962–2016 гг. по ежесуточным наблюдениям (IERS).

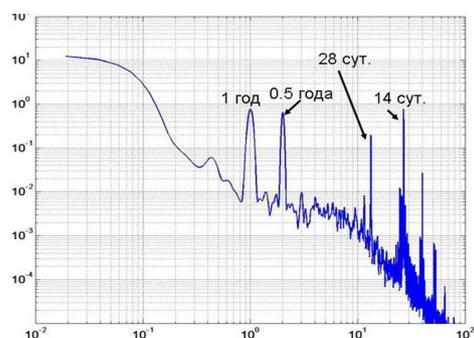


Рис. 15. Спектр для значений v по данным каталога IERS, период 1962–2016 гг. Горизонтальная ось – количество циклов в год. Двойной логарифмический масштаб.

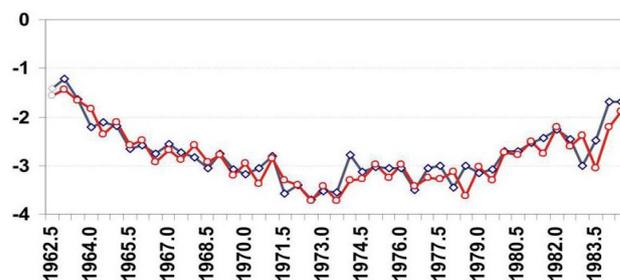


Рис. 12. Два независимых временных ряда для значений v (относительной угловой скорости вращения Земли) за период 1962–1984. Синяя линия – по данным каталога LCAT (1720–1984); красная – усредненные по полугодовым интервалам значения v из каталога SCAT (IERS).

образом JCAT (объединенный каталог) содержит наблюдения за 1720–2016 гг. (296 лет, 592 наблюдения).

Временные ряды наблюдений относительной угловой скорости вращения Земли для каталогов SCAT и JCAT представлены на рис. 13 и 14 соответственно.

Для обоих временных рядов – SCAT и JCAT – были рассчитаны спектры (рис. 15 и 16).

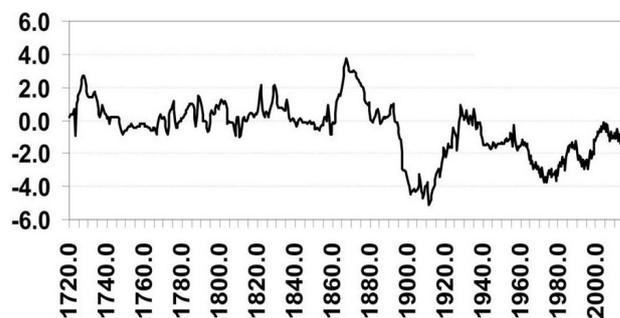


Рис. 14. Изменение относительной угловой скорости вращения Земли v за 1720–2016 гг. по полугодовым наблюдениям (JCAT).

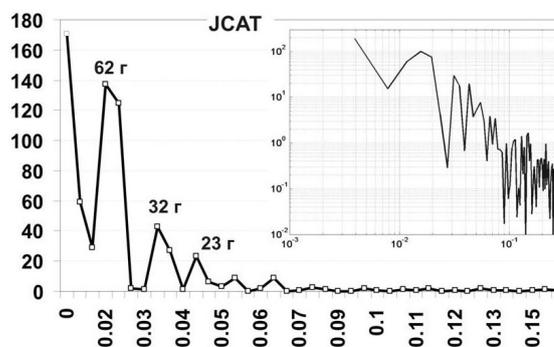


Рис. 16. Спектры для значений v по данным временного ряда JCAT, период 1720–2016 гг.: линейный масштаб (слева) и двойной логарифмический масштаб (на врезке). Горизонтальная ось – количество циклов в год.

Характерные периоды спектра для SCAT: один год, полгода, 28 и около 14 сут. Это широко известные периоды, связанные с орбитальными компонентами движения Земли в системе Земля–Луна–Солнце. Характерные периоды в спектре каталога JCAT: 62, 32 и 23 года. Более короткие периоды на этом наборе данных не дают заметных пиков в спектре.

На рис. 14 для каталога JCAT выделяются длительные интервалы времени (до 10 и более лет), сменявшие друг друга, в которые происходили значительные увеличения значений v (1859–1867 и 1910–1928 гг.) или их уменьшения (1867–1911). Отмечаются длительные интервалы времени, на которых наблюдаются незначительные колебания значений v вокруг некоторого постоянного уровня (1780–1840). Для временного ряда по каталогу SCAT (рис. 13) можно отметить прежде всего колебания значений v в высокочастотном диапазоне (год, полгода, 28 и 14 сут). Длиннопериодные колебания в несколько десятков лет хотя и наблюдаются, но при длительности наблюдений 50 лет корректное выделение этих составляющих спектра не представляется возможным.

На рис. 17 представлены результаты фильтрации данных из каталога SCAT полосовыми фильтрами по трем частотным диапазонам: низкочастотной составляющей v (с периодами от 2,5 до 45 лет), среднечастотной (от 5 до 15 мес) и высокочастотной (от 3 до 24 дней). Согласно спектру, в диапазоне периодов с 2.5 до 45 лет для SCAT нет ярко выраженных частотных пиков (рис. 17а).

В диапазоне колебаний с периодами от 0.5 до 1 года вариации v имеют незначительную разницу по амплитуде годовых колебаний (от $+0.8 \cdot 10^{-8}$ до $-1,2 \cdot 10^{-8}$) (рис. 17б). Эти вариации вызывают стабильную годовую изменчивость относительной угловой скорости вращения Земли с максимальными ежегодными значениями в августе и минимальными в декабре–феврале (рис. 18). Экстремумы могут незначительно сдвигаться от одного года к другому. Но эти внутригодовые вариации значений v обеспечивают внутригодовую изменчивость СА с выраженными максима-

ми в зимние месяцы (в декабре–феврале) как в Южном, так и в Северном полушарии. Однако в рамках данной статьи эти проблемы подробно не рассматриваются. Ранее они частично анализировались в работе [Sasorova, Zhuravlev, 2006].

В диапазоне колебаний с периодами от 3 до 24 дней (рис. 17в), согласно спектру, имеются пики с очень близкими периодами – 14.77 и 14.76 сут – и схожими амплитудами, которые и вызывают ярко выраженные биения. Длительность цикла биения – 18.2 года.

Далее были сформированы промежуточные временные ряды (рис. 19), полученные путем полосовой фильтрации данных объединенного каталога JCAT, по четырем частотным диапазонам. В этих рядах представлены составляющие относительной угловой скорости, связанные со спектральными

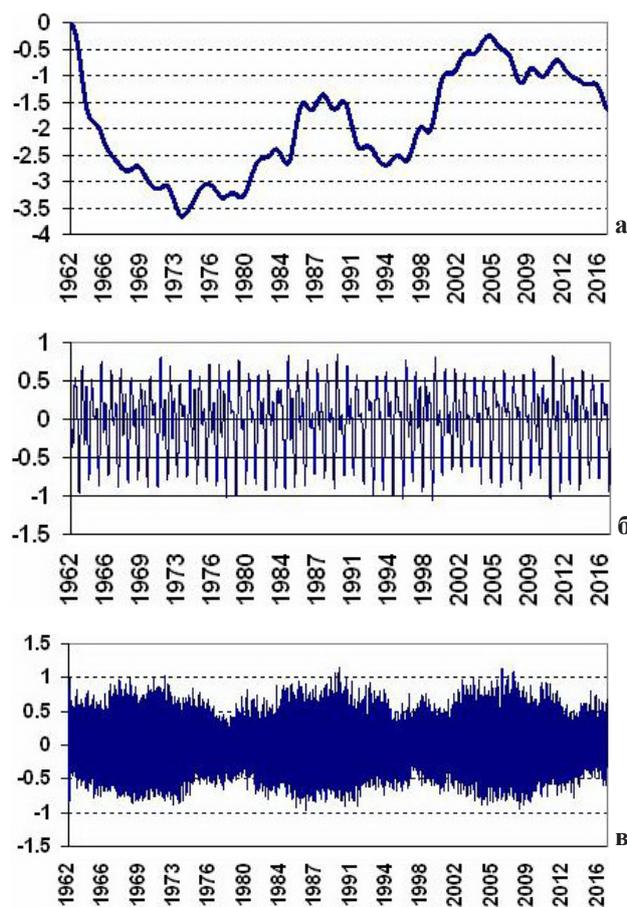


Рис. 17. Фильтрация данных из каталога SCAT полосовыми фильтрами по трем частотным диапазонам: а – низкочастотная составляющая v , периоды с 2,5 до 45 лет, б – среднечастотная, от 0.5 до 1 года, в – высокочастотная, от 3 до 24 сут.

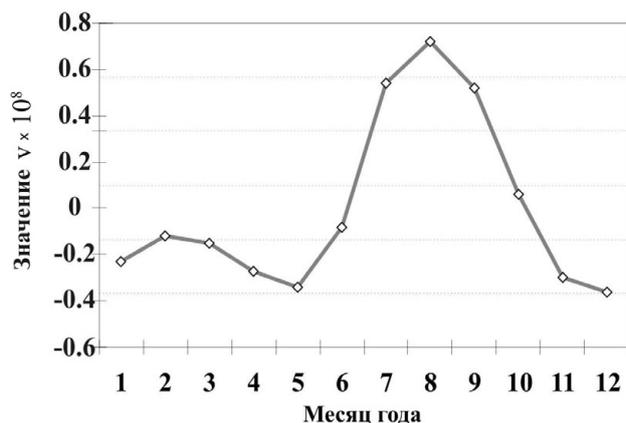


Рис. 18. Внутригодовой ход значений v .

максимумами для каталога JCAT. Границы полосовых фильтров выбирались вокруг пиков спектра. Первый ряд (ПФ1, полосовой фильтр 1) включает периоды от 124 до 45 лет (средний период 62 года), второй (ПФ2) – периоды от 37 до 25 лет (средний 32 года), третий (ПФ3) – от 25 до 19 лет (средний 23 года), ПФ4 – все низкочастотные составляющие спектра (от 124 до 19 лет).

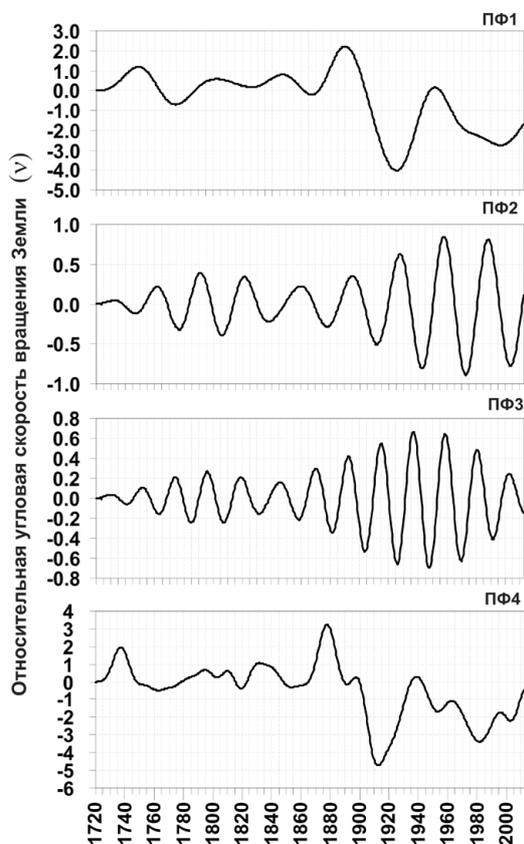


Рис. 19. Временные ряды, полученные в результате полосовой фильтрации значений угловой скорости вращения Земли, по данным JCAT. Пояснения см. в тексте.

Для ПФ1 сначала фиксируется длительный интервал времени (1720–1870) относительно небольших по амплитуде колебаний вокруг нулевого уровня, затем интервал существенной интенсификации колебаний по амплитуде до 1960 г. Наибольшие изменения угловой скорости вращения за весь период наблюдений приходятся именно на этот временной интервал. Далее, после 1970 г., в этом частотном диапазоне отмечаются не столь значительные по амплитуде вариации угловой скорости. Максимальный разброс значений v в этом диапазоне от 2.2 до $4.1 \cdot 10^{-8}$.

Для среднепериодических составляющих (ПФ2 и ПФ3) отмечаются четкие периодические колебания, амплитуда которых с 1720 до 1790 г. постепенно возрастает. Затем до 1860 г. она падает, после чего опять возрастает (причем раскачка по амплитуде значительно сильнее, чем на этапе 1720–1790). Максимальные разбросы значений v в этих диапазонах ± 0.8 и ± 0.66 соответственно.

Наличие явно выраженной периодичности в диапазоне 37–25 лет стимулировало поиск корреляционной связи между периодами возрастания СА и этой составляющей значений v . Однако внимательный анализ динамики усиления и ослабления СА [Левин, Сасорова, 2015б] показал, что продолжительность временного интервала между максимальными значениями плотности сейсмических событий во времени не остается постоянной, хотя периодичность около 30 лет и указывается в ряде источников.

Поэтому далее мы рассматриваем суммарное влияние всех низкочастотных составляющих (ПФ4) на периодичность СА. Временной ряд, полученный в результате этой фильтрации данных объединенного каталога JCAT, приведен на рис 19. Здесь суммируются все низкочастотные составляющие спектра в интервале 124–19 лет (62, 32 и 23 года). Максимальный разброс значений v для этого ряда существенно больше, чем для ПФ2 и ПФ3 (от 3.2 до -4.7), он приходится на сравнительно ограниченный временной период (1865–1932).

3. Сопоставительный анализ временных рядов

Значения относительной угловой скорости вращения Земли (v) с 1720 по 2016 г. (исходные данные после предварительной обработки) представлены на рис. 20а, а на рис. 20б дан временной ряд по низкочастотной составляющей (V_n) за тот же промежуток времени, полученный путем полосовой фильтрации (выделены все периоды более 19 лет). В нижней части рис. 20б приведены величины продолжительности между соседними локальными минимумами V_n (в годах), которые изменяются от 18 до 41 года. Максимальный разброс значений V_n для этого ряда приходится на сравнительно ограниченный временной интервал (1865–1932). На рис. 20б наблюдаются длительные этапы (десяtkи лет) значительного увеличения (1723–1737, 1853–1878, 1914–1939) и уменьшения (1737–1764, 1878–1892, 1898–1914) значений V_n , чередующихся со сравнительно небольшими колебаниями вокруг некоторого среднего уровня.

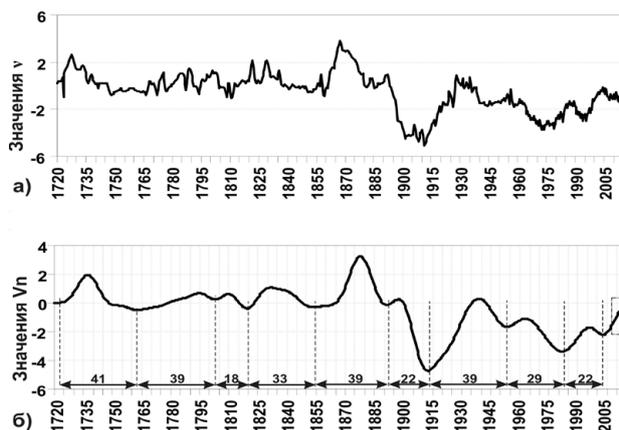


Рис. 20. Относительная угловая скорость вращения Земли v (а) и низкочастотная составляющая V_n (б) с 1720 по 2016 г. Прямоугольником справа отмечена часть временного ряда за последние 9 лет (2008–2016). Штриховая линия внутри прямоугольника – начало нового этапа торможения Земли (середина 2014 г.).

Наибольший размах локальных изменений V_n наблюдался в период с 1878 по 1914 г.

На рис. 21 представлены временные ряды для двух периодов наблюдений: 1720–1890 гг. (доинструментальный период) и 1895–2016 гг. (инструментальные наблюдения). Для

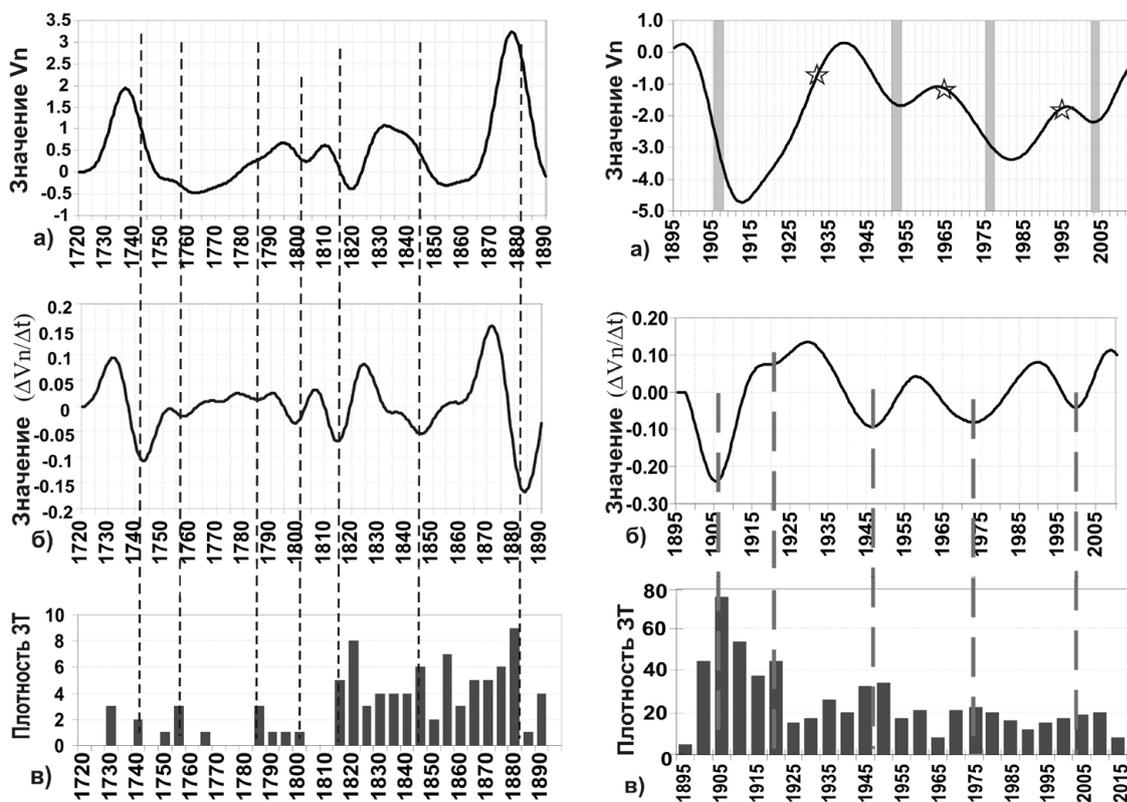


Рис. 21. Сопоставительный анализ для периодов 1720–1890 и 1895–2016 гг. а – значение низкочастотной составляющей угловой скорости V_n ; б – приращение V_n ; в – распределение плотности сильных землетрясений ($M \geq 7.5$) по 5-летним интервалам, вертикальная ось – количество землетрясений в каждом интервале. По горизонтальным осям – верхние границы 5-летних интервалов. Остальные пояснения см. в тексте.

низкочастотной составляющей V_n (рис. 21а) определены приращения угловой скорости (рис. 21б) за промежуток времени Δt . Величина $\Delta V_n / \Delta t$ является некоторой оценкой для ускорения вращения Земли (определяется приращение в промежутке времени Δt , который можно менять). Положительные значения приращений соответствуют стадиям увеличения угловой скорости Земли (разгона), а отрицательные – стадиям уменьшения угловой скорости Земли (торможения). Представлено также распределение плотности сильных ЗТ ($M \geq 7.5$) по 5-летним интервалам (рис. 21в).

Сопоставление временных рядов низкочастотной составляющей (V_n), приращения угловой скорости ($\Delta V_n / \Delta t$) и распределений СА показывает, что максимумы СА соответствуют завершающим этапам стадий уменьшения угловой скорости вращения. Эти промежутки времени (на рис. 21а) помечены серыми столбиками. Промежуткам времени с минимальной СА соответствуют заключительные этапы стадии увеличения угловой скорости (помечены звездочками). Штриховые вертикальные линии соответствуют 5-летним интервалам с максимальной СА. Локальные минимумы приращений угловой скорости $\Delta V_n / \Delta t$ практически совпадают по времени с максимумами СА. То есть максимальное усиление СА происходит на стадии максимального торможения.

Как уже сказано выше, сейсмические события за период 1720–1890 гг. каталогизировались в основном по макросейсмическим данным. Количество сейсмических событий,

представленных в [NEIC/USGS] в интервале с 1720 по 1810 г., мало, но максимумы СА за этот период (см. рис. 21, слева), связаны с катастрофическими ЗТ XVIII и начала XIX в. (Лиссабон, 1755 г., Южная Америка и Мексика, 1784 г.), и они совпадают со стадиями торможения Земли. Начиная с 1810 г. количество зафиксированных событий увеличивается в несколько раз.

Ранее отмечалось [Сасорова и др., 2013; Левин, Сасорова, 2015 а, б] 4-кратное увеличение плотности сейсмических событий в 5-летних интервалах первой четверти XX в. (по сравнению со второй его половиной). Именно этот период (1895–1920) и соответствует длительному и самому значительному торможению (уменьшению значений V_n и $\Delta V_n / \Delta t$) за весь период наблюдений (с 1720 г.).

На рис. 22 представлены двумерные распределения плотности сейсмических событий (правые фрагменты обеих частей рисунка) и вариации значения V_n (левые фрагменты) для двух периодов наблюдений: 1720–1890 и 1895–2015 гг. Справа на обеих частях рисунка расположена шкала плотности сейсмических событий (в градациях серого цвета).

Горизонтальные штриховые линии, пересекающие оба фрагмента рисунков, соответствуют максимумам сейсмической активности.

Анализ рис. 22 также показывает, что каждый этап уменьшения угловой скорости вращения (торможения) сопровождается увеличением плотности сейсмических событий, а этапы увеличения угловой скорости вращения (разгона) сопровождаются уменьшением

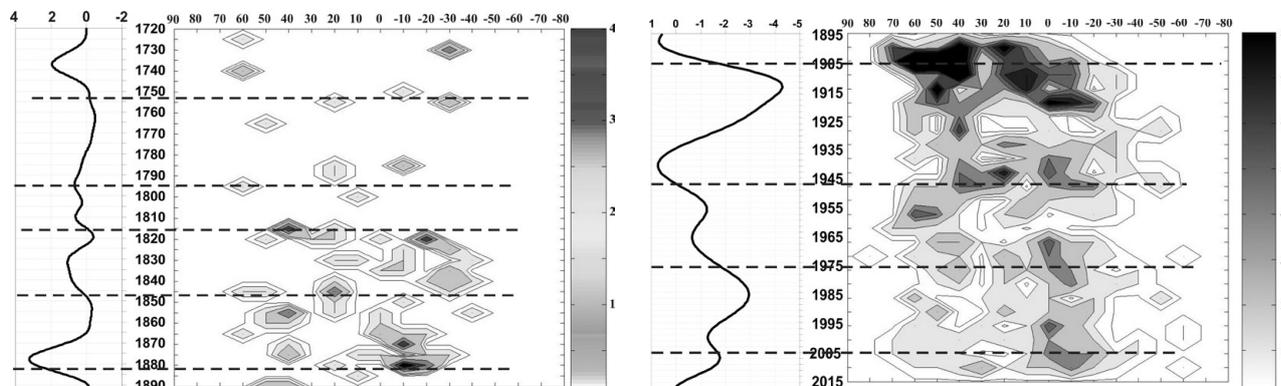


Рис. 22. Сопоставление вариаций низкочастотной составляющей угловой скорости V_n во времени и двумерного распределения плотности сейсмических событий (во времени и в пространстве) за периоды 1720–1890 и 1895–2015 гг. Верхняя горизонтальная ось: на левых фрагментах – значения V_n , на правых – широтные пояса. На временной шкале – верхние границы 5-летних интервалов. Остальные пояснения см. в тексте.

плотности событий. На этапах торможения СА возрастает как в Северном полушарии Земли, так и в Южном. В высоких широтах СА практически отсутствует. Пространственные пики СА в Северном полушарии отмечаются в широтах 70° – 50° N и 50° – 30° N. Самый значительный всплеск СА отмечается в начале XX в. в период 1900–1915 гг. В некоторые временные интервалы (1895–1920) всплески СА происходят практически одновременно как в широтах 70° – 50° N, так и в широтах 50° – 30° N. После 1925 г. на протяжении всего периода наблюдения пики СА в указанных широтах смещены друг относительно друга.

Было проведено дополнительное исследование, когда распределения сильных событий ($M \geq 7.5$) подсчитывались не в 5-летних, а в 3- и 6-летних интервалах. И в этих случаях положение максимумов и минимумов в распределении ЗТ во времени сохранялось.

Начиная со второй половины 2014 г. отмечается уменьшение угловой скорости вращения Земли. Уменьшение значений V_n за этот период можно наблюдать на рис. 20б (участок в правой части рисунка, выделенный прямоугольником). На рис. 23 этот участок временного ряда V_n за последние 9 лет отделен штриховой линией. На этом рисунке с 2005 по 2013 г. наблюдается этап увеличения угловой скорости, далее, с середины 2013 по вторую половину 2014 г., следует этап относительной стабилизации (три полугодовых интервала), а затем со второй половины 2014 г. наблюдается уменьшение угловой скорости вращения.

Таким образом, в настоящее время Земля входит в начальную фазу нового процесса торможения. Согласно нашим результатам, новая

стадия торможения может характеризоваться увеличением СА. Признаки роста СА могут проявляться и на начальной фазе торможения.

По данным NEIC, с 2015 г. отмечается усиление СА. Серия сейсмических событий в Италии (с августа 2016), Новой Зеландии (сентябрь, ноябрь 2016) и Японии (ноябрь 2016) свидетельствует о росте СА. В таблице приведены данные о количестве сейсмических событий в год в указанных регионах за последние 6 лет. В Японии не рассматривались события за 2011 и 2012 гг. (прочерки в таблице), так как в этот период после землетрясения в Тохоку еще наблюдалось значительное количество афтершоков с $M \geq 5$ и $M \geq 6$.

Количество землетрясений в 2008–2016 гг. для трех сейсмоактивных регионов Земли

Год	Италия		Новая Зеландия		Япония	
	$M \geq 5$	$M \geq 6$	$M \geq 5$	$M \geq 6$	$M \geq 5$	$M \geq 6$
2011	2	0	70	4	–	–
2012	8	1	42	1	–	–
2013	3	0	38	4	93	8
2014	11	2	21	3	63	6
2015	3	1	50	3	79	6
2016	14	3	109	8	113	12

Примечание. Координаты регионов:
Италия – 43.74° – 37.42° N, 3.8° – 23.81° E;
Новая Зеландия – 30.84° – 49.84° S, 161.72° – 186.33° E;
Япония – 45.95° – 28.77° N, 128.67° – 148.54° E.

Следует отметить, что пока нет возможности определить, как долго и с какой интенсивностью будет продолжаться наступивший процесс торможения. Будет ли это длительный и крутой скачок угловой скорости, как в 1898–1914 гг., или более короткий период спада значений V_n с незначительными по абсолютной величине значениями приращений ($\Delta V_n / \Delta t$) – в настоящее время неизвестно. Попыток предсказать поведение угловой скорости вращения во времени в научной литературе нами пока не обнаружено, поэтому мы не можем прогнозировать, на какой период времени придется максимум СА. Если в ближайший период скорость вращения Земли (на полугодовых отрезках) будет постоянно уменьшаться, а абсолютное значение приращений V_n увеличиваться, то вероятность повышения СА тоже значительно возрастает.

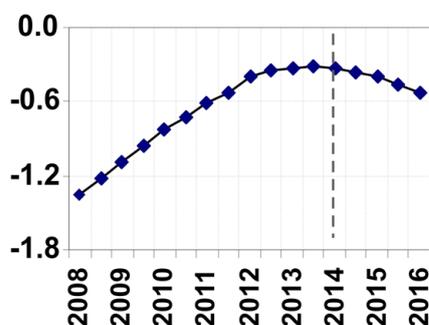


Рис. 23. Вариации низкочастотной составляющей угловой скорости вращения V_n для периода 2008–2016 гг.

4. Обсуждение результатов

Данная работа связана с попыткой найти физические закономерности, связывающие вариации скорости вращения Земли с изменениями в глобальном сейсмическом процессе.

Рассмотрим влияние вариаций величины угловой скорости вращения планеты на общую энергию вращающегося тела, которая описывается как произведение момента инерции (I) на квадрат угловой скорости v . Относительная величина вариаций угловой скорости вращения за год оценивается по наблюдениям [Сидоренков, 2002] как $dv/v \approx 10^{-8}$.

Энергия тела в результате нестабильности вращения должна возрасти в результате прибавления величины угловой скорости и величины момента инерции тела:

$$dE/E = 2dv/v + 1/2dI/I. \quad (1)$$

Оба слагаемых в выражении (1) дают примерно одинаковый вклад, поэтому оценка величины вариации энергии вращающегося тела за счет изменения угловой скорости составит примерно:

$$dE = E dv/v \approx 10^{29} \cdot 10^{-8} = 10^{21} \text{ Дж}. \quad (2)$$

Эта величина по порядку совпадает с величиной ежегодно выделяемой энергии землетрясений на всей Земле.

Попытка оценить изменение кинетической энергии вращения Земли (ΔE), связанное с изменением угловой скорости ее вращения, за некоторый период времени была сделана ранее несколькими авторами. В серии работ А.М. Фридмана с соавторами [Горькавый и др., 1994; Фридман, 2005 и др.] показано, что ΔE на несколько порядков превышает полную энергию землетрясений за тот же период. В работе [Varga et al., 2005] годовая вариация энергии вращения оценивается как $\approx 1.6 \cdot 10^{19}$ Дж.

Таким образом, если существует механизм перекачки энергии с КПД даже менее 1 %, то изменение скорости вращения Земли может служить причиной возникновения землетрясений.

Остается вопрос: как выделенная энергия распределяется в литосфере Земли? Попытке

ответить на этот вопрос посвящены выполненные на теоретическом уровне работы [Левин и др., 2011; Levin et al., 2014]. Пространственно-временное распределение энергии, выделенной от ЗТ для всей Земли [Левин, Сасорова, 2015б], подтверждает цикличность выделения энергии как в пространстве, так и во времени.

Теоретические работы по определению изменений формы поверхности Земли в зависимости от вариаций ее угловой скорости показывают, что фигура Земли сформировалась как сфероид, обладающий сжатием: $\varepsilon = (R-H)/R$, под влиянием гравитационного и центробежного потенциала. Здесь R и H – экваториальный и полярный радиусы планеты [Levin et al., 2014]. При равномерном вращении Земли значения ε , R и H остаются постоянными. Однако при увеличении скорости вращения Земли возрастает степень ее сжатия, площадь поверхности Земли увеличивается, увеличивается ее экваториальный радиус, а полярный радиус уменьшается.

Изменение параметров фигуры Земли при изменении скорости ее вращения приведено на рис. 24, где представлена схема изменения степени сжатия небесного тела и характер изменения экваториального и полярного радиусов при трех значениях угловой скорости ($v_2 > v_1 > v_0$).

Вследствие увеличения степени сжатия планеты может уменьшаться напряжение между литосферными плитами и, соответственно, должна уменьшаться степень СА. При уменьшении скорости вращения, наоборот, степень сжатия уменьшается, умень-

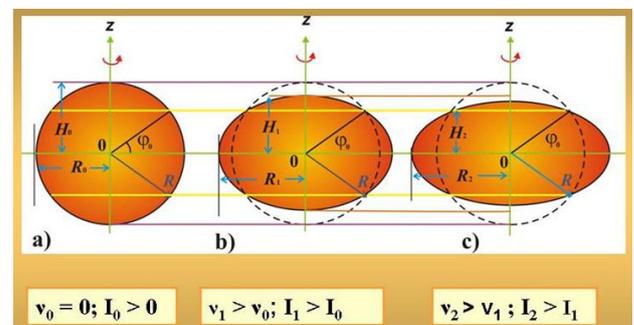


Рис. 24. Схема изменения степени сжатия ε небесного тела, увеличения экваториальных радиусов R и уменьшения полярных радиусов H для трех значений угловой скорости ($v_2 > v_1 > v_0$).

шается площадь поверхности и расстояние между плитовыми структурами, что может вызывать увеличение напряжения сжатия в твердой оболочке планеты. То есть в ответ на изменения скорости вращения возникает пульсация формы Земли при сохранении объема. До настоящего времени эти пульсации определялись в основном на теоретическом уровне.

Заключение

В предлагаемой работе подробно описаны низкочастотные составляющие угловой скорости вращения Земли с периодами выше 19 лет и отмечены среднечастотные составляющие вариаций угловой скорости вращения Земли с периодами один год и полгода. В настоящее время реальными наблюдениями с GPS-станций подтверждаются периодические изменения (с периодом в 1 год) радиус-вектора Земли в местах расположения станций. В работе [Levin et al., 2017] показана корреляция внутригодовой СА с периодическими пульсациями радиус-вектора в пунктах наблюдений. Уже имеются ряды наблюдений на 91 станции с 1999 г. (18 лет), которые подтверждают периодические изменения величины радиус-вектора с периодом в один год. Приходится констатировать, что длительность GPS-наблюдений высокого качества пока еще недостаточно продолжительна для подтверждения эффекта низкочастотной пульсации фигуры Земли (с периодами в несколько лет/несколько десятков лет). Однако этот вопрос представляет интерес как для геофизики в целом, так и для понимания путей обеспечения безопасного развития современного общества. Проведенное исследование способно сформировать новый взгляд на процесс подготовки землетрясения и содействовать пониманию физики сейсмического процесса.

Настоящая работа выполнялась в Институте морской геологии ДВО РАН и в Институте океанологии имени П.П. Ширшова РАН. Авторы статьи благодарят М.В. Родкина и П.О. Завьялова за полезные обсуждения.

Список литературы

1. Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли // Докл. АН. 1994. Т. 338, № 4. С. 525–527.
2. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Динамика сейсмической активности Земли за 120 лет // Докл. АН. 2015а. Т. 461, № 1. С. 82–87. doi:10.7868/S086956521507018X.
3. Левин Б.В., Сасорова Е.В. О связи вариаций скорости вращения Земли и ее сейсмической активности // Докл. АН. 2015б. Т. 464, № 3. С. 351–355. doi:10.7868/S0869565215270183.
4. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Сейсмичность Тихоокеанского региона: выявление глобальных закономерностей. М.: Янус-К, 2012. 308 с.
5. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Доманский А.В. О гидродинамической неустойчивости в средних широтах Земли, обусловленной вращением планеты // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 1. С. 110–113. doi:10.1134/S1028334X11050059.
6. Левин Б.В., Павлов В.П. Влияние астрономических факторов на вариации плотности энергии в твердой оболочке Земли // Изв. РАН. Физика Земли. 2003. № 7. С. 71–76.
7. Левин Б.В., Павлов В.П. Теоретико-полевой метод восстановления тензора напряжений в Земле с подвижным ядром // Теорет. и мат. физика. 2001. Т. 128, № 3. С. 439–445.
8. Лутиков А.И., Рогожин Е.А. Вариации интенсивности глобального сейсмического процесса в течение XX – начале XXI веков // Физика Земли. 2014. № 4. С. 25–42.
9. Сасорова Е.В., Андреева М.Ю., Левин Б.В. Динамика сейсмичности Курильской дуги на основе многомерного статистического анализа // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 75–84. doi:10.1134/S1819714013010077.
10. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука, Физматлит, 2002. 384 с.
11. Фридман А.М., Клименко А.В., Поляченко Е.В., Фридман М.В. О связи глобальной сейсмической активности Земли с особенностями ее вращения // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 67–74.
12. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake, magnitude, intensity, energy and acceleration // Bull. Seism. Soc. Amer. 1942. Vol. 32, N 3. P. 163–191.
13. HTDB/WLD (Historical Tsunami Database for the World Ocean). 2000 BC to Present / Tsunami Laboratory, ICMG SD RAS. Novosibirsk, 2016. URL: <http://tsun.sssc.ru/nh/tsunami.php> (дата обращения: 1.09.2017).
14. Levin B.W., Sasorova E.V., Steblou G.M., Domanski A.V., Prytkov A.S., Tsyba E.N. Variations of the Earth's rotation velocity and cyclic processes in geodynamics // Geodesy and Geodynamics. 2017. Vol. 8. P. 206–212. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.007>.

15. *Levin B., Domanski A., Sasorova E.* Zonal concentration of some geophysical process intensity caused by tides and variations in the Earth's rotation velocity // *Advanc. Geosci.* 2014. Vol. 35. P. 137–144. doi:10.5194/adgeo-35-137-2014.
16. *Ma Li-Hua, Han Yan-Ben, Yin Zhi-Qiang.* Distribution characteristics of global significant earthquakes and possible connection between earthquakes and Earth's variable rotation rate // *Astronom. Res. Technol. / Nat. Astronom. Observ. of China.* 2007. Vol. 4, N 4. P. 406–411.
17. *McCarthy D.D., Babcock A.K.* The length of day since 1656 // *Physics Earth and Planetary Interiors.* 1986. Vol. 44. P. 281–292.
18. *Mogi K.* Earthquake prediction. Tokyo: Acad. Press, 1985. 355 p.
19. *Mogi K.* Global variation of seismic activity // *Tectonophysics.* 1979. Vol. 57. P. 43–50.
20. *Morrison L.V.* Rotation of the Earth from A.D. 1663–1972 and the constancy of G // *Nature.* 1973. Vol. 241. P. 519–520.
21. *Ostřihanský L.* Earth's rotation variations and earthquakes 2010–2011 // *Solid Earth.* 2012a. Preprint. <https://doi.org/10.5194/sed-4-33-2012>.
22. *Ostřihanský L.* Earthquake triggering, Earth's rotation variations, Meton's cycle and torques acting on the Earth // *EGU General Assembly 2012.* Vienna, Austria. 2012b.
23. *Ostřihanský L.* Lithospheric resonances of the Earth's rotation // *EGU General Assembly 2010, 2–7 May.* Vienna, Austria, 2010. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010EGUGA.12.1715O>.
24. *Riguzzi F., Panza G., Varga P., Doglioni .C.* Can Earth's rotation and tidal despinning drive plate tectonics? // *Tectonophysics.* 2010. Vol. 484. P. 60–73.
25. *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 // *Earthquake Prediction / Ed. S. Mukherjee.* Brill. Leiden-Boston, 2006. P. 9–20.
26. *Trofimenko S.V., Grib N.N., Nikitin V.M.* Seismic activity cycles and geophysical earthquake precursor field's variations // *Intern. J. Appl. Fundam. Res.* 2011. N 1. P. 44–50. URL: www.science-sd.com/387-23468 (дата обращения: 1.09.2017).
27. *Varga P., Gambis D., Bus Z., Bizouard Ch.* The relationship between the global seismicity and the rotation of the Earth // *Journées 2004 – systèmes de référence spatio-temporels. Fundamental astronomy: new concepts and models for high accuracy observations.* Paris: Observatoire de Paris, 2005. P. 115–120. URL: <https://syrtel.obspm.fr/journees2004/pdf/Varga.pdf> (дата обращения: 1.09.2017).
28. *Wenlong Liu, Yucheng Liu.* Trend prediction of seismicity in lower reaches of Yangtze River – Yellow Sea (Y-Y) Seismic Belt in 2011–2020 // *Geosciences.* 2012. Vol. 2, N 3. P. 39–50. doi:10.5923/j.geo.20120203.02.

Сведения об авторах

ЛЕВИН Борис Вульфович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск; Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
САСОРОВА Елена Васильевна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИО РАН, Москва