

7. Бочкарев О.Б., Васильев О.Ф., Квон В.И. // ДАН. 1996. **349**, № 4. С. 530.
8. Цветова Е.А. Вычислительные технологии. 1997. **2**, № 2. С. 102.
9. Ковалев В.А., Орданович А.Е. Физико-математическая модель турбулентного горизонтального стратифицированного потока с учетом когерентных структур. Ч. 1. Построение модели. Деп. ВИНТИ. № 2771-81. М., 1981.
10. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1967.
11. Грязнов В.Л., Полежаев В.И. Исследование некоторых разностных схем и аппроксимация граничных условий для численного решения уравнений тепловой конвекции. Препринт ИПМ АН СССР № 40. М., 1974.
12. Бычкова И.А., Викторов С.В., Демина М.Д. // Океанология. 1989. **29**, № 5. С. 551.
13. Науменко М.А. // Метеорология и гидрология. 1989. № 6. С. 89.
14. Brooks I., Lick W. // J. Geophys. Res. 1972. **77**, No. 30. P. 6000.
15. Huang J.C.K. 1972. **3**, No. 1. P. 1.

Поступила в редакцию
18.07.01

АСТРОНОМИЯ

УДК 523.98

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Л.М. Козлова

(ГАИШ)

E-mail: klm@sai.msu.ru

На основе ряда относительных чисел Вольфа для периода 1500–2000 гг. исследуется связь фундаментального 11-летнего цикла солнечной активности с циклами большей длительности: 100-летним, или вековым, и 600-летним. Связь и взаимодействие циклов разных периодов используется при долгосрочном прогнозе солнечной активности. Показано, что долгопериодические модуляции мощности и длительности 11-летних циклов позволяют объяснить низкий уровень солнечной активности в период минимума Маундера. Предлагается новый метод долгосрочного прогноза основных характеристик текущего 23-го и будущих 11-летних циклов.

Введение

Вопрос о существовании периодической деятельности Солнца изучается более 100 лет, начиная со времени открытия Швабе и Вольфом 11-летнего цикла солнечных пятен. Однако большой разброс прогнозируемых характеристик 11-летних циклов показывает, что до настоящего времени нет единой точки зрения на природу временных изменений солнечной активности. Например, данные предварительного прогноза максимального значения чисел Вольфа W_M в 23-м цикле отличаются у разных авторов, использующих различные методы прогноза, более чем в 1.5 раза [1].

В настоящей работе использован современный подход к изучаемой проблеме, согласно которому временные изменения солнечной активности представляют собой циклический процесс, включающий как случайную компоненту, составляющую, по некоторым данным [2], до 20 %, так и сложнопериодическую. Эта точка зрения основана на наличии в циклах активности наблюдаемых «внутренних» закономерностей и на изучении этих закономерностей в циклах разной периодичности.

Выделение векового цикла

Целью настоящего исследования является получение долговременного прогноза основных характеристик текущего 23-го 11-летнего цикла и следующих циклов — 24-го и 25-го на основе наблюдаемых взаимосвязей циклов разных периодов. В качестве основных характеристик 11-летних циклов выбраны три параметра: максимальные (сглаженные по 12 месяцам) значения относительных чисел Вольфа в циклах (W_M), время достижения W_M в каждом цикле (T_1) и общая продолжительность циклов (T).

Известно, что эпохи экстремумов вековых циклов наиболее надежно определяются различными методами векового сглаживания ряда чисел Вольфа [2–6]. Так, в работе [5] для выделения вековых циклов производится скользящее сглаживание чисел Вольфа по 44 годам. Результаты такого сглаживания за период 1722–1944 гг., представленные в работе [5], имеют достаточно четко выраженные максимумы и минимумы вековых циклов, но охватывают менее двух полных 90-летних циклов, поэтому эти данные статистически малодостоверны и не дают оснований для надежного прогноза. В работе [6] ме-

годами линейной полосовой фильтрации исследован цюрихский ряд чисел Вольфа, полученных с 1750-го по 1970 г. В этой работе на рис. 2 хорошо видна модуляция мощности 11-летних циклов циклом с периодом ~ 100 лет.

В настоящей работе использованы современные уточненные данные цюрихского ряда среднемесячных сглаженных чисел Вольфа с 1749-го по 2000 г., полученные по системе Интернет из Стенфорда. Чтобы более надежно выявить и исследовать свойства 100-летних, или вековых, циклов и, возможно, более длительного 600-летнего цикла, этот ряд чисел Вольфа был дополнен рядом W_M , полученным Вольфом до 1601 г. и расширенным затем Д. Шове до 1500 г. [2, 4].

Для выделения вековых циклов из данного ряда применялся метод векового сглаживания, впервые предложенный Глайссбергом (см., напр., [4]). Согласно этому методу, сглаженные величины максимальных чисел Вольфа \widetilde{W}_M в 11-летних циклах определяются по формуле

$$\widetilde{W}_{M,j} = \frac{1}{8} [W_{M,j-2} + 2(W_{M,j-1} + W_{M,j} + W_{M,j+1}) + W_{M,j+2}],$$

где $W_{M,j}$ — значение W_M , полученное из наблюдений в цикле с номером j .

На рис. 1 точками и кривой 1 представлена временная зависимость наблюдаемых W_M для циклов от -22-го до +23-го, т. е. для периода 1500–2000 гг. Для 23-го цикла в качестве W_M принято предварительное значение 120.7, полученное из наблюдений в мае 2000 г. Кружки и проведенная по ним кривая 2 на рис. 1 представляют ход сглаженных методом Глайссберга чисел $\widetilde{W}_{M,j}$. Как видно из рис. 1, путем подавления 11-летних и промежуточных 50-летних колебаний метод Глайссберга позволяет достаточно надежно выделить экстремумы пяти вековых циклов, наблюдавшихся в рассматриваемый период времени. Границы вековых циклов, обозначенных нами римскими цифрами I–V, показаны вертикальными черточками под кривыми 1 и 2. Экстремумы циклов I, III–V на кривой 2 выражены достаточно четко. Заметим, что экстремумы вековых циклов III–V хорошо согласуются (с точностью до 5 лет) с экстремумами, выделенными другими методами в работах [5, 6]. Даже в вековом цикле II (XVII в.), включающем в себя минимум Маундера 1645–1710 гг. с аномально низким уровнем солнечной активности, на кривой 1 четко выделяются два невысоких пика длительностью ~ 50 лет каждый. Средняя продолжительность 11-летних циклов по всему представленному ряду начиная с 1500 г. составляет $\overline{T}_{11} = (11.00 \pm 1.23)$ года, для цюрихского ряда (циклы 1–22) — $\overline{T}_{11} = (10.92 \pm 1.12)$ года.

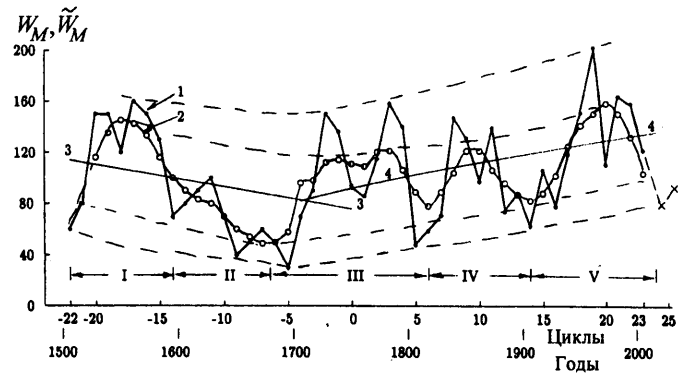


Рис. 1. Временные изменения наблюдаемых максимальных чисел Вольфа W_M (точки и кривая 1) и сглаженных методом Глайссберга значений \widetilde{W}_M (кружки и кривая 2). Выделение вековых циклов I–V и 600-летнего цикла

Как видно, присоединение к более поздним и более качественным данным цюрихского ряда W_M (циклы 1–22) менее качественных ранних (циклы -22–0), полученных в дотелескопическую эпоху по визуальным и косвенным данным, незначительно изменяет среднюю продолжительность 11-летних циклов (на 0.1 года или на 0.9% при дисперсии в 1.2 года). Средняя продолжительность векового цикла, определенная по всему ряду данных, равна $\overline{T}_{100} = (100.3 \pm 11.6)$ года.

Отметим также две важные особенности вековых циклов, которые отличают их от 11-летних циклов. Во-первых, все пять вековых циклов, согласно кривой 1, имеют двухвершинную форму, т. е. существует провал в их максимуме длительностью от одного до четырех 11-летних циклов. Во-вторых, в отличие от 11-летних циклов, которые имеют несимметричную форму с центром тяжести на фазе спада цикла, вековые циклы (согласно кривой 2) обнаруживают четко выраженную симметрию крыльев относительно максимума цикла. Это свойство векового цикла будет использовано ниже при прогнозе характеристик 23, 24 и 25-го циклов. Следует отметить, что отмеченные отличия векового цикла от основного 11-летнего свидетельствуют о том, что вековой цикл существует реально, т. е. он представляет собой некую особую характеристику солнечной цикличности, а не является суперпозицией солнечных циклов меньшей длительности, как считали некоторые исследователи (см. в работах [2–4]).

Выделение 600-летнего цикла

Циклы продолжительностью около 600 лет обнаруживаются в разного рода исследованиях, например, в косвенных проявлениях солнечной активности при подсчете числа комет, видимых невооруженным глазом, при исследовании цикличности по кольцам деревьев, по данным распада радиоуглерода. Есть также работы, указывающие на проявления этого цикла в геологических, климатических и социологических процессах. Но характерные признаки существования 600-летнего цикла выявляются

и при исследовании длительного ряда амплитуд, продолжительности фазы роста и общей продолжительности 11-летних циклов, а также амплитуд вековых циклов. Так, при изучении изменения со временем максимумов 11-летних циклов, проявляемых в числах Вольфа W_M , обнаруживается (см. рис. 1) отрицательный тренд для периода от -22 -го до -5 -го цикла и такой же по величине, но положительный тренд для периода от -5 -го до $+23$ -го цикла. Эти тренды показаны на рис. 1 прямыми 3 и 4, построенными методом наименьших квадратов для соответствующих рядов W_M . Аналогичные тренды с минимумом в районе -5 -го и -7 -го 11-летних циклов наблюдаются и при исследовании амплитуд вековых циклов, что также видно на рис. 1. Пунктирные линии, соединяющие между собой максимумы или минимумы вековых циклов сглаженной кривой 2, показывают аналогичный ход изменения \widetilde{W}_M с минимумом также в районе от -5 -го до -7 -го 11-летних циклов. Если расстояние от -6 -го до $+22$ -го цикла принять за полупериод предполагаемого сверхвекового цикла, то полный период этого цикла будет иметь значение около 600 лет. Как будет показано ниже, использование этого периода в прогностической практике весьма оправдано.

Особый интерес представляет изучение изменений со временем таких важных характеристик 11-летних циклов, как продолжительность фазы роста T_1 , фазы спада T_2 и общей продолжительности цикла T . Связь этих характеристик с W_M в циклах часто используется для среднесрочного и краткосрочного прогнозов солнечной активности. На рис. 2, *а* линией 1 показан тренд увеличения продолжительности фазы роста T_1 примерно на 1.5 года за период от -22 -го до -5 -го цикла и линией 2 — такой же по величине тренд уменьшения T_1 за период от -5 -го до $+23$ -го цикла. Изменение продолжительности фазы спада T_2 11-летних циклов обнаруживают слабый тренд на 0.6–0.8 года противоположного направления, что отражено на рис. 2, *б* аналогично линиями 1 и 2. Другими словами, изменения длительности фазы спада T_2 как бы частично компенсируют изменения длительности фазы роста T_1 . Изменения общей длительности 11-летних циклов $T = T_1 + T_2$, следуя обнаруженной зависимости изменений T_1 и T_2 , проявляет тенденцию слабого увеличения на 0.6–0.7 года в первой половине рассматриваемого периода и соответственного уменьшения — во второй половине. Эти изменения T показаны на рис. 2, *в*. Видно, что изменения этих временных характеристик, так же как и изменения W_M , имеют экстремум в районе -5 -го 11-летнего цикла. Это служит дополнительным доказательством реальности долговременных изменений W_M с периодом порядка 600 лет и подтверждает обратную пропорциональную связь, существующую между W_M и T_1 в 11-летних циклах, часто используемую для прогноза.

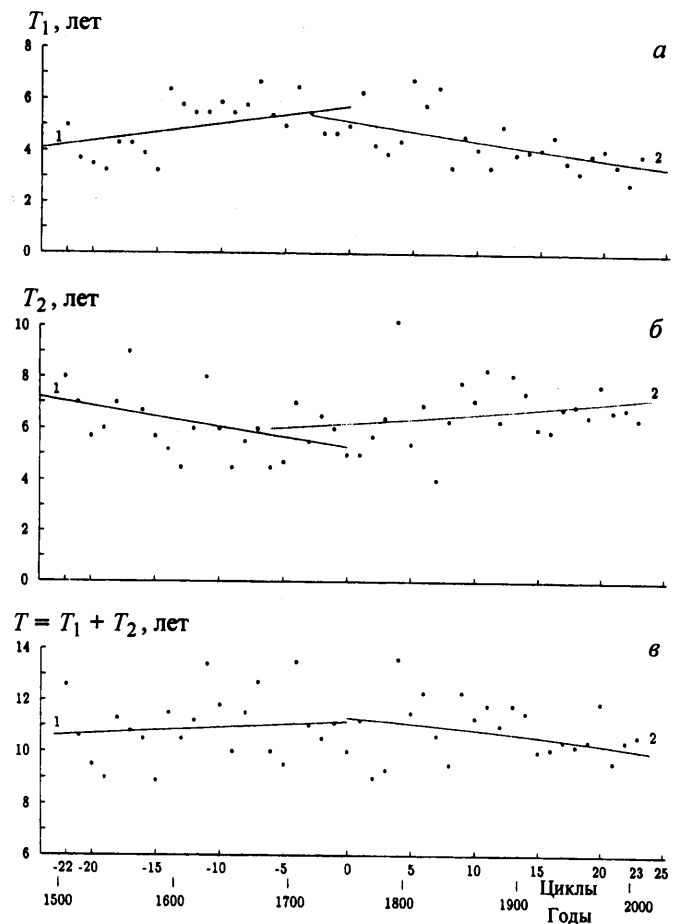


Рис. 2. Изменения временных характеристик 11-летних циклов

Отметим также, что вариации отдельных значений T_1 , T_2 и T от линий средних значений 1 и 2, показывающих соответствующий тренд, также обнаруживают определенную зависимость со временем. А именно: на рис. 2, *а, б, в* эти вариации уменьшаются со временем от -22 -го до $+22$ -го цикла примерно в два раза. Особенно это уменьшение заметно в последних циклах: от $+8$ -го до $+22$ -го. По-видимому, это связано с улучшением качества наблюдательного материала, а именно с повышением точности определения временных характеристик циклов.

О наблюдениях солнечной активности в минимуме Маундера

Как показывают исследования (см. рис. 1), амплитудные характеристики 11-летних и 100-летних циклов имеют подобный временной тренд с минимумом в диапазоне от -5 -го до -7 -го цикла. Этот минимум, по-видимому, соответствует минимуму наблюдаемого 600-летнего цикла и в то же время совпадает с периодом минимума Маундера (1645–1710 гг.). Вероятно, аномально низкий уровень солнечной активности в этот период был вызван суперпозицией минимумов колебаний разных периодов. Другими словами, возможно, что совпадение минимумов 100-летних и 600-летних колебаний в

этот период подавило более мощные 11-летние колебания. Интересно было бы проследить за подобными ситуациями по более длинному ряду какого-либо индекса солнечной активности, охватывающему несколько 600-летних периодов.

Оценим длительность экстремумов 600-летнего цикла. Поскольку минимум Маундера продолжался немногим более 50 лет (по некоторым оценкам, с 1645-го по 1710 г.) и минимум 600-летнего цикла имеет примерно такую же продолжительность (см. рис. 1), то следует ожидать и такой же длительности максимума 600-летнего цикла, который наблюдается в нашу эпоху. Если за начало текущего максимума 600-летнего цикла принять 11-летний +18-й цикл с довольно высоким значением $W_M = 151.8$ и следующие циклы: 19, 21 и 22-й были также высокими (цикл 20 выявляет провал в характеристике 100-летнего цикла XX в.), то, по-видимому, 22-й цикл должен завершать максимум текущего 600-летнего цикла, за которым последует продолжительный спад сверхвекового цикла. Это обстоятельство необходимо учитывать при долгосрочном прогнозировании будущих 11-летних циклов солнечной активности.

Методика прогноза. Прогноз высоты циклов

Предлагаемый метод сверхдолгосрочного прогноза (для 23, 24 и 25-го циклов) основан на использовании связей основных характеристик 11-летних, вековых и 600-летнего циклов. Из рис. 1 (кривая 2 для сглаженных \widetilde{W}_M) видно, что вековой цикл XX столетия (обозначен на рис. 1 цифрой V) похож по форме и количественным характеристикам на вековой цикл XVI столетия (I). Это позволяет использовать вековой цикл I как цикл-аналог для прогнозирования ветви спада текущего векового цикла V. На рис. 3, а, б представлены вековые циклы I и V вместе с составляющими их 11-летними циклами, номера которых по цюрихской нумерации обозначены над их вершинами. Как и на рис. 1, светлыми кружками здесь показаны сглаженные методом Глайссберга значения \widetilde{W}_M .

Целью настоящего исследования является прогноз высоты циклов W_M , длины ветви роста T_1 и общей продолжительности T текущего 23-го и будущих 11-летних циклов. Используя свойства симметрии вековых циклов относительно их вершины (см. выше), а также подобие формы вековых циклов I и V, можно найти их оси симметрии по сглаженным данным этих циклов. Они отмечены на рис. 3, а, б вертикальными черточками на вершинах вековых циклов. Так, максимум текущего векового цикла приходится примерно на 1965 год. Затем, используя свойства симметрии векового цикла, находим из рис. 3, б значения сглаженных по Глайссбергу \widetilde{W}_M : для 21-го цикла $\widetilde{W}_M(21) = 148$, для 22-го цикла $\widetilde{W}_M(22) = 135$ и для 23-го $\widetilde{W}_M(23) = 104$. Подставляя последовательно эти значения сглаженных \widetilde{W}_M

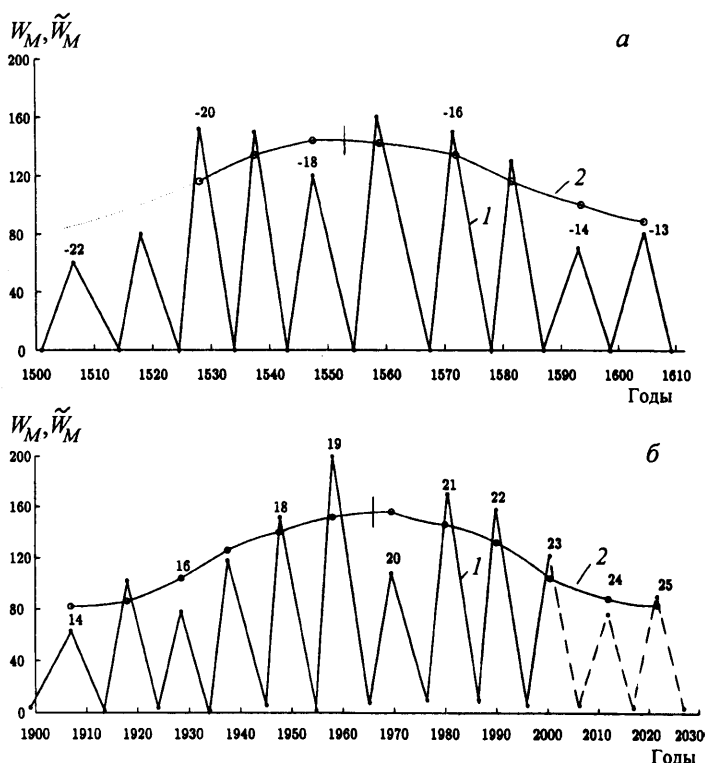


Рис. 3. Изменения со временем W_M (точки и кривая 1) и \widetilde{W}_M (кружки и кривая 2) в вековых циклах I (а) и V (б). Прогноз 11-летних циклов 23, 24 и 25

в левую часть формулы Глайссберга, находим прогнозируемые наблюдаемые значения максимумов: $W_M(23) = 115.5$, $W_M(24) = 82$ и $W_M(25) = 84$. Эти значения W_M будем считать предварительными. Как видно, значения прогнозируемых W_M в циклах 23, 24 и 25 дают дополнительное основание предполагать постепенный спад значений W_M в 600-летнем цикле, начиная с цикла 23.

Прогноз временных характеристик циклов

С целью проверки и статистического улучшения прогноза W_M , а также для определения временных характеристик прогнозируемых циклов воспользуемся соответствующими уже наблюдаемыми данными из цикла-аналога XVI века и характеристиками 11-летних циклов XX века, расположенными на ветви его роста симметрично прогнозируемым циклам. Так, для цикла 23 за такие циклы-аналоги можно принять циклы -15 и +17, для 24-го цикла - соответственно циклы -14 и +16, для 25-го - циклы -13 и +15. Характеристики этих циклов-аналогов (W_M , T_1 и T) приведены в таблице (колонки 4, 5 и 6). Во 2-й колонке содержатся предварительные данные по W_M , полученные в предыдущем разделе. В колонках 7, 8 и 9 представлены средние значения прогнозируемых характеристик и диапазоны их изменений, причем средние значения W_M получены путем усреднения с равными весами трех значений W_M , взятых из колонок 2 и 4. По данным таблицы построены прогнозируемые циклы 23, 24 и 25 на

Прогноз		Циклы-аналоги				Средние значения и диапазон изменения (прогноз)		
Номер цикла	W_M	Номер цикла	W_M^{exp}	T_1 , лет	T , лет	\overline{W}_M (ΔW_M)	\overline{T} , лет (ΔT_1)	\overline{T} , лет ($\Delta \overline{T}$)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
23	115.5	-15 +17	130 119.2	3.6 3.6	9.2 10.4	121.6 (115.5-130)	3.6 (3.6-3.6)	9.8 (9.2-10.4)
24	82	-14 +16	70 78.1	6.2 4.7	11.5 10.1	76.7 (70-82)	5.4 (4.7-6.2)	10.8 (10.1-11.5)
25	84	-13 +15	80 105.4	5.2 4.1	10.0 10.0	89.8 (80-105.4)	4.6 (4.1-5.2)	10.0 (10.0-10.0)

рис. 3, б, которые показаны пунктиром. На рис. 1 циклы 24 и 25 отмечены крестиками. Как видно, эти циклы не нарушают симметричной формы векового цикла V, а также согласуются с трендом W_M 600-летнего цикла.

Данные полученного прогноза по текущему 23-му циклу частично (для W_M и T_1) уже могут быть проверены путем непосредственного сравнения с наблюдаемым в мае 2000 г. максимумом сглаженных по 12 месяцам чисел Вольфа W_M , равным 120.7 при $T_1 = 3.8$ года. Эти данные получены из Стенфорда по Интернету. Согласно таблице, по нашему прогнозу в 23-м цикле возможен максимум $W_M(23) = 121.6$, который должен наступить через 3.6 года после последнего минимума, наблюдавшегося в октябре 1996 г. Отсюда следует, что данные нашего прогноза на текущий 23-й цикл достаточно хорошо совпадают с данными наблюдений чисел Вольфа в этом цикле.

Закключение

На основе длительного ряда наблюдений относительных чисел Вольфа показана тесная связь циклов разных периодов. Предложенный метод долгосрочного прогноза, основанный на «внутренних» особенностях и связях циклов различной длительности, дал для 23-го цикла вполне надежные результаты, подтвержденные наблюдениями. В будущем плани-

руется представить прогноз на 23-й цикл, полученный другим, более краткосрочным методом, который основан только на внутренних связях самого прогнозируемого 11-летнего цикла. Заметим только, что прогнозируемые значения главных характеристик 23-го цикла, полученные как в долгосрочном прогнозе, представленном в настоящей работе, так и в краткосрочном (будет представлен позже), хорошо согласуются между собой и с данными наблюдений.

Литература

1. *Joselyn J.A., Anderson J., Coffey H. et al.* Solar Cycle 23 Project: Summary of Panel Findings. NOAA Technical Memorandum, Conf. Sept. 9-25, 1996, Boulder, Colorado (<http://www.sel.noaa.gov/info/Cycle23.html>).
2. *Витинский Ю.И.* Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973.
3. *Рубашев Б.М.* Проблемы солнечной активности. М.; Л.: Наука, 1964.
4. *Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986.
5. *Витинский Ю.И.* // Солн. данные. 1968. № 2. С. 90.
6. *Ривин Ю.Р.* // Солн. данные. 1977. № 11. С. 63.

Поступила в редакцию
19.09.01