Квазипериодические вариации солнечной активности и космических лучей

В. П. Охлопков

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ovpetrovich@yandex.ru

Статья поступила 10.04.2017, подписана в печать 22.06.2017.

Исследованы квазипериодические вариации различных проявлений солнечной активности, параметров межпланетной среды, потока галактических космических лучей (ГКЛ) по данным стратосферного зондирования и измерений нейтронными мониторами. В диапазоне периодов менее 5 лет выделяются группы спектральных составляющих с периодами около 2 лет, 1.3 года и 1 года. Особое внимание уделено квазидвухлетним вариациям ГКЛ, которые вызваны аналогичными вариациями в среднем магнитном поле Солнца, играют важную роль в процессах солнечной активности.

Ключевые слова: квазипериодические вариации, солнечная активность, галактические космические лучи, межпланетное магнитное поле, среднее магнитное поле Солнца, частотный спектр, математический избирательный фильтр.

УДК: 523.2. РАСS: 96.50.-е.

Введение

Квазипериодические вариации различных проявлений солнечной активности (СА) и параметров межпланетной среды (ПМС), галактических космических лучей (ГКЛ) уже многие десятилетия привлекают внимание исследователей [1–11]. В работах [1–5] особое внимание уделяется квазидвухлетним вариациям (КДВ) космических лучей (КЛ) и их связям с солнечной активностью. В работах [6, 7] исследованы квазипериодические вариации длительностью до 5 лет и отмечены различия в длительности периодичностей в парах циклов СА четный-нечетный.

В работе [8] сообщается, что по гелиосейсмологическим наблюдениям обнаружены сильные колебания периодичности около 1.3 года в скорости вращения тахоклина, располагаемого в глубине солнечной конвективной зоны. Поскольку область тахоклина считается ожидаемым местом расположения солнечного магнитного динамо, его флуктуации могут модулировать генерацию магнитного потока и связанных с ними флуктуаций среднепериодных квазипериодичностей на поверхности Солнца и за его пределами. Соответственно предполагается, что гелиосферные среднепериодные квазипериодичности отражают аналогичные изменения в активности солнечного динамо. Найдено, что среднепериодные периодичности были особенно сильны в течение 22-го солнечного цикла и наблюдались два разных периода — 1.3 и 1.7 года одновременно. Эти периодичности были широтно организованы таким образом, что 1.3-летняя периодичность была обнаружена в скорости солнечного ветра на низких широтах и 1.7-летняя периодичность — в межпланетном магнитном поле в средних широтах. В то время как все гелиосферные результаты по 1.3-летней периодичности находятся в хорошем согласии с гелиосейсмологическими наблюдениям, 1.7-летняя периодичность не была обнаружена в них.

В работе [9] ряды ежедневных данных по интенсивности космических лучей, наблюдаемых на четырех нейтронных мониторах, были проанализированы с помощью вейвлет-преобразования в диапазоне периодов ~ 60-1000 дней. Показано, что основной вклад вносят три квазипериодических сигнала $(\sim 150$ дней, ~ 1.3 и ~ 1.7 года). В то время как 1.7-летняя квазипериодичность наиболее примечательна в исследуемом интервале в 21-м цикле СА, 1.3-летняя периодичность, которая лучше коррелирует с аналогичной периодичностью межпланетного магнитного поля, присутствует на убывающих фазах 20-го и 22-го циклов СА. Полученные результаты подтверждают различие в эволюции солнечной активности во время нечетных и четных циклов СА. В работах [10, 11] также выявлена 1.7-летняя квазипериодичность.

В работе [12] обнаружена значимая корреляция двухлетней вариации гелиосферного магнитного поля и интенсивности КЛ во время четных циклов, а также показано, что суперпозиция 11-летних и двухлетних вариаций КЛ может объяснить такие особенности модуляции КЛ, как ступеньки во временном ходе КЛ и эффект Гневышева в периоды максимумов СА. Выявлено запаздывание двухлетних вариаций КЛ относительно СА на 1–4 месяца для четных и 7–9 месяцев для нечетных циклов.

В работах [13, 14] проведено исследование квазипериодических осцилляций солнечной активности в диапазоне 1–4 года и показано, что они передаются в межпланетное пространство открытым магнитным потоком Солнца и порождают квазидвухлетние вариации космических лучей. В работе [15] рассматривается модель генерации двойного магнитного цикла и полагается, что он состоит из двух компонент: низкочастотной (22-летней) и высокочастотной (квазидвухлетней). В работе [16] найдена квазидвухлетняя вариация в спектре мощности общего магнитного поля Солнца.

1. Экспериментальные данные

В настоящей работе использован обширный материал за период 1958–2016 гг. по среднемесячным значениям интенсивности ГКЛ в стратосфере (Мурманск, остаточное давление 50 г·см⁻²,



Рис. 1. Среднемесячные данные: F28 — радиоизлучение Солнца на частоте 2800 МГц; МУР — данные по космическим лучам в стратосфере в Мурманске; МОСНМ — нейтронная компонента в Москве; ОУЛУНМ — нейтронная компонента в Оулу; Ар — индекс геомагнитной активности; СМП₊ — положительные, СМП₋ — отрицательные, |СМП| — абсолютные значения СМП; Н — напряженность межпланетного магнитного поля, V — скорость солнечного ветра, ψ — угол наклона гелиосферного токового слоя

данные Долгопрудненской научной станции ФИ-АН) [17] и нейтронной компоненты (Москва [18] и Оулу [19]), напряженности среднего магнитного поля Солнца как звезды (СМП, 1969-2016 гг.) и углам наклона гелиосферного токового слоя (ψ) [20], параметрам солнечного ветра: напряженности межпланетного магнитного поля ($MM\Pi$, |H|) и скорости солнечного ветра (CB, V, 1965-2016 гг.), геомагнитной активности (Ар-индекс) и потоку радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц (в тексте и на рисунках обозначено как F28) [21], по площадям солнечных пятен (S, данные Гринвичской обсерватории) [22]. При этом данные по СМП были сформированы из наблюдений Крымской и Стэнфордской обсерваторий, из которых рассчитаны три ряда: средние за месяц значения положительных ежедневных данных, СМП+, средние за месяц значения отрицательных ежедневных данных, СМП_, средние за месяц абсолютные значения, |СМП|.

На рис. 1 представлены все вышеперечисленные данные. По всем данным хорошо проявляется 11-летний ход, особенно ярко он представлен в солнечной активности, потоках космических лучей (по результатам спектрального анализа продолжительность 10.87 года), в среднем магнитном поле Солнца (11.0 года), межпланетном магнитном поле (10.9 года), в данных по углу наклона гелиосферного токового слоя (10.9 года).

2. Частотные спектры квазипериодических вариаций

Для изучения временных рядов использован метод спектрального анализа. Для периодов вариаций менее 5 лет рассчитывались спектры мощности разностей соседних данных для подавления высокоамплитудных низкочастотных вариаций, после чего в спектр вводились поправки для восстановления реальных амплитуд. Для более детального описания спектральных составляющих шаг по частоте брался в 30 и более раз меньше, чем при анализе по гармоникам основного периода.

На рис. 2 представлены частотные спектры вышеперечисленных данных и хорошо виден ярко выраженный пик, соответствующий квазидвухлетней вариации (1.7 года). Однако при расчете частотных спектров по циклам СА этот пик расщепляется [24].

Выделим спектральные составляющие, проявившиеся в нескольких параметрах (таблица) и выделяющиеся по своей амплитуде (амплитуды превышают 95%-й уровень значимости). В низкочастотной части спектра доминирует пик 20.4–20.8 мес (1.7 года) по всем параметрам, но в F28 и V он не является преобладающим. Хорошо выделенный годовой пик в КЛ находит также отражение в СМП и H. Годовая вариация СМП также вносит вклад в КЛ, наряду с годичным изменением гелиошироты Земли и влиянием поперечного градиента КЛ.

По данным за 5 циклов СА выделены наиболее устойчивые квазипериодические компоненты



Рис. 2. Спектры мощности среднемесячных данных, представленных на рис. 1. Пунктир — уровни 95% и 99% значимости

	Интервал времени вариации ГКЛ				
	06.66-6.76	01.78-05.86	01.87-12.92	07.96-07.01	07.02-06.11
Параметр	Коэффициенты корреляции, запаздывание ГКЛ от данного параметра (мес)				
Ар-индекс	-0.95 ± 0.01 1 мес	-0.94 ± 0.01 1 мес	-0.93 ± 0.01 1 мес	$\begin{array}{c} -0.89\pm0.02\\ 1 \text{ mec} \end{array}$	-0.75 ± 0.03 2 мес
СМП+	-0.89 ± 0.02 3 мес	-0.51 ± 0.05 1 мес	-0.90 ± 0.02 2 мес	$-0.92 \pm 0.01 \\ 6-7 \; \mathrm{mec}$	$\begin{array}{c}-0.67\pm0.04\\3\text{-}4\text{ mec}\end{array}$
СМП_	$\begin{array}{c} -0.60\pm0.05\\ 3\text{-}4 \ \text{mec} \end{array}$	-0.96 ± 0.01 3 mec	-0.85 ± 0.02 2 мес	-0.69 ± 0.05 3 mec	$\begin{array}{c} -0.68\pm0.03\\ 3 \text{ mec} \end{array}$
СМП	-0.81 ± 0.03 2-3 mec	$\begin{array}{c} -0.90\pm0.01\\ 2\text{3 mec} \end{array}$	-0.86 ± 0.02 2 мес	$\begin{array}{c} -0.83\pm0.03\\ 6 \text{ mec} \end{array}$	-0.68 ± 0.03 3 мес
Н	-0.93 ± 0.01 2 мес	-0.95 ± 0.01 2 мес	-0.92 ± 0.01 0 мес	-0.99 ± 0.01 1-2 мес	-0.92 ± 0.01 1 мес
V	-0.60 ± 0.04 0 мес	-0.88 ± 0.01 1 mec	-0.56 ± 0.05 0-1 mec	-0.67 ± 0.05 2-3 мес	-0.85 ± 0.02 2 мес
F28	-0.51 ± 0.05 5 мес	-0.28 ± 0.06 15 мес	$-0.91 \pm 0.01 \\ 4-5 \text{ mec}$	$\begin{array}{c}-0.76\pm0.04\\ 4 \text{ mec}\end{array}$	-0.53 ± 0.05 1 мес
ψ		$\begin{matrix} -0.81\pm0.02\\ 1 \text{ mec} \end{matrix}$	$-0.88 \pm 0.02 \\ 3-4 \text{ mec}$	$-0.88 \pm 0.02 \\ 5-6 \text{ mec}$	-0.55 ± 0.04 2 мес

Коэффициенты корреляции квазидвухлетних волн по данным измерений космических лучей в стратосфере (Мурманск) и по различным параметрам

как в потоках КЛ, так и в параметрах солнечной активности и межпланетной среды. В диапазоне менее 5 лет эти периодичности следующие (в месяцах): 60.0; 44.5; 36.9; 28.0; 20.8; 15.8; 12.0; 9.9; 8.6; 7.4; 6.0; 5.1. Соседние с перечисленными пики представляют собой боковые частоты, связанные с 11- и 22-летней модуляцией. Наличие выделенных пиков за такой большой промежуток времени свидетельствует о сохранении фаз этих составляющих спектра. Периодичность 1.7 года, четко присутствующая в потоках КЛ и СМП, свидетельствует о связи этой периодичности в КЛ с СМП. Эта же периодичность определяет характер инверсии магнитного поля Солнца в максимумах СА. Важно, что и угол наклона гелиосферного токового слоя проявляет те же основные периодичности, что и другие параметры солнечной активности.

3. Методика выделения квазидвухлетних вариаций

Поскольку квазидвухлетняя вариация играет важную роль в процессах, определяющих солнечную активность, эту вариацию рассмотрим отдельно и подробно.

Для выделения квазидвухлетних вариаций использовался математический избирательный фильтр, широко примененный в работах [1, 2, 4, 6, 7, 23], с весовой функцией

$$h(\tau) = rac{\sqrt{2}}{T} \exp\left\{-rac{\pi}{2} \left(rac{ au}{T}
ight)^2
ight\} \cos\left(rac{2\pi}{T} au
ight), \quad | au| < kT,$$

где T — исследуемый период, τ — текущий индекс, $2\tau_{max} + 1$ — память фильтра.



Рис. 3. Весовая функция (а) и частотная характеристика (б) избирательного фильтра, рассчитанные для обработки среднемесячных данных и выделения квазидвухлетних вариаций

На рис. З показаны весовая функция (а) и частотная характеристика (б) избирательного фильтра, рассчитанные для обработки среднемесячных данных и выделения квазидвухлетних вариаций. Как видно из частотной характеристики, на уровне 0.5 диапазон выделяемых периодов составляет от 17.5 до 37 мес. Поскольку в исследуемых данных присутствуют низкочастотные (НЧ) составляющие, имеющие амплитуды значительно превышающие амплитуды квазидвухлетних вариации, НЧ-составляющие могут заметно исказить квазидвухлетние вариации. Для исключения подобного воздействия было проделано следующее. Первичные данные аппроксимировались рядом Фурье с таким количеством гармоник, чтобы были хорошо описаны все НЧ-составляющие, превышающие период исследуемой вариации (было взято T = 22). Предварительно начало и конец массива выравнивались с помощью линейной функции, которая проводилась через начальные и конечные точки и вычиталась из первичных данных, чтобы не было разрыва функции на краях массива и не ухудшалась сходимость ряда. В качестве граничной частоты среза была подобрана частота, соответствующая периоду T = 30. При этом все НЧ-составляющие, включая T = 30, хорошо аппроксимировались рядом Фурье. Затем брались разности между первичными данными и аппроксимирующим рядом Фурье. В этих разностных данных уже отсутствуют все НЧ-составляющие вплоть до T = 30. Все высокочастотные составляющие, в том числе квазидвухлетняя вариация, оставались с неискаженными амплитудами.



Рис. 4. Гринвичские данные по площадям солнечных пятен с 1874 года (*S*) и квазидвухлетняя вариация, выделенная из них. Радиоизлучение Солнца на частоте 2800 МГц с 1947 года и квазидвухлетняя вариация, выделенная из них (*F*28)

Поскольку при фильтрации на концах рядов теряется по половине интервала весовой функции, для исключения этих потерь по краям массивов добавлялись нули, хотя точность фильтрации на этих участках падает. Следует отметить, что использованный избирательный фильтр хорошо локализован как по частоте, так и по времени и нисколько не уступает вейвлет-анализу для конкретной частоты.

4. Избирательная фильтрация квазидвухлетних вариаций

На рис. 4 представлены гринвичские данные по площадям солнечных пятен с 1874 г. и квазидвухлетняя вариация, выделенная из них. Как видно из рисунка, в солнечной активности квазидвухлетние вариации наблюдаются в максимумах активности, в отдельных циклах — на восходящей ветви и в мак-



Рис. 5. Поток радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц (верхний рисунок) и квазидвухлетние волны, выделенные избирательным фильтром из данных, представленных на рис. 1

симуме, в отдельных циклах — в максимуме и на нисходящей ветви СА. В минимумах СА амплитуда КДВ минимальна.

На рис. 5 представлены квазидвухлетние вариации по всем данным, используемым в настоящей работе. Несомненно, квазидвухлетняя вариация КЛ по данным стратосферы и нейтронных мониторов представляет собой ярко выраженный эффект с хорошо согласованными фазами и амплитудным ходом. Выделяются пять групп колебаний с амплитудами 2–3% по данным в стратосфере: 6.1966–6.1976, 1.1978–5.1986, 1.1987–12.1992, 7.1996–7.2001 и 7.2002–6.2011.

В отличие от СА по данным о площадях солнечных пятен и радиоизлучения на частоте 2800 МГц, в КЛ связь КДВ с фазами циклов СА выражена слабее. Наиболее четко КДВ потока ГКЛ выражена в максимумах и на нисходящих ветвях в 20-м-22-м циклах СА. Минимальные амплитуды КДВ потока ГКЛ наблюдаются в годы минимумов СА, что указывает на 11-летнюю модуляцию КДВ потока ГКЛ солнечной активностью. Однако в 23-м цикле СА КДВ в КЛ имеет понижение амплитуды в максимуме СА, а в 24-м цикле СА КДВ в стратосфере выходит из описанной зависимости. КДВ в геомагнитной активности так же, как и в потоке ГКЛ, хорошо выражена и имеет такой же амплитудный ход. В динамике КДВ различных рядов СМП имеются различия: в то время как в СМП и СМП временной ход близок и имеются четкие одновременные группы колебаний (в 1978–1984 и в 1988–1993 гг.), в СМП₊ заметная КДВ наблюдалась в 1972-1981 и сильная в 1988-1993 гг. В скорости СВ наибольший размах КДВ проявился примерно в те же периоды, что и в потоке ГКЛ и геомагнитной активности.

КДВ потока ГКЛ протекает в противофазе с вариацией СМП и до 1976 г. наблюдается хорошее соответствие с СМП₊, причем вариации потока ГКЛ отстают на 3 мес. В период 1978–1985 гг. КДВ потока ГКЛ лучше всего согласована с волной в СМП₋ и отстает от нее на 3 мес. В период 1988–1993 гг. все три ряда СМП дают хорошо выраженную по амплитуде КДВ, от которой КДВ потока ГКЛ отстает по фазе на 2 мес. В период 1997–2001 гг. отставание ГКЛ по фазе составляет 3–6 мес.

В таблице представлены коэффициенты корреляции между квазидвухлетними волнами по данным ГКЛ в стратосфере (рис. 5) в периоды, когда вариация в потоках космических лучей была ярко выражена, и в различных параметрах и временные сдвиги между ними. Поскольку корреляция проводилась для выделенных избирательным фильтром волн (шумовая составляющая сглажена), то значение придается только самым высоким коэффициентам корреляции. Как видно из таблицы, высокие коэффициенты корреляции имеются между КЛ в стратосфере и СМП₊ в 1-м, 3-м и 4-м периодах и с СМП₋ во 2-м периоде. Также высокие коэффициенты корреляции имеются между квазидвухлетними вариациями ГКЛ и *H*, между ГКЛ и Ар-индексом.

Кросс-корреляция H (для периода 1978–1994 гг.) относительно СМП дает коэффициент корреляции 0.90 \pm 0.01 с запаздыванием 1–2 мес. На рис. 6 в качестве примера приведены ежедневные данные за 2003 г. по среднему магнитному полю Солнца и данные о направлении межпланетного магнитного поля вблизи орбиты Земли со сдвигом 4 сут. Рисунок демонстрирует очень хорошую связь СМП и ММП, поскольку ММП образуется при вытягивании солнечных магнитных полей в межпланетное пространство.

Из данных по КДВ, представленных на рис. 5, можно также получить представление о том, как во времени ведет себя период квазидвухлетней вариации. Для этого по всем данным КДВ были рассчитаны длительности полуволн (как положительных, так и отрицательных) и затем удвоены. Анализ полученных таким образом периодов КДВ показывает, что периоды квазидвухлетней вариации космических лучей в стратосфере и на нейтронном мониторе изменяются одинаковым образом за весь



Рис. 6. Ежедневные данные за 2003 год по среднему магнитному полю Солнца (верхний рисунок, Стэнфорд) и данные о направлении межпланетного магнитного поля вблизи орбиты Земли со сдвигом 4 суток (нижний рисунок, уровень 1 — положительное, уровень минус единица — отрицательное направление)



Рис. 7. Частотные спектры квазидвухлетних волн, представленных на рис. 5

исследуемый интервал времени. Аналогично изменяется период КДВ по данным Ар-индекса и ММП. Можно констатировать, что периоды КДВ в стратосфере и на нейтронном мониторе одинаковым образом изменяются с соответствующими периодами в вариациях СМП.

Спектральный анализ квазидвухлетних волн, представленных на рис. 5, выделяет несколько пи-

ков в диапазоне 18.5–28.5 мес (рис. 7). При этом в СМП, F28, S и данных по КЛ четко проявляется пик 20.3–20.8 мес и пик 27.5–28.3 мес. В СА также выделяются пики 22.0–23.4 мес и 24.8–25.3 мес. Наибольшими по амплитуде в КЛ и СМП является пик 20.3–20.8 мес, а в F28 и S — пик 27.6–27.9 мес. Присутствие нескольких пиков в каждом из параметров (см. рис. 7) свидетельствует о сложном



Рис. 8. Квазидвухлетние волны, выделенные избирательным фильтром из данных, представленных на рис. 1, и квазидвухлетние спектральные составляющие, выделенные из этих волн (квазидвухлетняя с периодом около 1.7 года (около 20.5 мес), расположена под графиком соответствующей КДВ), взятые из спектров рис. 7

характере квазидвухлетних вариаций, непостоянстве периода этой вариации. И, как установлено в работе [24], имеются изменения периодов различных вариаций в парах четный-нечетный солнечных циклов.

Далее рассмотрим как ведет себя фаза квазидвухлетних вариаций в различных параметрах. На рис. 8 представлены КДВ различных параметров и спектральная составляющая для каждого параметра с максимальной амплитудой (квазидвухлетняя с периодом около 1.7 г. (около 20.5 мес), расположена под графиком соответствующей КДВ), взятые из спектров рис. 7. Сравнивать фазы этих синусоид с фазами КДВ параметров следует в те временные интервалы, где амплитуды КДВ превышают 1/4 от максимальной амплитуды, т.е. где КДВ однозначно выявлены достоверно. Хорошо видно, что по всем параметрам фазы квазидвухлетних вариаций сохраняются в течение многих десятилетий с незначительными отклонениями. Это свидетельствует о долготной стабильности областей на Солнце, ответственных за квазидвухлетнюю вариацию.

Заключение

По данным продолжительностью более 5 циклов СА выделены наиболее устойчивые квазипериодические компоненты как в потоках КЛ, так и в параметрах солнечной активности и межпланетной среды. В исследуемом диапазоне частот выделяются группы спектральных составляющих с периодами около двух лет, 1.3 года и одного года. По данным работы [24], периодичность 1.3 года проявляется в четных циклах СА. В потоках КЛ и напряженности СМП выявляется яркая квазидвухлетняя вариация.

В солнечной активности квазидвухлетние вариации ярко выражены при больших уровнях активности. В минимумах СА их амплитуды КДВ минимальны.

В стратосфере и в нейтронной компоненте наибольшего развития исследуемые квазидвухлетние вариации КЛ достигают в периоды максимумов и спадов солнечной активности (20-й—22-й циклы СА). В периоды минимумов СА их амплитуды минимальны. КДВ в КЛ имеют явно выраженную 11-летнюю модуляцию. В 24-м цикле СА эта связь нарушается.

Кросскорреляционный анализ показывает, что квазидвухлетние вариации КЛ в 1967–1976, 1987– 1992 и в 1996–2001 гг. более тесно связаны с казидвухлетней вариацией СМП₊, в 1978–1986 гг. с вариацией СМП₋. Однако в 1987–1992 гг. корреляционная связь одинаково хороша как с СМП₊, так и с СМП₋. Сдвиг по фазе между КЛ и СМП в различные периоды времени колеблется в интервале 2–6 мес.

Высокая корреляция КЛ наблюдается с ММП. Коэффициенты корреляции 0.90 с запаздыванием КЛ на 1–2 мес. Очень тесная корреляционная связь квазидвухлетней вариации космических лучей и квазидвухлетней вариацией среднего магнитного поля Солнца указывает на связь КДВ КЛ с КДВ СМП. Эта связь реализуется через через квазидвухлетнюю вариацию межпланетного магнитного поля.

Фаза квазидвухлетних вариаций сохраняется в течение многих десятилетий. Квазидвухлетний цикл СА играет важную роль при формировании структуры максимума солнечной активности.

Список литературы

- Chumbalova R.A., Erkhov V.I., Kolomeets E.V. et al. // Proc. 16th ICRC. Kyoto. 1979. 3. P. 348.
- Charakhchyan T.N., Okhlopkov V.P., Okhlopkova L.S. // Sixth European Cosmic Ray Symposium. Kiel. 1978. Vol. 36. P. 44.
- 3. Охлопков В.П., Охлопкова Л.С., Чарахчьян Т.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. **19**, № 3. С. 431.
- 4. Mitra B., Ganguly S.R. // Proc. 20th ICRC. Moscow. 1987. 3. P. 341.
- Okhlopkov V.P. // Proc. 22th ICRC. Dublin. 1991. 3. P. 431.
- 6. *Охлопков В.П.* // Астрон. вестн. 2000. **34**, № 2. С. 154.
- 7. *Охлопков В. П. //* Изв. РАН. Сер. Физ. 2017. **81**, № 2. С. 206.
- Mursula K., Vilppola J.H. // Solar Phys. 2004. 221. P. 337.
- Kudela K., Rybak J., Antalova A. et al. // Solar Phys. 2002. 205, N 1. P. 165.
- Kato C., Munakata K., Yasue S. et al. // J. Geophys. Res. (Space Physics). 2003. 108, N A10. P. 1367.
- Rybak J., Antalova A., Storini M. // Space Sci. Rev. 2001. 97. P. 359.
- Laurenza M., Vecchio A., Storini M., Carbone V. // Astrophys. J. 2012. 749, N 2. P. 167.
- Bazilevskaya G., Broomhall A.M., Elsworth Y., Nakariakov V.M. // Space Sci. Rev. 2014. 186, N 1–4. P. 359.
- 14. Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др. // Космич. исслед. 2016. **54**, № 3. С. 181.
- Benevolenskaya E.E. // Astrophys. J. Lett. 1998. 509.
 P. 49.
- Котов В.А., Демидов М.Л., Ханейчук В.И. и др. // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. 1998. 94. С. 118.
- Stozhkov Y.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. Data on galactic cosmic ray fluxes according to the measurement in the atmosphere (1957–2007). Preprint of Lebedev Physical Institute, RAS. Moscow: 2007.
- http://www.wdcb.ru/stp/data/cosmic.ray/Neutron_ Monitors(monthly_values)/.
- 19. http://cosmicrays.oulu.fi/
- 20. http://wso.stanford.edu/
- 21. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html
- 22. http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml
- Охлопков В.П. // Вариации космических лучей и исследования космоса: Сб. статей. М.: Наука, 1986. С. 250.
- 24. Охлопков В.П. // Вестн. Моск. ун-та.. Физ. Астрон. 2011. № 1. С. 91. (Okhlopkov V.P. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2011. **66**, N 1. P. 99.)

Quasiperiodic variations of solar activity and cosmic rays

V. P. Okhlopkov

Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: ovpetrovich@yandex.ru.

Quasiperiodic variations of various manifestations of solar activity, parameters of the interplanetary medium, and the flux of galactic cosmic rays (GCRs) are studied using the data of stratospheric sounding and measurements with neutron monitors. Groups of spectral components with periods of ~ 2 , 1.3, and ~ 1 year are identified in the range of periods shorter than 5 years. Particular attention is paid to quasi-2-year GCR variations that are induced by similar variations of the mean magnetic field of the Sun and are integral to the processes of solar activity.

ВМУ. Серия З. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2018. № 2

Keywords: quasiperiodic variations, solar activity, galactic cosmic rays, interplanetary magnetic field, mean magnetic field of the Sun, frequency spectrum, mathematical selective filter. PACS: 96.50.-e.

Received 10 April 2017.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2018. 72, No. 2. Pp. 223-233.

Сведения об авторе

Охлопков Виктор Петрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (495) 939-52-33, e-mail: ovpetrovich@yandex.ru.