

Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности

© И.П. Шестопалов*, Е.П. Харин**, 2006

* Научно-исследовательский испытательный центр радиационной безопасности космических объектов Минздрава РФ, Москва, Россия

** Геофизический Центр РАН, Москва, Россия

Поступила 1 февраля 2004 г.

Представлено членом регколлегии Б. Г. Пустовитенко

Проанализовано дані щодо сейсмічної енергії, яка виділилася із осередків землетрусів на земному шарі за період з 1680 по 2002 р., у співставленні з циклами сонячної активності та геомагнітними збуреннями. В основі досліджень лежить уявлення про сейсмічність як частини єдиного фізичного процесу в системі «Сонце — Земля». При цьому сейсмічні явища визначаються процесами як земного, так і сонячного походження. Існують 11-річні цикли сейсмічної активності на Землі. Виділено також циклічні зміни геомагнітної та сейсмічної активності з тривалістю у три сонячні цикли і вікові. Кореляція між сонячною та сейсмічною активністю переважно від'ємна, під впливом потужних сонячних протонних подій або інших поки невідомих причин кореляція між ними може бути додатною. Найсильніші землетруси відбуваються на початку вікового циклу. В 1990-х роках настав новий віковий цикл, на початку якого, протягом декількох десятків років, відзначатиметься сильна сейсмічна активність. Землетруси 26.12.2004 р. з $M=9$ і 21.03.2005 р. з $M=8,5$ у районі Індонезії підтверджують цей висновок.

The data on seismic energy liberated from the earthquakes foci all over the globe during the period since 1680 up to 2002 have been analyzed in comparison with solar activity cycles and geomagnetic disturbances. The base of the study comprises the notion of seismic activity as a part of united physical process in the system Sun — Earth. In this case seismic phenomena are determined by the processes of both terrestrial and solar origin. There are 11-year cycles of seismic activity on the Earth. Cyclic changes of geomagnetic activity with duration of three solar cycles and secular ones have also been identified. Correlation between solar and seismic activity is prevailing negative, under the action of strong solar proton events or other yet unknown reasons this correlation can be positive. The strongest earthquakes take place at the beginning of secular cycle. In the 1990-ies of the last century new secular cycle began with expected strong seismic activity at the beginning during several tens of years. The earthquakes on 26.12.2004 with $M=9$ and on 21.03.2005 with $M=8,5$ in the region of Indonesia confirm this conclusion.

1. Введение. Известно, что изменение уровня солнечной активности вызывает цепочку взаимосвязанных явлений в межпланетном пространстве, магнитосфере, ионосфере, нейтральной атмосфере, биосфере [1 — 17]. Влияние солнечной активности на живую и неживую природу Земли можно схематически представить следующим образом: возмущение на Солнце (мощная вспышка) — межпланетной среды (увеличение концентрации и скорости солнечного ветра, изменение парамет-

ров магнитного поля) — магнитосферы и плазмосферы (магнитная буря) — изменения потоков космических лучей в окрестности Земли и на Земле, характера циркуляции в атмосфере, приводящие к изменениям погоды и других природных явлений, напряженности и спектра электромагнитных полей на поверхности Земли — сдвиги в физиологических показателях организма.

Очевидно, что сейсмическая активность на Земле зависит, главным образом, от геодина-

мических процессов в коре и физико-химических — в мантии. Однако существует и корреляция сейсмической активности с солнечной, проявляющейся в солнечных вспышках и геомагнитных возмущениях. В связи с этим на Земле и в ее окрестностях могут активизироваться процессы, присущие самой Земле. Например, после некоторых геоэффективных геомагнитных бурь возможно перераспределение электрических токов внутри Земли, что может приводить к изменению уровня сейсмической активности.

Анализ публикаций, посвященных взаимосвязи солнечной активности с сейсмичностью Земли, показывает ее непростой характер. В зависимости от качества и полноты используемых каталогов и длительности рядов наблюдений результаты исследований и диапазоны выводов весьма широк — от утверждений о существовании прямой корреляции между энергией землетрясений с числами Вольфа до обнаружения антикорреляции между ними [18 — 24]. Поэтому цель данного исследования — попытка составить наиболее однородный каталог землетрясений за определенный интервал (с учетом различных методик обработки, сетей, технических возможностей регистрации и т. д.) и оценка взаимосвязи глобальной энергии землетрясений с солнечной активностью.

В основе этих исследований лежат следующие положения [25 — 29]:

а) Солнце, межпланетная среда, магнитосфера, ионосфера, атмосфера Земли, другие геосферы и сама Земля с происходящими в ней процессами, приводящими к землетрясениям, представляют собой единую физическую систему, т. е. сейсмические явления — часть единого физического процесса в системе «Солнце — Земля»;

б) процессы в системе «Солнце — Земля» взаимосвязаны, от состояния каждого из составляющих этой системы зависят физические, биологические и другие процессы;

в) сейсмические явления определяются процессами как земного, так и солнечного происхождения.

2. Одиннадцатилетние циклы солнечной активности и сейсмичность Земли. Проанализируем данные о сейсмической энергии, выделившейся из очагов землетрясений на всем Земном шаре за период с 1900 по 2002 г., в сопоставлении с циклами солнечной активности и геомагнитными возмущениями. Для данной работы создан каталог землетрясений

с магнитудами $M_s \geq 6$ и $m_b \geq 5,5$, в котором использовались базы данных Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC, USGS) [30] и Международного сейсмологического центра (ISC) [31].

При составлении настоящего каталога использовался также каталог Роте сильных землетрясений Земного шара с 1953 по 1965 г. [32] и каталог Голубевой сильных землетрясений Земного шара с 1953 по 1967 г. с $M \geq 6$ [33].

С течением времени методика определения магнитуд землетрясений развивалась, поэтому в различные базы данных входят определяемые различными методами землетрясения, шкалы которых не всегда сопоставимы друг с другом. Этот фактор учитывался при составлении настоящего каталога. До 1962 г. в каталоге приведены данные по поверхностным волнам. С 1963 г. NEIC, USGS начал систематически определять магнитуды по объемным волнам, и с этого времени каталог включает данные по поверхностным M_s и объемным m_b волнам.

Энергия землетрясений вычислялась по формуле $\lg E = 11,8 + 1,5 M_s$ для землетрясений, эпицентры которых находятся на глубине меньше 100 км, и по формуле $\lg E = 5,8 + 2,4 m_b$ — для глубин больше 100 км (размерность E в эрг).

На рис. 1 представлены среднегодовые значения чисел Вольфа (R) [34] и ежегодные выделения сейсмической энергии E в землетрясениях на всем Земном шаре за период с 1900 по 2002 г. (рис. 1, а) и те же данные, сглаженные по пяти значениям (рис. 1, б). Как видим, в некоторых случаях максимальное энерговыделение в землетрясениях наблюдалось во время минимума солнечной активности или в периоды, близкие к минимуму (это происходило в 1912, 1923, 1933, 1944, 1964, 1975—1976, 1985—1986, 1995—1996 гг.), и наоборот, в максимумы солнечной активности сейсмичность Земли принимала наименьшие значения. Следовательно, за исследуемый период зафиксировано достаточное количество событий, в которых за 11-летние циклы сейсмическая активность Земли имела отрицательную корреляцию с циклами солнечной активности. Но так происходило не всегда. В некоторых событиях возрастания сейсмической активности наблюдались на протяжении всего цикла и, как будет показано далее, после крупных солнечных вспышек, в которых генерируются протоны высоких энергий.

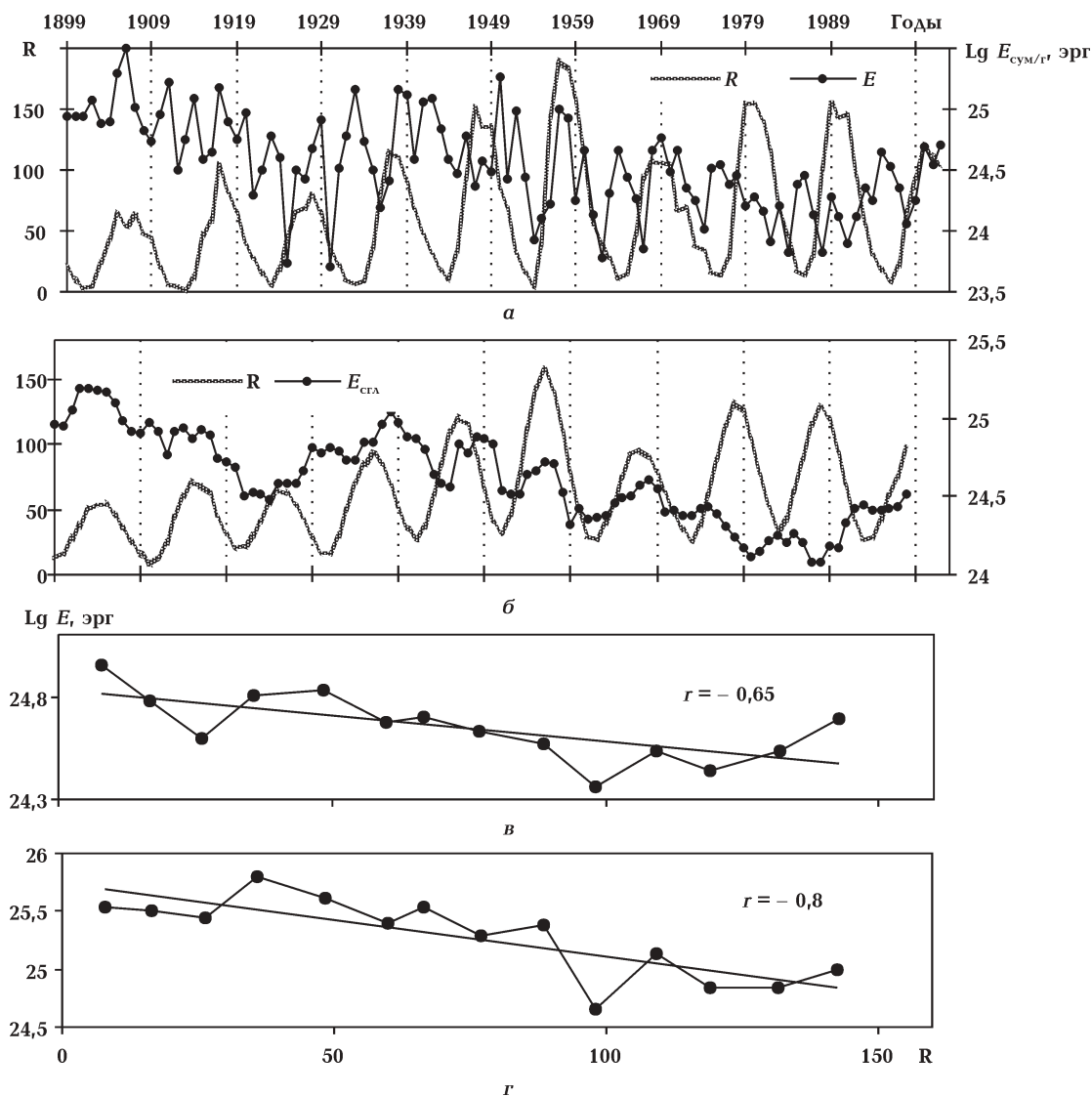


Рис. 1. Среднегодовые значения чисел Вольфа и ежегодные выделения сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре за период с 1900 по 2002 г. (а) и сглаженные по пяти значениям (б), а также зависимость средних (в) и суммированных (г) сглаженных значений энерговыделений в землетрясениях от чисел Вольфа.

На этом же рисунке представлена зависимость сглаженных значений энерговыделений в землетрясениях от чисел Вольфа за весь рассмотренный период. При исследовании этой зависимости использовались сглаженные по пяти значениям ежегодные выделения сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре и сглаженные таким же образом среднегодовые значения чисел Вольфа. При обработке данных значения энерговыделений в землетрясениях как суммировались, так и усреднялись по нескольким значениям чисел Вольфа. Во всех этих случаях наблюдалась отрицательная корреляция между ними. На рис. 1, в, г представлены данные, в кото-

рых значения энерговыделений в землетрясениях суммировались и усреднялись по 10 значениям чисел Вольфа. Коэффициент корреляции (r) между ними при усреднении значений составил $-0,65$ (см. рис. 1, в), при суммировании он равен $-0,8$ (см. рис. 1, г).

При исследовании зависимости энерговыделений в землетрясениях от чисел Вольфа использовались также месячные данные (среднемесячные значения чисел Вольфа и суммарные значения энерговыделений в землетрясениях за один месяц) как за весь исследуемый период (1900—2002 гг.), так и за отдельные временные отрезки. При обработке данных, как и в предыдущем случае, значе-

ния энерговыделений в землетрясениях за месяц суммировались и усреднялись по нескольким значениям чисел Вольфа. Во всех этих случаях наблюдалась отрицательная корреляция между ними.

Значения энерговыделений в землетрясениях суммировались (рис. 2, а и в) и усреднялись (рис. 2, б и г) по 10 значениям чисел Вольфа. Коэффициент корреляции между ними за весь исследуемый период (1901—2002 гг.) равен примерно $-0,9$ при суммировании и $-0,64$ при усреднении. За интервал 1962—2002 гг. соответственно $-0,7$ и $-0,54$. Необходимо отметить, несмотря на то, что во всех этих случаях наблюдалась отрицательная корреляция между ними, коэффициент корреляции при суммировании был во всех случаях значительно выше, чем при усреднении. Авторы считают, что при суммировании сейсмической энергии получена зависимость энерговыделений наиболее крупных землетрясений от солнечной активности, при усреднении такая зависимость получена для средних землетрясений. Отсюда вывод: наиболее крупные землетрясения про-

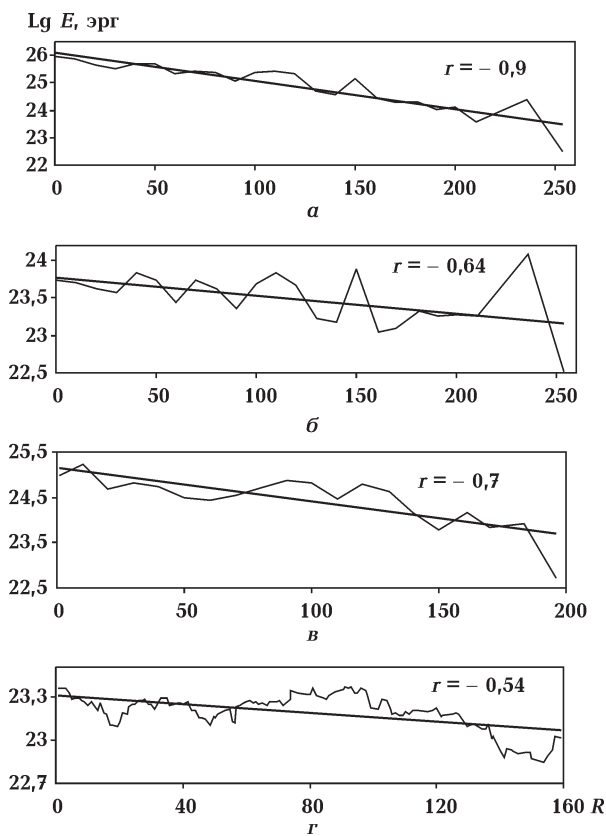


Рис. 2. Зависимость энерговыделений в землетрясениях от чисел Вольфа (месячные данные) за 1991—2002 гг. (а, б), 1962—2002 гг. (в, г).

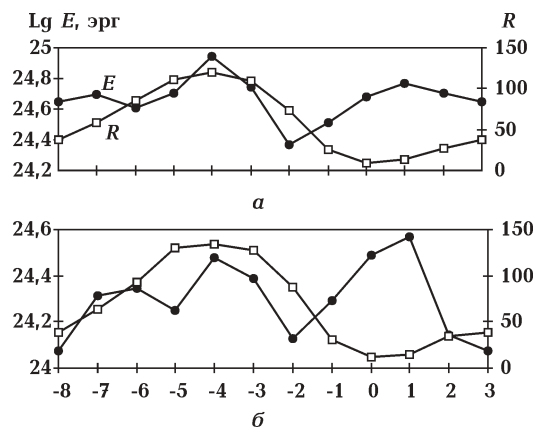


Рис. 3. Временные изменения солнечной активности, определяемой по пятнообразованию и сейсмической активности Земли по годовому энерговыделению за 11 лет, полученные методом наложения эпох за период 1900—2000 г. (а) и 1962—1998 (б).

исходят чаще вблизи минимума солнечной активности, средние наблюдаются как вблизи минимума, так и на протяжении всего солнечного цикла, но все же вблизи минимума солнечной активности их регистрируется больше.

Связь между солнечной активностью и сейсмичностью Земли исследовалась также с помощью метода наложения эпох. На рис. 3 приведены временные изменения солнечной активности и сейсмичности Земли за 11 лет, полученные методом наложения эпох за весь исследуемый период. Как и в предыдущем случае, использовались месячные данные. На оси абсцисс отложены годы 11-летнего цикла, нулевая отметка на шкале совпадает с минимумом солнечной активности и максимумом сейсмической активности Земли. Из рис. 3, б видно, в течение 11-летнего периода существует три максимума энерговыделения. Первый, наиболее сильный, приходится на годы минимума солнечной активности, два других — на фазы роста и спада солнечной активности соответственно.

Таким образом, во временной зависимости годовых значений энерговыделений при землетрясениях существуют 11-летние периоды. Это вывод не противоречит результатам анализа периодичности сейсмичности Земли других ученых [35, 36].

3. Геомагнитная активность и сейсмичность Земли. Наиболее представимым индексом геомагнитной активности является A_p -индекс — планетарная среднесуточная эквива-

лентная амплитуда возмущения магнитного поля Земли, определяемая по специальной сети среднеширотных обсерваторий. Он стал рассчитываться с 1932 г., поэтому для наших исследований использовался *aa*-индекс — среднесуточная эквивалентная амплитуда, определяемая по двум антиподальным обсерваториям (Гринвич и Мельбурн) с 1867 г.

На рис. 4 представлены сглаженные по пяти значениям среднегодовые числа Вольфа и значения *aa*-индекса (рис. 4, а, б), а также ежегодные выделения сейсмической энергии

в землетрясениях на всем Земном шаре за период с 1899 по 2002 г. (рис. 4, в, г). Как видим, на протяжении указанного периода происходит увеличение значений *aa*-индекса и чисел Вольфа. При этом на фоне непрерывного повышения геомагнитной активности наблюдаются циклические 11-летние изменения *aa*-индекса, обусловленные солнечной активностью (см. рис. 4, а). Сейсмическая активность на протяжении всего этого времени понижается (см. рис. 4, б). Следовательно, на протяжении указанного периода

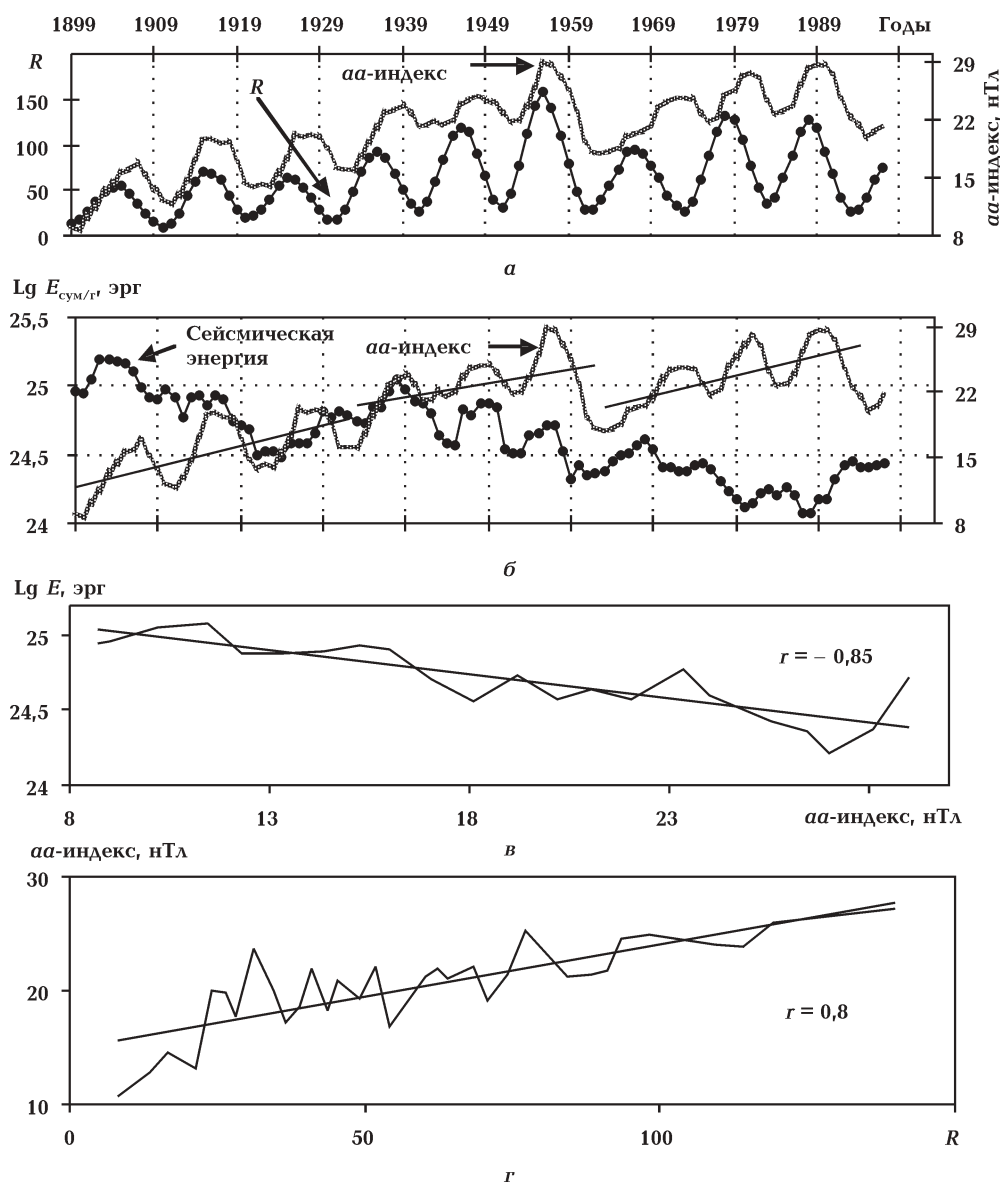


Рис. 4. Сглаженные среднегодовые значения *aa*-индекса и чисел Вольфа (а); эти же значения *aa*-индекса и сглаженные ежегодные выделения сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре (б); зависимость энерговыделений в землетрясениях от *aa*-индекса (в) и *aa*-индекса от чисел Вольфа (г).

наблюдается отрицательная корреляция aa -индекса с сейсмической активностью $r = -0,8$ (см. рис. 4, в) и положительная с числами Вольфа $r = 0,8$ (см. рис. 4, г).

За этот период также можно выделить циклические изменения геомагнитной и сейсмической активности большей длительности. На кривой (см. рис. 4, б), показывающей изменения сейсмической активности в 1900—2000 гг., видны три волны (интервала), длительность каждой из которых равна трем циклам солнечной активности. Минимальные значения первого периода наблюдались в 1921—1924 гг., второго — в 1958—1961 гг., третьего — в 1982—1988 гг. Геомагнитная активность испытывала аналогичные изменения. На рис. 4, б видно, что наклон линий трендов для каждого из трех периодов разный. Таким образом, первый период наблюдался с 1889 по 1931 г., второй — с 1932 по 1961 г., третий — с 1962 по 1992 г.

В чем же причина одновременного изменения характера сейсмической и геомагнитной активности?

Самое мощное из всех проявлений солнечной активности — это вспышка на Солнце [3, 4, 9 — 11]. Энергия крупной солнечной вспышки достигает приблизительно 10^{32} — 10^{33} эрг.

Основная часть этой энергии выделяется в виде выброса плазмы, движущейся в короне и межпланетном пространстве со скоростями до 1000 км/с, и потоков частиц (в основном протонов), ускоренных до больших энергий (иногда до десятков ГэВ), которые регистрируются в межпланетном пространстве и на поверхности Земли. Солнечные протонные события начали регистрировать с 1942 г. с помощью ионизационных камер. Для регистрации космического излучения и потоков протонов, генерируемых во время крупных вспышек, в 50-х годах XX в. на поверхности Земли появилась сеть нейтронных мониторов. Эти приборы с высокой эффективностью также регистрируют нейтроны в широком диапазоне энергий. Наибольшие протонные события за все время их регистрации наблюдались в 1949, 1956, 1960 и 1989 гг., причем событие 26 февраля 1956 г. было самым крупным, его амплитуда составляла около 5000 % [11]. В таблице солнечные протонные события расположены по убыванию их амплитуд.

На рис. 5 представлены вспышечные возрастания потоков протонов высокой энергии с амплитудой более 100 %, зарегистрированные на Земле нейтронными мониторами и

Но-мер	Дата	Нейтрон-ный мо-нитор, %	Иониза-ционная камера, %
1	23.02.1956	4554	300
2	19.11.1949	563	41
3	29.09.1989	373	—
4	25.07.1946	—	20
5	28.02.1942	—	15
6	07.03.1942	—	14
7	15.11.1960	290	—

ионизационными камерами [9 — 11, 34]. Как видим, вспышки в 1956 и 1960 г. происходили на границе 2-го и 3-го интервалов, а в 1989 г. — в конце 3-го. Таким образом, крупные солнечные вспышки, в которых генерируются значительные потоки протонов высокой энергии, оказывают влияние на внутриземные процессы, т. е. под влиянием этих вспышек происходит изменение энергетических процессов внутри Земли. На рис. 5, б приведена глубина эпицентров землетрясений с усреднением за три года с магнитудой $M \geq 6$ и 6,4, на рис. 5, в — с усреднением за три месяца с магнитудой $M \geq 6,4$. Согласно рис. 5, глубина их значительно уменьшилась после вспышек 1956 и 1960 г. Затем наблюдались отдельные кратковременные возрастания до 1989 г., а после вспышек 1989 г. происходит систематическое увеличение глубины эпицентров землетрясений.

Однако при этом следует отметить, что в 1962—1964 гг. начала работать новая сеть сейсмостанций, количество их увеличилось, изменилась регистрирующая аппаратура и появилась новая методика обработки данных. Это факт нельзя не учитывать при анализе данных.

Таким образом, под влиянием крупных солнечных вспышек происходит переход энергетических процессов внутри Земли из одного состояния в другое, которое может сохраняться на протяжении приблизительно трех солнечных циклов до следующих крупных вспышек. Этот уровень сейсмической активности Земли определяет значение энерговыделений при землетрясениях за весь этот период.

4. О нейтронах земного происхождения.

Ряд экспериментальных наблюдений, свидетельствует о том, что сейсмическая активность

Земли может быть источником тепловых нейтронов. В исследованиях, проводившихся на спутниках и одновременно на Земле, авторы обнаружили, что амплитуда Форбуш-понижений, регистрируемая нейтронными мониторами на Земле во время возмущений в межпланетной среде, определяется не только процессами на Солнце, но и внутриземными про-

цессами во время землетрясений [17, 25 — 27]. Таким образом, нейтронные мониторы на Земле регистрируют частицы и космического, солнечного, и земного происхождения. Вывод о нейтронах земного происхождения подтверждается и в других работах [37 — 39].

В Японии проводилось изучение временных вариаций потоков тепловых нейтронов в

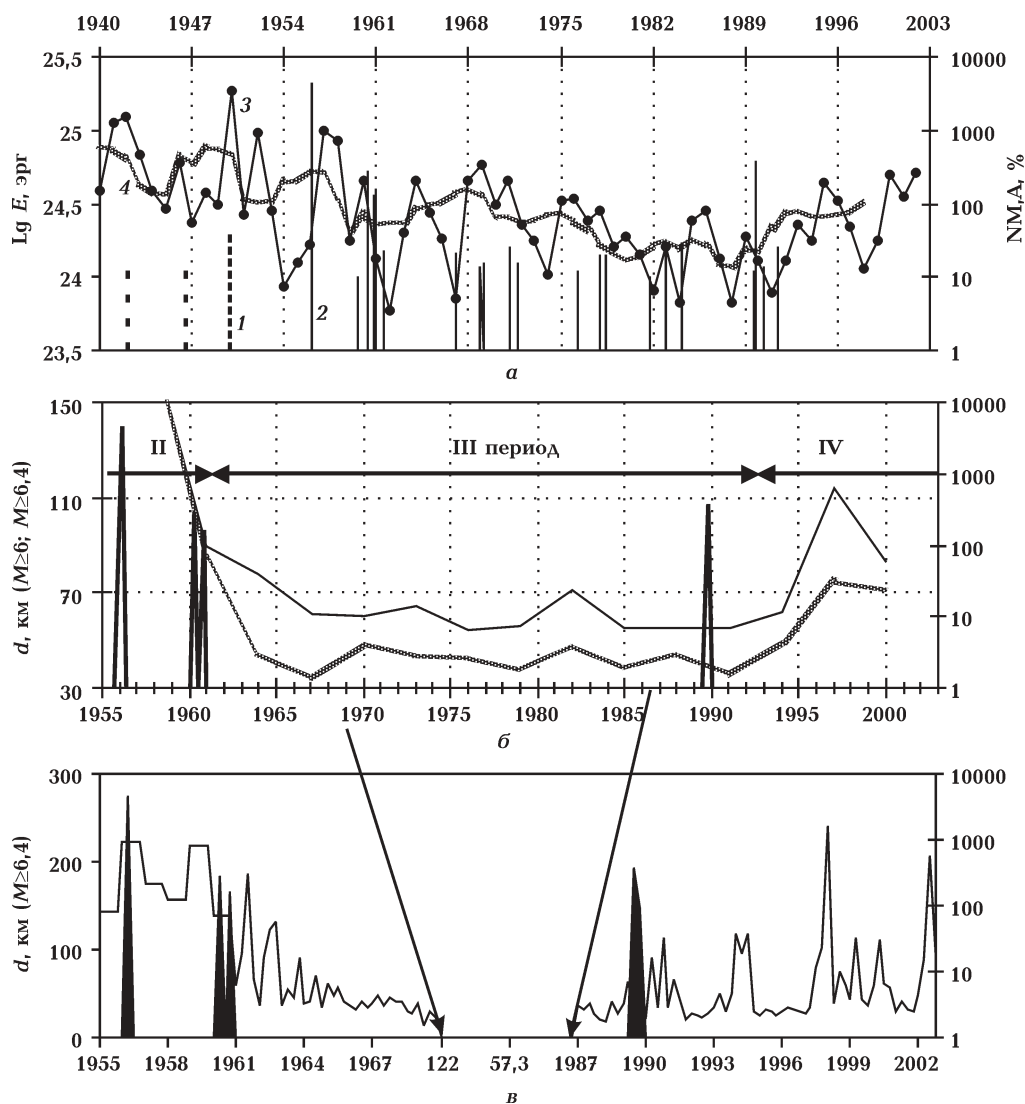


Рис. 5. Вспышечные возрастания потоков протонов высокой энергии (а), зарегистрированные на Земле ионизационными камерами (1) и нейтронными мониторами в 1942—1992 г. (2) (вертикальные прямые, шкала справа), ежегодные выделения сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре (3) и сглаженные по пяти значениям за период с 1940 по 2002 г. (4); глубина эпицентров землетрясений с усреднением за три года с магнитудой $M \geq 6,4$ (нижняя кривая), $M \geq 6$ (верхняя кривая) за период 1955—2002 гг. и вспышечные возрастания потоков протонов высокой энергии, зарегистрированные на Земле нейтронными мониторами на границах третьего периода (вертикальные прямые) (б); глубина эпицентров землетрясений с усреднением за три месяца с магнитудой $M \geq 6,4$ и вспышечные возрастания потоков протонов высокой энергии (зачерненные области), зарегистрированные на Земле нейтронными мониторами за 1955—1969 и 1987—2002 гг., т. е. на границах третьего периода (в).

сейсмоактивной зоне [37]. В этой работе показано, что перед землетрясениями и вулканическими извержениями происходит возрастание потоков нейтронов в несколько раз по сравнению с контрольными измерениями, проводимыми в относительно сейсмически спокойной области.

В исследованиях, проводившихся в течение ряда лет на шарах-зондах в атмосфере Земли, была обнаружена анизотропия потоков тепловых нейтронов [38]. Оказалось, что на высотах вплоть до 3—5 км поток нейтронов, направленный от Земли, существенно превышал поток к Земле (среднее значение анизотропии для этих высот составляло $0,6 \pm 0,2$). При этом наблюдалась очень слабая высотная зависимость потоков нейтронов. На больших высотах вплоть до 10—15 км анизотропия сохранялась, хотя и с меньшими значениями. Очевидно, поток тепловых нейтронов, направленных вверх, может содержать не только вторичные нейтроны атмосферного происхождения, но и тепловые нейтроны земного происхождения. Эти факты указывают на то, что вблизи земной коры существует поле тепловых нейтронов, величина которого определяется сейсмической активностью Земли.

В настоящей статье продолжена работа по изучению нейтронов земного происхождения с помощью мировой сети нейтронных мониторов, которые с высокой эффективностью регистрируют нейтроны в широком диапазоне энергий. Известно, что вариации космических лучей обусловлены 11-летними циклами солнечной активности.

Из рис. 6, а, б видно, что минимальные значения показаний нейтронного монитора Climax наблюдаются во время максимума солнечной активности, а максимальные — чаще всего во время минимума и, следовательно, когда сейсмическая активность принимает максимальные значения. Коэффициент корреляции между сейсмической энергией землетрясений и данными нейтронного монитора составляет приблизительно 0,8. Этот результат служит дополнительным подтверждением тому, что в показаниях сети наземных нейтронных мониторов существенный вклад вносят нейтроны земного происхождения.

5. Вековые циклы солнечной активности и сейсмичности Земли. Проанализируем данные о сейсмической энергии, выделившейся из очагов землетрясений на всем Земном шаре за период с 1680 по 2002 г., в сопоставлении с циклами солнечной активности и геомаг-

нитными возмущениями. Для этого используем среднегодовые значения чисел Вольфа и *aa*-индекса, сглаженные по 11 значениям. Для каталога землетрясений с 1690 по 1900 г. была использована база данных NEIC, USGS [<http://neic.usgs.gov>], для периода с 1900 г. — каталог землетрясений, описанный в первом параграфе. Для периода с 1680 по 1900 г. энергия землетрясений вычислялась по формуле: $\lg E = 11,8 + 1,5 Ms$.

В третьем параграфе были проанализированы данные о сейсмической энергии, выделившейся из очагов землетрясений на всем Земном шаре за период с 1900 по 2002 г. в сопоставлении с циклами солнечной активности. В частности, там было показано, что сейсмическая активность на протяжении всего этого времени понижалась, а солнечная — возрастала. Это указывает на существование вековых циклов солнечной активности и сейсмичности Земли.

По мере развития векового цикла, в котором постепенно увеличивается солнечная активность, корреляция между солнечной и сейсмической активностью — отрицательная. Другими словами, наибольшая сейсмическая активность прослеживается при небольшой солнечной активности, и наоборот. Также было показано, что под влиянием мощных солнечных протонных событий корреляция между ними может быть положительной, а столетний цикл солнечной и сейсмической активности разбивается на три периода примерно по 33 года, длительность каждого, в свою очередь, составляет три 11-летних цикла солнечной активности.

Для подтверждения вывода о вековых циклах солнечной и сейсмической активности рассмотрим их вариации с 1690 г. (рис. 7). Данные за этот период были не систематическими, в некоторых случаях они отсутствовали на протяжении нескольких лет. Для получения однородного ряда данные о сейсмической энергии за весь исследуемый период суммировались по 7 годам и сглаживались по трем значениям, среднегодовые числа Вольфа — по 11 значениям.

Из рис. 7, а видно, что в начале XVIII, XIX и XX вв. значения чисел Вольфа были минимальны. Во всех этих трех случаях прослеживалось возрастание солнечной активности почти на протяжении 100 лет и в конце каждого века происходил ее резкий спад. Из этого следует, что за период с 1690 по 2002 г. наблюдалось три вековых цикла солнечной

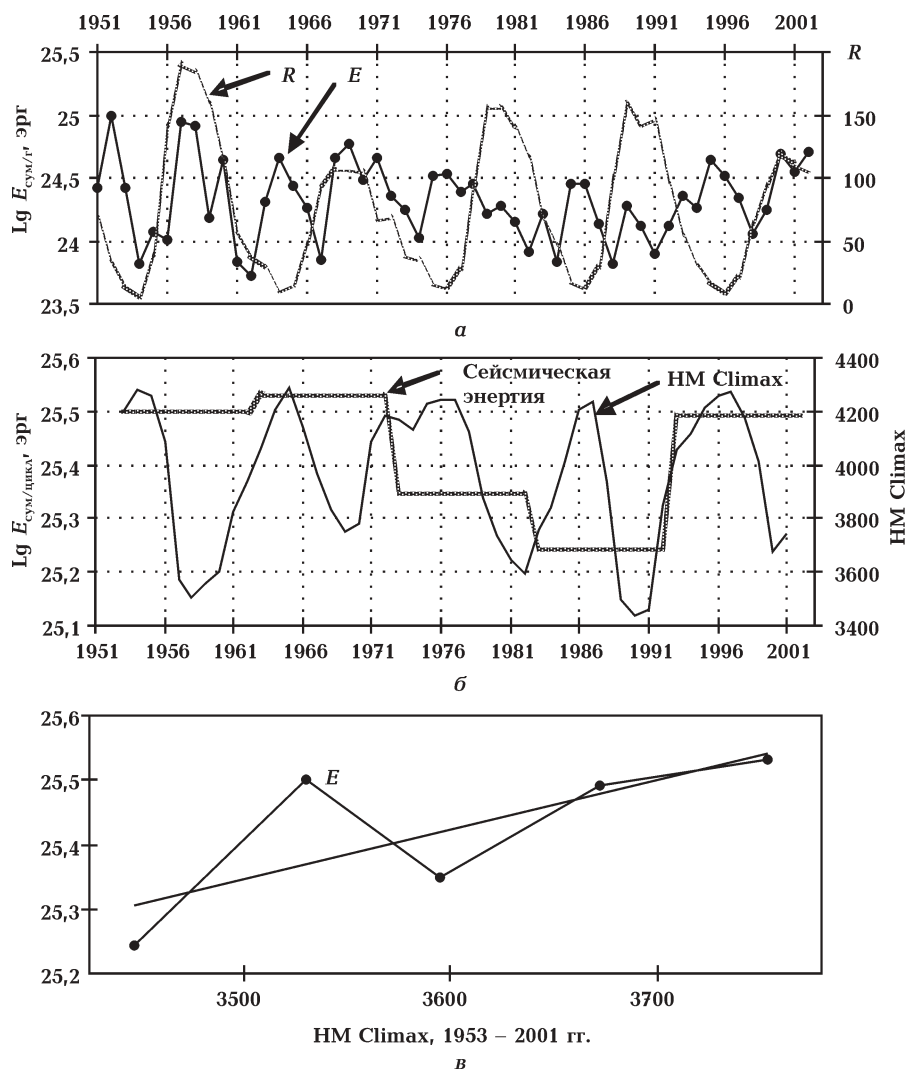


Рис. 6. Среднегодовые значения чисел Вольфа и ежегодные выделения сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре за период с 1951 по 2002 г. (а); среднегодовые значения показаний нейтронного монитора Climax и суммарные значения сейсмической энергии за цикл (11 лет) (б); зависимость энерговыделений в землетрясениях за цикл от минимальных значений показаний нейтронного монитора (в).

активности, в начале каждого из которых сейсмическая активность принимала максимальное значение. Затем на фазе ее спада отдельные возрастания имели положительную корреляцию с солнечной активностью.

Нетрудно заметить, что третий вековой цикл начался в конце XIX в. (в 1890 г.) и закончился в конце XX в., точнее в конце восьмидесятых — начале девяностых годов. Далее, в соответствии с нашей теорией, произошло резкое увеличение сейсмической активности, т. е. с 90-х годов XX в. начался следующий вековой цикл.

Рассмотрим теперь изменения солнечной активности и сейсмичности Земли с 1991 г. На рис. 7, б представлены временные вариации среднегодовых чисел Вольфа и ежегодных выделений сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре за период с 1991 по 2004 г.

На вертикальной шкале нанесены логарифмы сейсмической энергии. Начиная с 1991 г. происходит непрерывное увеличение сейсмической энергии. Причем столь высокое значение сейсмической энергии, как в 2004 г., наблюдалось лишь в начале XX в. Это указывает на то, что в ближайшие десятилетия число пятен в течение 11-летних солнечных циклов будет уменьшаться, а число сильных землетрясений оставаться высоким. Землетрясения 26.12.2004 г. с $M = 9$ и 21.03.2005 г. с $M = 8,5$ в районе Индонезии подтверждают этот вывод.

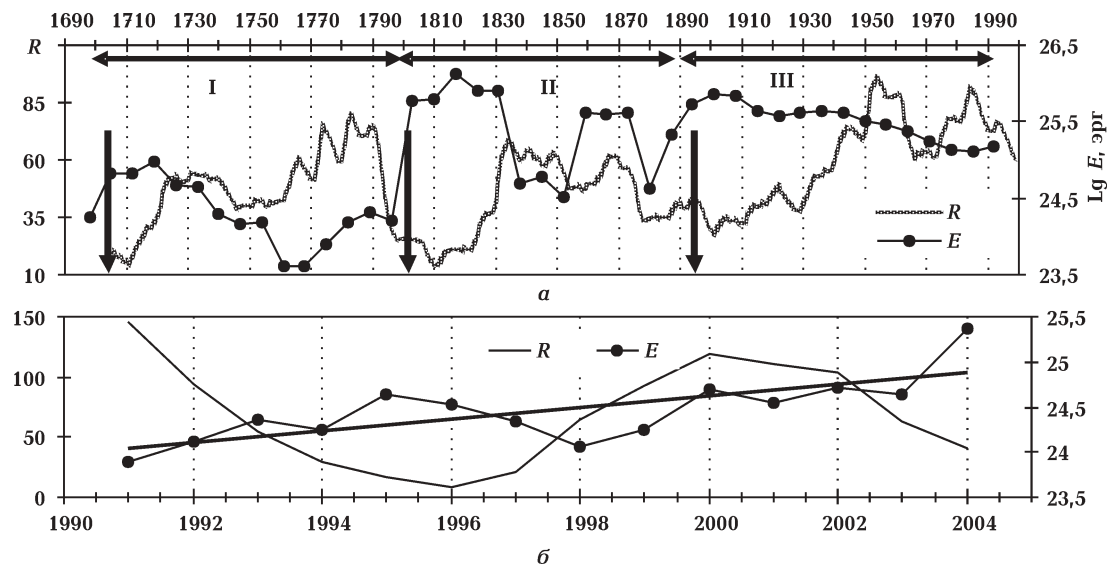


Рис. 7. Суммированные за 7 лет выделения сейсмической энергии в землетрясениях на всем земном шаре и сглаженные среднегодовые числа Вольфа за период с 1690 по 2002 г. (а); временные вариации среднегодовых чисел Вольфа и ежегодных выделений сейсмической энергии в землетрясениях на всем Земном шаре за период с 1991 по 2004 г. (б).

6. Выводы. 1. Выделены вековые циклы солнечной, геомагнитной активности и сейсмичности Земли.

2. Каждый из вековых циклов можно разделить на три цикла, состоящих из трех 11-летних солнечных циклов.

3. В целом на протяжении всего исследуемого периода наблюдается существенная отрицательная корреляция сейсмической активности с солнечной активностью и геомагнитными возмущениями.

4. При рассмотрении отдельных 11-летних солнечных циклов следует отметить, что отрицательная корреляция (циклы № 21, 22) при возрастании сейсмической активности в периоды минимальной солнечной активности может сменяться на положительную во время крупных солнечных вспышек, которые происходят в период повышенной солнечной

активности (циклы № 19, 20). В течение циклов № 14—18 знак корреляции неустойчив. Таким образом, для каждого текущего 11-летнего солнечного цикла следует ожидать повышения сейсмической активности в минимуме солнечной активности. При больших геомагнитных возмущениях под влиянием мощных солнечных протонных событий повышения происходят и во время максимумов солнечной активности.

5. Наиболее сильные землетрясения происходят в начале каждого векового цикла. В 90-х годах прошлого века наступил новый вековой цикл, в начале которого на протяжении десятков лет будет отмечаться сильная сейсмическая активность.

Авторы приносят благодарность Н.А. Сергеевой, М.В. Родкину и Г.С. Иванову-Холодному за помощь в работе и обсуждение материалов.

Список литературы

1. Burlaga L.F. Magnetic field, plasmas, and coronal holes: the inner solar system // Space Sci. Rev. — 1979. — 23, № 2. — P. 201—209.
2. Smith E.J. Field and plasmas in outer solar system // Space Sci. Rev. — 1979. — 23, № 2. — P. 217—223.
3. Сомов Б.В., Сыроватский С.И. Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками // Успехи физ. наук. — 1976. — 120, № 2. — С. 217—223.
4. Витинский Ю.И., Конецкий М., Кузлин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. — М.: Наука, 1986. — 296 с.
5. King J.H. Solar cycle variations in IMF intensity // J. Geophys. Res. — 1979. — 84. — P. 5938—5940.

6. Crooker N. U., Feynman J., Gosling J. On the high correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity // J. Geophys. Res. — 1977. — **82**. — P. 1933—1937.
7. Snyder C. W., Neugebauer M., Rao U. R. The solar wind velocity and its correlation with cosmic-ray variations and geomagnetic activity // J. Geophys. Res. — 1963. — **68**. — P. 6361—6367.
8. Feynmann J. Geomagnetic and solar wind cycles: 1900—1975 // J. Geophys. Res. — 1982. — **87**. — P. 6153—6160.
9. Smart D. F., Shea M. A. Solar proton events during the past three solar cycles // J. Spacecraft and Rockets. — 1989. — **26**, № 6. — P. 403—412.
10. Shea M. A. Smart D. F. A summary of major solar proton events // Solar Phys. — 1990. — **83**. — P. 297—326.
11. Shea M. A. Smart D. F. A comparison of the magnitude of the 29 September 1989 high energy event with solar cycle 17, 18 and 19 events // Proceeding of 22 Inter. Cosmic. Ray Conf. — 1991. — **3**. — P. 101—104.
12. Kockarts G. Effects of solar variations on upper atmosphere // Solar Phys. — 1981. — **74**, № 1. — P. 295—320.
13. Nicolis C. Solar variability and stochastic effects on climate // Solar Phys. — 1981. — **74**, № 3. — P. 473—485.
14. Шестопалов И. П., Колесов Г. Я., Петров В. М., Шаврин П. И. Вспышки СКЛ и межпланетные потоки солнечного ветра // Косм. исследования. — 1992. — **30**, № 4. — С. 547—558.
15. Шестопалов И. П., Бенгин В. В., Колесов Г. Я., Петров В. М., Шаврин П. И. Вспышки СКЛ и крупномасштабные структуры межпланетной среды. Прогноз солнечных протонных событий. I // Косм. исследования. — 1992. — **30**, № 5. — С. 684—694.
16. Шестопалов И. П., Бенгин В. В., Колесов Г. Я., Петров В. М., Шаврин П. И. Вспышки СКЛ и крупномасштабные структуры межпланетной среды. Прогноз солнечных протонных событий. II // Косм. исследования. — 1992. — **30**, № 6. — С. 816—825.
17. Кужевский Б. М., Петров В. М., Шестопалов И. П. О прогнозировании радиационной обстановки в межпланетном пространстве // Косм. исследования. — 1993. — **31**, № 6. — С. 89—103.
18. Сытинский А. Д. О зависимости глобальной и региональной сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности // Докл. АН СССР. — 1982. — **265**, № 6. — С. 1350—1356.
19. Сытинский А. Д. О связи сейсмичности Земли с состоянием межпланетной среды и атмосферными процессами // Докл. АН СССР. — 1987. — **295**, № 2. — С. 338—344.
20. Сытинский А. Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 2. — С. 13—30.
21. Сытинский А. Д. О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1997. — **37**, № 2. — С. 132—137.
22. Сытинский А. Д., Оборин Д. А. Воздействие возмущений межпланетной среды на сейсмичность и атмосферу Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1997. — **37**, № 2. — С. 138—141.
23. Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. On the relation between solar activity and seismicity on different time scales // J. of Atmospheric Electricity. — 2002. — **22**, № 3. — P. 291—300.
24. Лоцинская Н. И. Связь глобальной энергии землетрясений с солнечной активностью // Вестн. Киев. ун-та. Сер. астрономия. — 1999. — Вып. 35. — С. 45—50.
25. Shestopalov I. P., Smyrrenny L. N., Likin O. B., Pisarenko N. F. Solar flares and seismic activity of the Earth // Ann. Geophysic. — 1995. — **13**, suppl. 3, pt. 3. — P. 666.
26. Шестопалов И. П., Конрагов А. А., Харин Е. П. Корреляция сейсмических и биологических процессов с солнечной активностью // Биофизика. — 1998. — **43**, № 4. — С. 706—709.
27. Соболев Г. А., Шестопалов И. П., Харин Е. П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. — 1998. — № 7. — С. 85—89.
28. Pollac J. B., Rages K., Baines K. H., Bergstraln J. T. Estimates of the bolometric albedos and radiation balance of Uranus and Neptune // Icarus. — 1986. — **65**. — P. 442—466.
29. Wang Hong-Zhang. On the internal energy source of the large planets // Chinese astronomy and astrophysics. — 1990. — **14**, № 4. — P. 361—370.
30. <http://neic.usgs.gov>.
31. <http://www.isc.uk>.
32. Rothe J. P. The seismicity of the Earth 1953—1965.

- Paris.: UNESCO, 1969. — P. 336.
33. Голубева Н. В. Каталог сильных землетрясений Земного шара с 1953 по 1967 г. с $M \geq 6$. — М.: Изд. ИФЗ АН СССР, 1972. — 320 с.
34. *Solar-Geophysical data*, 1969—2003. <http://www.ngdc.noaa.gov>.
35. Yasunaga S. Method and equipment for prediction of volcanic eruption and earthquake. Pat. № 5241175. — USA. — 1993. — 8 p.
36. Кужевский Б. М., Нечаев О. Ю., Шаврин П. И. Анизотропия тепловых нейтронов в атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. — 1995. — **32**, № 2. — С. 166—170.
37. Volodichev N. N., Kuzhevskij B. M., Nechaev O. Yu., Panasyuk M. I., Podorol'sky A. B., Shavrin P. I. Solar-lunar-terrestrial interactions: Bursts of neutron emission and seismic activity // *Inter. J. Geomagnetism and Aeronomy*. — 2004. — **4**, № 3. — P. 251—154.
38. *Hanthakis J.* Possible periodicities of the annually released global seismic energy ($N = 7\ 777,5$) during the period 1889—1971 // *Tectonophysics*. — 1982. — **81**. — P. T7—T14.
39. Рогкин М. В., Исикава Я., Гогун Лю. Сейсмичность // Геотраверс Северо-Китайская равнина — Филиппинское море — Марианский желоб. — М.: Наука, 1991. — С. 73—80.