

СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА И ЭНДОГЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ

И. П. Шестопалов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук Москва*

e-mail:shest@wdcb.ru

Поступила в редакцию

Исследовалась связь солнечных пятен с сейсмичностью и вулканическими извержениями на земном шаре. Для этого привлекались следующие данные о группах солнечных пятен: среднегодовая суммарная площадь пятен с1821 по 2012 г.; широта групп пятен и их число с1854 по 2012 г.; магнитные поля групп пятен с 1874 по 2003 г. отдельно для северного и южного полушарий Солнца, а также индекс северо-южной асимметрии этих параметров и их разности. Привлекались также числа Вольфа с1812 по 2012 г. Проанализированы данные о сейсмической и вулканической энергии на всем земном шаре и сопоставлены с вариациями солнечной активности. Обнаружены вековые циклы солнечных пятен и эндогенной активности Земли, в начале которых наблюдались солнечные циклы с небольшим числом пятен, характерным для начала вековых циклов, и сильная сейсмическая и вулканическая активность. Обсуждается причина возникновения солнечных пятен. Предполагается, что пятна – одно из необходимых условий равновесия Солнца. Сделан вывод о существовании общего векового цикла в системе Солнце – Земля, имеющего свои особенности как на Солнце, так и на Земле. Показано, что низкое значение максимума 24-го цикла солнечной активности закономерно.

Ключевые слова: солнечные пятна, солнечные индексы, северо-южная асимметрия, вековой цикл, вулканизм Земли, сейсмичность Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование закономерностей за длительный период солнечной активности позволило обнаружить не только наиболее известные 11-летние циклы солнечных пятен, но и долгопериодические: ~ 80–90 лет (цикл Гляйсберга), ~ 200 лет (цикл Зюсса) и более длительные (Наговицын, 2008).

Для характеристики солнечной активности применяются разные индексы, наиболее популярный из которых — числа Вольфа. Они имеют самый длинный ряд измерений, поэтому часто используются в гелиофизических и геофизических исследованиях. В настоящее время единой теории прогноза солнечной активности не существует, поэтому прогнозы значений максимумов предстоящего цикла у разных исследователей значительно различаются. Прогнозы на 23-й и 24-й циклы подтверждают это (Зеленый, Веселовский, 2008а). В работах (Шестопапов, Рогожин, 2005; Шестопапов, Харин, 2006; Белов и др., 2009; Шестопапов и др., 2013) исследовалась связь солнечной активности с энергетическими процессами внутри Земли. В них в качестве показателя солнечной активности использовались числа Вольфа, а в качестве активности земных процессов — энергия землетрясений и вулканических извержений. Изначально в этих работах не ставилась задача прогнозирования. Необходимо было попытаться выявить некоторые особенности взаимосвязи между солнечной активностью и эндогенной активностью Земли на протяжении длительного периода — не менее 100 лет.

На основании полученных данных были выявлены вековые циклы солнечной активности, сейсмичности и вулканизма продолжительностью ~ 100 лет. В начале каждого из циклов XVIII, XIX и XX веков сейсмическая и вулканическая активность были максимальными, а числа Вольфа, характеризующие солнечную активность, — минимальными. Таким образом, наблюдалась существенная отрицательная корреляция сейсмичности и вулканизма Земли с солнечной активностью. Другими словами, наибольшая сейсмическая и вулканическая активность имела место при небольшой солнечной активности, и наоборот. В работе (Шестопапов, Харин, 2006) отмечалось, что новый вековой солнечный цикл начнется после завершения 23-го цикла. В этой работе предполагалось, что в 24-м и нескольких следующих циклах числа Вольфа будут значительно меньше 100, что характерно для начала векового цикла.

Таким образом, было обнаружено, что в системе Солнце–Земля существует общий вековой цикл, присущий как Солнцу, так и Земле. В настоящей работе продолжены эти исследования.

ВЕКОВЫЕ ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Для изучения вековых циклов солнечной активности использовались следующие данные о группах солнечных пятен:

- Среднегодовые значения чисел Вольфа, полученные на сайте Королевской обсерватории Бельгии <http://sidc.oma.be/sunspot-data/> с 1812 по 2012 г.
- Среднегодовая суммарная площадь пятен отдельно для северного $S_N(t)$ и южного $S_S(t)$ полушарий Солнца в миллионных долях полусферы Солнца, а также вычисляемый на их основе индекс северо-южной асимметрии активности $q = (S_N - S_S) / (S_N + S_S)$ и разности площадей пятен северного $S_N(t)$ и южного $S_S(t)$ полушарий $dS = (S_N - S_S)$, усредненные за год, с 1821 по 2012 г.
- Широта групп солнечных пятен отдельно для северного $\varphi(N)$ и южного $\varphi(S)$ полушарий, а также асимметрия широт $A\varphi = ((\varphi(N) - \varphi(S)) / (\varphi(N) + \varphi(S)))$ и разность широт $d(\varphi) = \varphi(N) - \varphi(S)$ с 1854 по 2012 г.

Данные о площади пятен и их широтах были получены на сайте Пулковской обсерватории <http://www.gao.spb.ru/database/esai/> и на сайте <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml> по данным Гринвичского каталога (Наговицын и др., 2006; Милецкий, Иванов, 2007).

- Число групп N пятен отдельно для северного и южного полушарий, северо-южная асимметрия $AN = (N_N - N_S) / (N_N + N_S)$ и разность чисел групп пятен северного N_N и южного N_S полушарий $dN = (N_N - N_S)$, по данным о группах солнечных пятен Гринвичского каталога и его продолжения за период 1874–2012 гг.
- Магнитные поля групп солнечных пятен отдельно для северного $B(N)$ и южного $B(S)$ полушарий, а также северо-южная асимметрия $AB = (B_N - B_S) / (B_N + B_S)$ и разность значений магнитных полей групп солнечных пятен в северном и южном полушариях, $dB = (B_N - B_S)$ с 1874 по 1966 г. по наблюдениям в обсерватории Гринвич, с 1967 по 2003 г. – в обсерватории Маунт-Вильсон.

Для этого привлекались непосредственные наблюдения в обсерватории Маунт-Вильсон с 1967 по 2003 г., где измерялись максимальные напряженности полей B в группах ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_REGIONS/Mt_Wilson/. Значения полей приведены в кодах от 1 до 10. За период с 1874 по 1966 г. магнитные поля групп пятен определялись косвенным способом по наблюдениям в обсерватории Гринвич, для чего использовалась классификация типов групп пятен. Группы пятен по степени усложнения имели значения от 0 до 9 ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_REGIONS/Greenwich/. Представленная классификация типов групп пятен в обсерватории Гринвич существовала до 1976 г. На протяжении 10 лет, с 1967 по 1976 г., проводилось сравнение данных о магнитных полях

групп пятен за этот период по наблюдениям обсерваторией Маунт-Вильсон и типам групп пятен по классификации обсерваторией Гринвич. Анализ показал хорошее соответствие данных. То есть по мере развития активной области одновременно с усложнением ее структуры увеличивается магнитное поле.

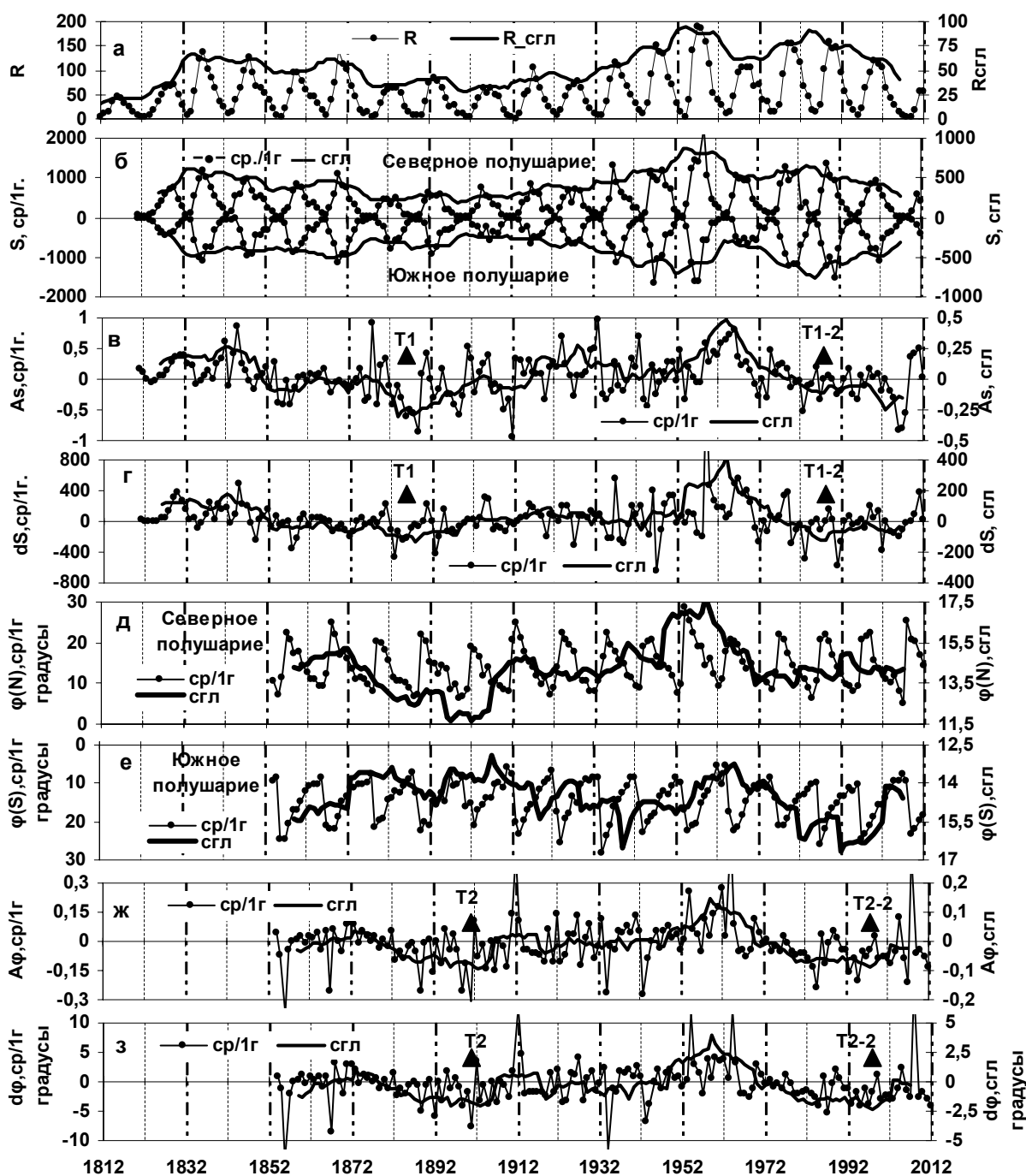


Рис.1. Временные вариации: *а* – среднегодовых значений чисел Вольфа (R , шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($R_{сгл}$, шкала справа) за период с 1813 по 2013 г; *б* – среднегодовых суммарных площадей пятен S отдельно северного и южного полушарий Солнца в миллионных долях полусферы Солнца (S , шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($S_{сгл}$, шкала справа) за период с 1821 по 2013 г; *в, г* – северо-южной асимметрии площадей пятен: A_S (*в*) и разности площадей пятен северного и южного полушарий dS (*г*), усредненных за год (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа); *д, е* – среднегодовых значений широт групп солнечных пятен в северном $\varphi(N)$ (*д*) и южном полушариях $\varphi(S)$ (*е*) (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа) за период с 1854 по 2011; *ж, з* – северо-южной асимметрии широт пятен $A\varphi$ (*ж*) и разности широт пятен северного и южного полушарий $d\varphi$

(з), усредненных за год (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа) за период с 1854 по 2011.

На рис. 1 представлены значения чисел Вольфа R за период 1812 — 2012 гг; суммарных площадей групп пятен S отдельно для северного и южного полушарий Солнца, северо-южной асимметрии площадей пятен A_S и разностей площадей пятен северного и южного полушарий dS за период 1821 — 20128 гг.; широт групп солнечных пятен в северном $\varphi(N)$ и южном полушариях $\varphi(S)$, северо-южной асимметрии широт $A\varphi$ пятен и разности широт пятен северного и южного полушарий $d(\varphi)$ за период 1854 — 2012 гг.

Из рис. видно, что в XIX веке максимальные значения чисел Вольфа наблюдались в 8-м цикле (1833 — 1844) солнечной активности. В это время северо-южная асимметрия и разность площадей пятен были максимальными в XIX веке (см. рис. 1в, рис. 1г). Аналогичная ситуация наблюдалась в XX веке. Максимальные значения чисел Вольфа и площадей групп пятен в северном и южном полушариях Солнца наблюдались в 19-м цикле (1954–1964) (см. рис. 1а,б). В 19-м цикле, как и в 8-м, северо-южная асимметрия площадей групп пятен и разность площадей групп пятен были максимальными в XX веке (см. рис. 1в, рис. 1г). Из этого можно сделать вывод: как в XIX, так и в XX веках в период максимальной солнечной активности площади групп пятен в северном полушарии были больше, чем в южном.

Далее из рис. 1в,г видно, что как в XIX, так и в XX веке северо-южная асимметрия и разность площадей групп пятен после достижения максимальных значений начинают уменьшаться и принимать значения, близкие к нулю в тот период, когда в каждом из этих столетий наблюдался 2-й максимум чисел Вольфа (см. рис. 1а). В XIX веке это произошло в 11-м цикле (1867–1878), в XX столетии — в 21-м цикле (1976–1986).

Следующий этап в развитии солнечной активности заключается в том, что в XIX веке циклы 12-й (1878–1889) и 13-й (1889–1901) имели самые низкие значения, как и в начале столетия (циклы 5-й, 1798–1810 и 6-й, 1810–1823, см. рис. 1а,б). Из рис. 1в,г видно, что этот этап характеризуется отрицательными значениями асимметрии и разности площадей групп пятен. Минимальные сглаженные значения этих параметров наблюдались в 1888–1889 гг. На рис. 1 в, г этот момент обозначен треугольниками T1.

Следовательно, можно сделать вывод: в XIX веке в период минимальной солнечной активности площади групп пятен в южном полушарии были больше, чем в северном. Аналогичная ситуация произошла примерно через 100 лет, в 1990г. В момент T1-2 площади групп пятен в южном полушарии были больше, чем в северном. Однако в момент T1-2 числа Вольфа и площади пятен оставались большими. Сделаем предположение: момент, в который площади групп пятен в южном полушарии больше, чем в северном, является началом векового цикла солнечной активности. В этот момент числа Вольфа и площади

пятен либо имеют самые низкие значения в этом цикле, либо это произойдет позже. В данном случае это произошло в конце 23-го цикла.

Таким образом, в начале векового цикла максимальная площадь групп пятен наблюдалась в южном полушарии; в период увеличения чисел Вольфа площади пятен в северном и южном полушариях сравниваются, а затем постепенно асимметрия и разность площадей групп пятен становятся положительными. В период максимальной солнечной активности по числам Вольфа максимальная площадь групп пятен наблюдалась в северном полушарии. На спаде солнечной активности происходит обратный процесс. Асимметрия и разность площадей пятен вновь становятся отрицательными, и в конце векового цикла, как и в начале, максимальная площадь пятен наблюдается в южном полушарии.

На рис. 1д-з представлены временные вариации: среднегодовых и сглаженных значений широт групп солнечных пятен в северном и южном полушариях; северо-южной асимметрии широт пятен $A\varphi$ и разности широт пятен северного и южного полушарий $d\varphi$ за период 1854–2012 гг. Из рисунка видно, что минимальные значения асимметрии и разности широт групп пятен наблюдались в начале XX столетия (14-й цикл, 1901–1913) и в начале XXI столетия (в конце 23-го цикла). Моменты T2 и T2-2 указывают на начало векового цикла.

Далее характер вариаций асимметрии и разности широт групп пятен напоминает характер вариаций асимметрии и разности площадей пятен. Отметим, что моменты T1 и T2, как и T1-2 и T2-2, сдвинуты относительно друг друга приблизительно на 10 лет. То есть начало векового цикла, выделенное по разным параметрам, площади и широтам групп пятен, наблюдается в разное время. При этом можно отметить, что моменты T2 и T2-2 совпадают с самыми низкими значениями чисел Вольфа, – это 14-й цикл, 1901–1913 гг. и 24-й цикл, начало которого – 2010 г., а максимум, вероятно, – 2013 г.

Для подтверждения выводов о вековом цикле солнечной активности привлекаются данные: о числе групп N пятен отдельно для северного и южного полушарий, северо-южной асимметрии AN и разности dN по данным о группах солнечных пятен Гринвичского каталога и его продолжения за период 1874–2012 гг., а также о магнитных полях групп солнечных пятен отдельно для северного $B(N)$ и южного $B(S)$ полушарий, асимметрии AB и разности значений магнитных полей групп солнечных пятен в северном и южном полушариях dB с 1874 по 1966 г. по наблюдениям в обсерватории Гринвич, с 1967 по 2003 г. – в обсерватории Маунт-Вильсон (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что минимальные значения асимметрии и разности чисел групп пятен, а также магнитных полей групп пятен отмечались в начале векового солнечного цикла. На рис. 2в,г и рис. 2е,ж этот момент обозначен треугольником T1. Это наблюдалось в

начале 13-го цикла, в 1888–1889 гг., т.е. в то же самое время, когда это отражалось в характере вариаций площади групп пятен (см рис. 1в,г). Затем в период максимальных значений чисел Вольфа (цикл 19-й, 1954–1964) значения асимметрии, разности числа групп пятен и их магнитных полей тоже были максимальными. На спаде солнечной активности происходит обратный процесс. В момент T1-2 количество групп пятен и их магнитные поля были максимальными в южном полушарии (см. рис. 2в,г и рис. 2е,ж). Как видно из рис. 1 и рис. 2, моменты T1-2 наблюдаются в одно время, в 1990 г.

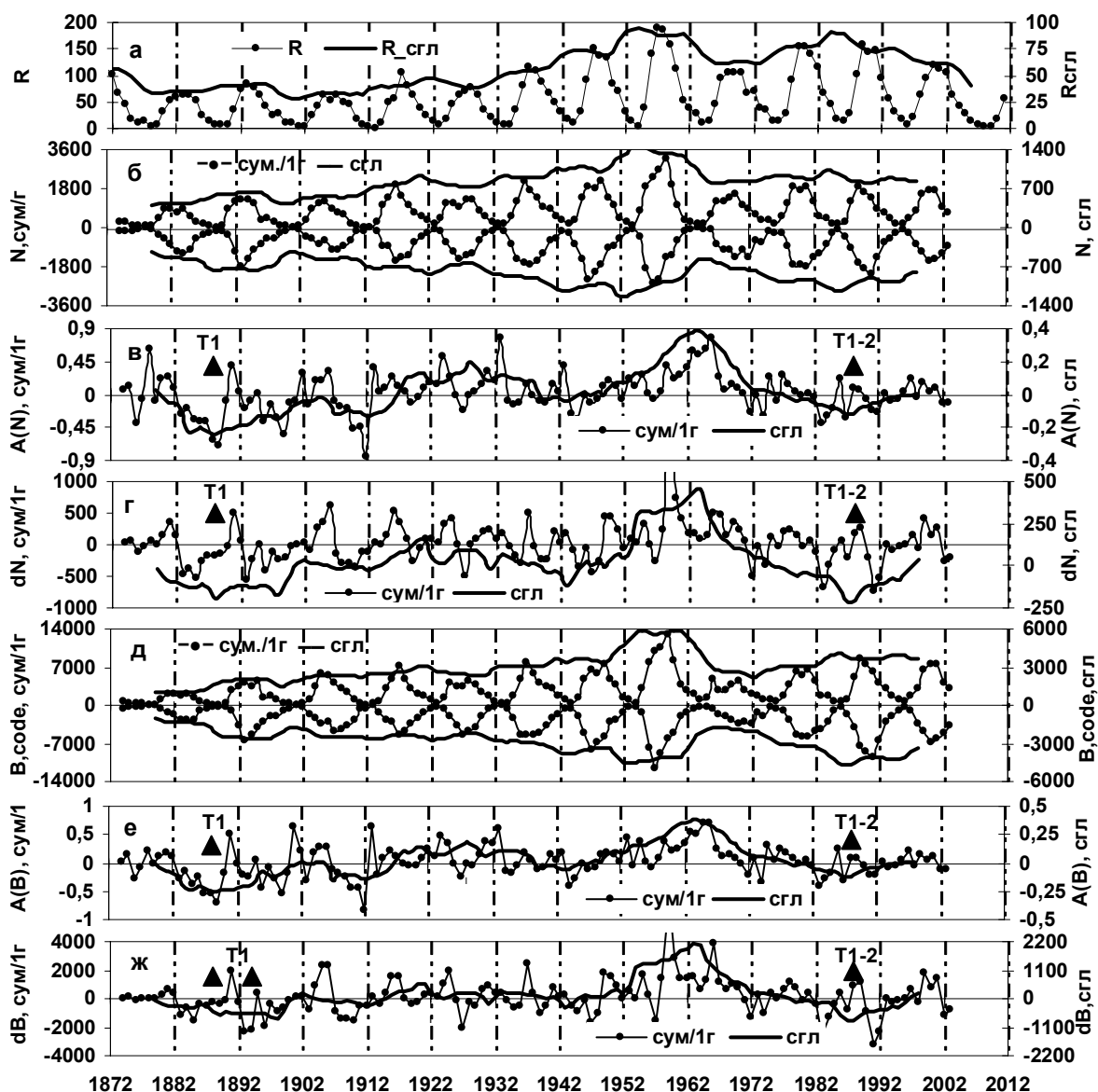


Рис.2 Временные вариации: *а* – среднегодовых значений чисел Вольфа (R , шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($R_{сгл}$, шкала справа) за период 1874 - 2012 г; *б* – среднегодовых чисел групп пятен отдельно северного и южного полушарий Солнца (N , шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($N_{сгл}$, шкала справа) за период с 1874 -2012 г; *в, з* – северо-южной асимметрии: $A(N)$ (*в*) и разности dN (*г*), усредненных за год (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа); *д* - среднегодовых значений магнитных полей групп солнечных пятен B отдельно северного $B(N)$ и южного $B(S)$ полушарий(шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($B_{сгл}$, шкала справа); *е, ж* - среднегодовых значений северо-южной асимметрии AB (*е*) и разности значений магнитных полей групп солнечных пятен в северном и южном полушариях, dB (*ж*) (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа) за период 1874-2003г.

Таким образом, анализируя параметры солнечной активности в 1812 – 2012 гг., представленные на рис. 1 и рис. 2, можно сделать вывод о существовании вековых циклов солнечной активности. При этом начало векового цикла, выделенное по разным параметрам, с одной стороны – по площади групп пятен, величинам магнитных полей и количеству групп пятен отдельно для северного и южного полушарий, а с другой – по широтам пятен, наблюдается в разное время. Временной сдвиг между ними приблизительно 10 лет.

Выясним причины представленных изменений. При выяснении причин возникновения солнечных пятен и их активности необходимо учитывать не только процессы, происходящие внутри Солнца, но и движение Солнечной системы в межзвездной среде. В результате движения Солнечной системы в межгалактическом пространстве устанавливаются определенные параметры вращения Солнца вокруг своей оси и наклон оси вращения. Эти параметры испытывают изменения, которые происходят, с одной стороны, вследствие движения Солнечной системы в галактическом пространстве, а с другой – за счет причины, присущей самому Солнцу, его неоднородности. Межзвездная среда является очень динамичной системой со сложной структурой. Она находится в непрерывном взаимодействии со звездами и межгалактической средой, обмениваясь с ними веществом (Каплан, Пикельнер, 1979; Бочкарев, 1990). Можно предположить, что появление пятен на Солнце является одним из необходимых условий его равновесия. Необходимо также предположить, что внутри Солнца существует среда, в которой могут распространяться возмущения, возникшие в результате нарушения динамического равновесия.

Солнечная фотосфера неоднородна – она состоит из гранул и темных промежутков между ними. Типичный диаметр гранул – около 1000 км. Гранулы являются динамическими образованиями, постоянно возникающими, меняющимися и исчезающими. Время их существования — от 8 до 20 минут. Есть сообщения о существовании супергранул размером 32000 км. (Фельдштейн, Обридко, 1980).

Таким образом, гелиофизическая среда состоит из отдельных ячеек: от очень крупных до весьма небольших, т. е. она является не сплошной, а дискретной. Возмущение, которое возникает в результате нарушения равновесия Солнца, приводит дискретную гелиофизическую среду в активное состояние. В результате возбуждение может постепенно передаваться от одной ячейки к другой в разных направлениях. Это также может вызывать колебания поверхности Солнца, длящиеся от нескольких минут до нескольких часов и более. В 60-х годах XX столетия были открыты пятиминутные колебания на Солнце (Зеленый, Веселовский, 2008б). В работах (Дюбнер, 1972; Кауфман, 1972) сообщается о колебаниях с периодом около часа. В них колебания интерпретируются как акустические волны. О глобальных колебаниях с периодом 160 мин сообщают Северный и др. (1976), Брукс и

др.(1976), по мнению которых эти колебания едва ли могут быть акустической модой. Наиболее вероятная причиной таких колебаний – гравитационная волна.

Таким образом, в результате нарушения равновесия Солнца могут возникнуть возмущения в виде гравитационных волн, распространение фронта которых может привести к возбуждению гелиофизической среды, образованию пятен и генерации в них магнитных полей.

Согласно данным, представленным на рис. 1 и рис. 2, в начале векового цикла площади групп пятен, число групп пятен и их магнитные поля в южном полушарии имеют максимальные значения. Видимо, это условие соответствует внутреннему состоянию Солнца. Но это состояние неустойчиво, оно нарушает равновесие Солнца. В результате возникает возмущение, которое приводит к генерации пятен с магнитными полями в них. При этом количество пятен в северном полушарии становится больше, чем в южном. В максимуме солнечной активности векового цикла равновесие восстанавливается, и количество пятен начинает уменьшаться. В конце векового цикла, как и в начале, количество пятен становится минимальным, их больше в южном полушарии. Но это вновь нарушает равновесие Солнца, и процесс повторяется.

Ранее было показано, что начало векового цикла, выделенное по разным параметрам, с одной стороны – по площади групп пятен, величинам магнитных полей и количеству групп пятен отдельно для северного и южного полушарий, а с другой – по широтам пятен, наблюдается в разное время. Временной сдвиг между ними приблизительно 10 лет. Вероятно, это, обусловлено тем, что интервал между рождением пятен внутри Солнца и выносом их на его поверхность в начале векового цикла составляет приблизительно 10 лет, т.е равен периоду 11-летнего цикла.

СВЯЗЬ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН С ЭНДОГЕННОЙ АКТИВНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Для изучения связи между солнечной активностью, сейсмичностью и вулканизмом Земли проанализированы данные о сейсмической и вулканической энергии, выделившейся из очагов землетрясений и вулканических извержений на всем земном шаре за период с 1688 по 2012 г, которые сопоставлены с циклами солнечной активности.

С этой целью был создан каталог землетрясений с магнитудами $M_s \geq 6$ и $m_b \geq 5,5$. При составлении каталога использовались базы данных Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC, USGS) (<http://www.earthquake.usgs.gov/regional/neic/>); база Национального геофизического центра обработки данных (NGDC) (<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1>); столетний каталог Эндала и Виллазенора, 2002 (Centennial Catalog (Engdahl and Villaseñor,

2002) (<http://earthquake.usgs.gov/research/data/centennial.php>); каталог Роте сильных землетрясений Земного шара с 1953 по 1965 г. (Роте, 1969) При составлении нашего каталога для периода 1977–2012 гг. использовалась также база значительных землетрясений, составленная геологической службой США, в которой даны дополнительные магнитуды и комментарии (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/significant/>).

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

Для анализа вулканизма использованы данные о вулканических извержениях каталога Смитсоновского института (The Smithsonian Institution's Global Volcanism Program, (<http://www.volcano.si.edu/world/>)). На основе этого была создана общая мировая информационная база данных, включающая в себя объёмы излившейся лавы и извергнутого пепла в км³. Так как последний каталог не содержит данных об энергии извержений, её оценка выполнена на основе выведенного автором по материалам каталога Гуценко (1979) уравнения корреляционной связи между объемом выброшенного пепла и энергией извержений.

Учитывая наличие наиболее полных и достоверных данных за 1876–2012 гг., целесообразно детали вековых вариаций сейсмической и вулканической составляющих эндогенной активности Земли рассмотреть подробнее на примере цикла XX века (рис. 3). На рис. 3 представлены параметры солнечной активности, а также сейсмической и вулканической энергии Земли за период с 1876 по 2012г. Из рис. видно, что когда разность площадей групп пятен принимала минимальные значения, т. е. когда в южном полушарии площади пятен были больше, чем в северном, сейсмичность Земли была минимальной. На рис. 3в. минимум этих значений отмечен треугольником Т1. Это произошло в конце XIX столетия. Затем сейсмическая активность быстро увеличивалась и в начале XX века достигла максимального значения. Это наблюдалось, когда разность площадей пятен была близка к нулю либо становилась положительной. На протяжении XX столетия сейсмическая активность после достижения максимума постепенно снижалась, а значения чисел Вольфа – увеличивались. Числа Вольфа в период максимума энерговыделений при землетрясениях (в начале XX столетия) были минимальные за XX столетие (см. рис. 3а). На протяжении столетия значения чисел Вольфа постепенно увеличивались. Наиболее высокие сглаженные их значения имели место в пятидесятые и восьмидесятые годы. Этим максимумам соответствует относительно низкая сейсмическая энергия. В период максимальной солнечной активности, в 19-м цикле, площади групп пятен в северном полушарии были больше, чем в южном (см. рис. 3б). На спаде солнечной активности происходит обратный

процесс. Разность площадей пятен вновь становится отрицательной, момент T1-2, и в это время сейсмическая активность имеет минимальное значение, как и в конце XIX века.

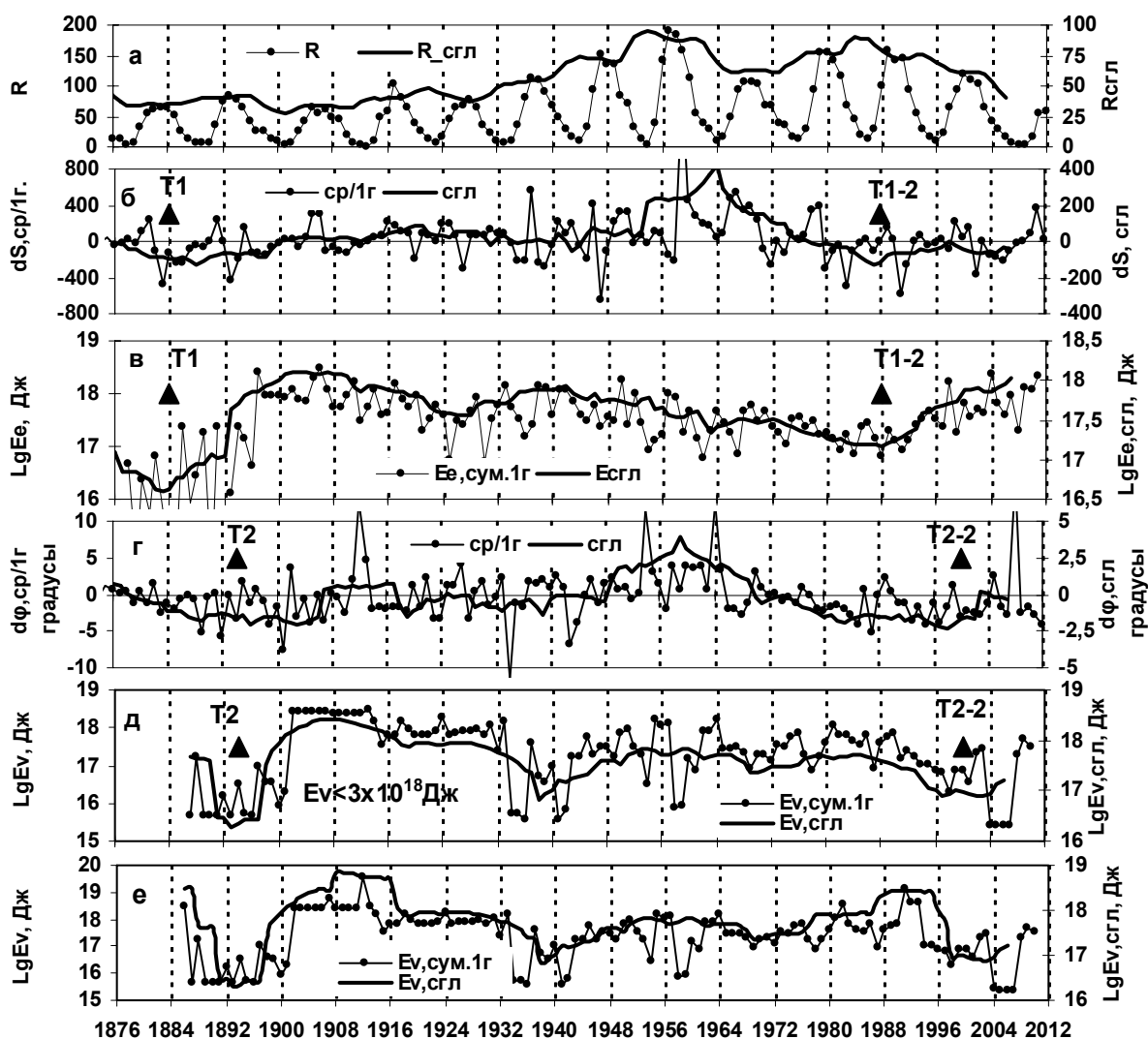


Рис.3. Временные вариации за период с 1876 по 2012: *а* – среднегодовых значений чисел Вольфа (R , шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($R_{сгл}$, шкала справа); *б* – разности площадей пятен северного и южного полушарий dS усредненных за год (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа); *в* – суммарных годовых значений (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа) сейсмической энергии землетрясений на земном шаре; *г* – разности широт пятен северного и южного полушарий $d(\varphi)$, усредненных за год (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа); *д, е* – суммарных годовых значений (шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям (шкала справа) энергии вулканических извержений на земном шаре: *д* – с энергией $E < 2 \times 10^{18}$ Дж; *е* – всех извержений (за период с 1876 по 2010г).

Таким образом, вековой цикл солнечной активности, выделенный по площади групп пятен в северном и южном полушариях, отражается в сейсмической активности Земли. В 90-х годах XX столетия вновь наблюдается увеличение сейсмичности Земли и вновь разность площадей пятен становится близкой к нулю.

Следует отметить, что между числами Вольфа и энерговыделениями во время землетрясений установлена отрицательная корреляция: коэффициент корреляции (r) = -0,8.

Это позволяет утверждать, что, как правило, наибольшая сейсмическая активность имеет место при минимальной солнечной активности, и наоборот.

Исходя из созданной базы данных, проводилось сопоставление максимального энерговыделения при вулканических и сейсмических событиях. Выявлено, что максимальная энергия вулканического извержения превышает почти на порядок максимальное энерговыделение во время землетрясения. Из рис. 3 видно, что в целом между солнечной активностью и энергией вулканических извержений также существует отрицательная корреляция. Однако необходимо уточнить: наиболее высокая отрицательная корреляция ($r = -0,87$) между ними наблюдается при таких вулканических извержениях, когда их энергия сопоставима с энерговыделением во время землетрясений (см. рис. 3д). Для всех вулканических извержений такая корреляция значительно ниже.

Минимальные значения энергии вулканических извержений наблюдались в конце XIX – начале XX столетий, примерно на 10 лет позже, чем для сейсмической энергии (см.рис. 3 д,е). На рис. 3д это отмечено треугольником T2. Во время минимальных значений энергии вулканических извержений разность широт групп пятен имела отрицательные значения (на рис. 3г это отмечено треугольником T2). Затем вулканическая активность быстро увеличивалась и в начале XX века достигла максимального значения. Это совпало со временем, когда разность широт была близка к нулю либо становилась положительной. На протяжении XX столетия вулканическая активность после достижения максимума постепенно снижалась. Минимальные ее значения вновь отмечались в начале XXI столетия (в конце 23-го цикла), в то же самое время, когда разность широт пятен вновь стала отрицательной (на рис. 3 г,д – момент T2-2). Это произошло приблизительно на 10 лет позже, чем для разности площадей пятен и сейсмической активности.

Таким образом, вековой цикл солнечной активности, выделенный по широте пятен в северном и южном полушариях, отражается в вулканической активности Земли.

Рассмотрим особенности широтного распределения землетрясений и вулканических извержений.

На основе созданной базы данных проанализировано широтное распределение землетрясений различных магнитуд и вулканических извержений.

Ранее в (Шестопалов, Харин, 2006; Шестопалов и др., 2013) было показано, что столетний цикл солнечной, сейсмической и вулканической активности разбивается на три периода по ~ 33 года, т. е. длительность каждого из них примерно равна трём 11-летним циклам солнечной активности.

Из рис. 4а видно, что максимальное число землетрясений всех магнитуд за период 1891 – 2012 гг. наблюдается в южном полушарии на широтах 0° – 10° , очевидно,

соответствует наиболее активному Индонезийскому сегменту Тихоокеанского пояса. Второй, менее значимый максимум сейсмической активности, находится в северном полушарии на широтах около 30–40⁰, соответствуя Альпийско-Гималайскому поясу.

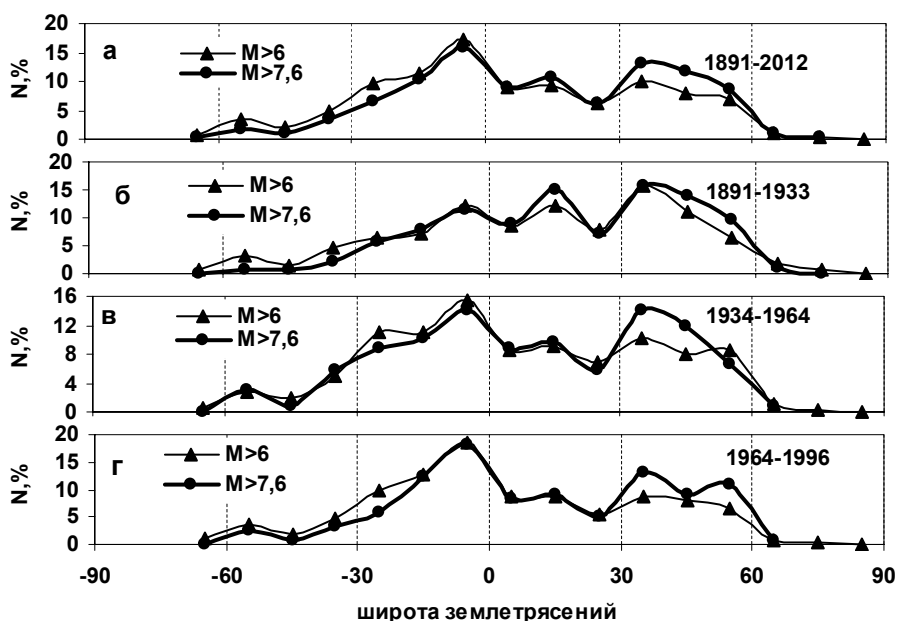


Рис.4. Широтное распределение землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ и $M \geq 7$ с шагом 10⁰ в вековом цикле за период 1891-2012г: а – в целом; б – начальном периоде (1891 – 1933); в – в среднем периоде (1934 – 1964); г – в заключительном периоде векового цикла (1964 – 1996). Шкала ординат выражена в процентах от общего числа землетрясений за указанный период.

Проанализируем, как меняется широтное распределение землетрясений на протяжении трёх 33 – летних периодов столетнего цикла сейсмической и вулканической активности.

В начальный период прошлого века (1891–1933) максимальное число землетрясений наблюдалось на широтах около 30–40⁰ (рис. 4б), во второй период (1934-1964) – в южном полушарии на широтах 0⁰–10⁰. Максимальное количество крупных землетрясений, $M \geq 7$, в этот период в северном полушарии почти сравнялось с таковым в южном полушарии (рис. 4в).

На рис. 4г видно, что в последнем периоде векового цикла (1964–1996) максимум землетрясений переместился уже в южное полушарие на широты 0–10⁰.

Похожая картина наблюдается и для вулканизма. На рис. 5 продемонстрирована широтная миграция максимумов вулканизма из северного полушария в южное на протяжении XX века.

Таким образом, статистическим анализом установлена миграция (инверсия) максимумов землетрясений и вулканических извержений на Земле в XX веке из северного полушария в южное.

Как уже показано, установлена также миграция индексов солнечной активности. В начале векового цикла максимальная площадь групп пятен, магнитных полей, чисел групп

пятен наблюдалась в южном полушарии, затем в период увеличения чисел Вольфа значения этих параметров сравниваются, и в период максимальной солнечной активности они максимальны в северном полушарии.

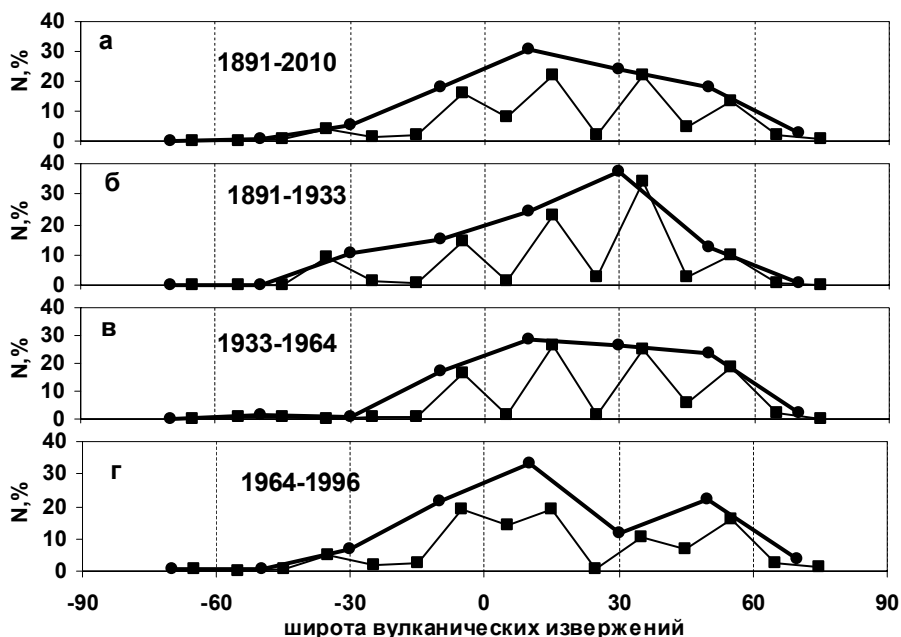


Рис.5. Широтное распределение вулканических извержений с известным объемом излившейся лавы с шагом 10^0 и 20^0 в вековом цикле за период 1891-2010г: а – в целом; б – начальном периоде (1891 – 1933); в – в среднем периоде (1934 – 1964); г – в заключительном периоде векового цикла (1964 – 1996). Шкала ординат выражена в процентах от общего числа вулканических извержений за указанный период.

Таким образом, в течение векового цикла на Солнце пятна мигрируют из южного полушария в северное, а на Земле – наоборот: сейсмичность и вулканизм перемещаются из северного полушария в южное.

ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием гравитации Солнце стремится сжаться. Этому сжатию противодействует перепад давления, возникающий за счет ядерных реакций синтеза гелия из водорода. Термоядерный источник способен поддержать Солнце в равновесном состоянии длительное время. При выяснении причин возникновения солнечных пятен и их активности необходимо учитывать не только процессы внутри Солнца, но и движение Солнечной системы в межзвездной среде.

Можно предположить, что появление пятен на Солнце является одним из необходимых условий для сохранения его равновесия. Нарушение равновесия приводит в гелиофизической среде к возникновению возмущения, образованию пятен с магнитными полями и генерации гравитационных волн.

Весь процесс восстановления равновесия длится приблизительно 100 лет.

Можно предположить, что особенности временных вариации северо-южной асимметрии площади пятен, их количества и магнитных полей связаны с процессами внутри

Солнца, в источнике их зарождения, а особенности временных вариации северо-южной асимметрии широты пятен – с процессами, происходящими в поверхностных слоях Солнца.

Вековой цикл солнечной активности, определяемый по площади групп пятен, их магнитным полям в северном и южном полушариях, зеркально отражается в сейсмической активности Земли, а вековой цикл солнечной активности, определяемый по широте групп пятен в северном и южном полушариях, – в вулканической активности Земли.

Таким образом, в системе Солнце–Земля существует общий вековой цикл, имеющий свои особенности, как на Солнце, так и на Земле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности вариаций различных параметров групп пятен в северном и южном полушариях Солнца позволяют предполагать наличие векового цикла солнечной активности.

Выявлена эволюция солнечной активности на протяжении векового цикла, состоящая в том, что в начале векового цикла максимальные значения площадей групп пятен, их магнитных полей наблюдались в южном полушарии, т.е. в период, когда северо-южная асимметрия этих параметров имела минимальные значения. Затем, в период увеличения чисел Вольфа, эти параметры в северном и южном полушариях сравниваются. В период максимальной солнечной активности они в северном полушарии больше, чем в южном; в максимуме векового цикла северо-южная асимметрия этих параметров максимальна. На спаде солнечной активности происходит обратный процесс, максимальные значения этих параметров имеют в южном полушарии.

Установлено, что начало векового цикла, определяемое по разным параметрам: с одной стороны – по площади пятен, магнитным полям и количеству групп пятен отдельно в северном и южном полушариях, а с другой – по широте пятен, наблюдается в разное время. Временной сдвиг между ними приблизительно 10 лет.

Показано, что вековой цикл солнечной активности, определяемый по площади групп пятен, магнитным полям и количеству групп пятен в северном и южном полушариях, зеркально отражается в сейсмической активности Земли. Начало векового цикла сейсмической активности Земли совпадает с минимальными значениями северо-южной асимметрии и разности этих параметров. Последний вековой цикла, определяемый по этим параметрам, начался в начале 90-х годов XX века.

Вековой цикл солнечной активности, определяемый по широте пятен в северном и южном полушариях, зеркально отражается в вулканической активности Земли. Начало векового цикла вулканической активности Земли совпадает с минимальными значениями асимметрии и разности широты групп пятен. Начало последнего векового цикла

вулканической и солнечной активности, определяемой по широтам пятен, относится к концу 23-го цикла.

Установлена отрицательная корреляция сейсмичности и вулканизма с солнечной активностью.

Сделано предположение, что при выяснении причин возникновения солнечных пятен и их активности необходимо учитывать не только процессы, происходящие внутри Солнца, но и движение Солнечной системы в межзвездной среде. Предполагается, что появление пятен на Солнце является одним из необходимых условий для сохранения его равновесия. Нарушение равновесия приводит к возмущению гелиофизической среды, образованию пятен с магнитными полями и генерации гравитационных волн.

Установлено, что начало векового цикла, определяемого по числам Вольфа, относится к 24-му циклу, поэтому максимумы этого цикла и последующего будут иметь небольшие значения.

Автор благодарен Белову С.В., Баркину Ю.В. и Шестопаловой В.С. за помощь в работе, дискуссию и полезные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П., ДАН. **428**. 104 (2009).
2. Бочкарев Н.Г. Основы физики межзвездной среды (М.: Изд-во МГУ, 1990). с. 352.
3. Брукс и др. (J.R. Brookes., Isaak G.R. and H. B van der Raay), Nature, **259**. 92 (1976).
4. Гущенко И.И. Извержения вулканов мира (М.: Наука, 1979), с. 476
5. Дюбнер (F.-L Deubner), Solar Phys. **22**. 263. (1972).
6. Зеленый Л.М., Веселовский И.С. Плазменная гелиогеофизика (М.: Физматлит, 2008а), т. 2, с. 560.
7. Зеленый Л.М., Веселовский И.С. Плазменная гелиогеофизика (М.: Физматлит, 2008б), т. 1, с. 672.
8. Каплан С. А., Пикельнер С.Б. , Физика межзвездной среды (М.: Наука, 1979), с. 474.
9. Кауфман (P. Kaufman), Solar Phys. **23**, 178 (1972).
10. Милецкий Е.В., Иванов В.Г., XI Пулковская международная конференция по физике Солнца "Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений" (СПб.: СПб. Пулково. 2007, 255).
11. Наговицын Ю. А., Астрофизический бюллетень. **63**. 45. (2008).
12. Наговицын Ю.А., Макарова В.В., Наговицына Е.Ю., X Пулковская международная конференции по физике Солнца "Квазипериодические процессы на солнце и их геоэффективные проявления". (СПб.: СПб. Пулково. 2006. 239).

13. Роте (J. P. Rothe) The seismicity of the Earth 1953-1965. (P.: UNESCO, 1969). p.336.
14. Северный и др. (A.B. Severny, V.A. Kotov and T.T Tsap), Nature, **259**. 87 (1976).
15. Фельдштейн Я.И., Обридко В.Н. Солнечная и солнечно-земная физика.
Иллюстрированный словарь терминов (М.: Мир, 1980), с. 254.
16. Шестопалов И.П., Рогожин Ю.А. Авиакосмическая и экологическая медицина. **39**. 20 (2005).
17. Шестопалов И. П., Харин Е. П. Геофизический журнал. **28**. № 4. С. 59 (2006).
18. Шестопалов И.П, Белов С.В., Соловьев А.А., Кузьмин Ю.Д., Геомагнетизм и аэрономия. **53**. 130 (2013).