

Активность атмосфер Солнца и звезд солнечного типа на одиннадцатилетней и квазидвухлетней временных шкалах

Е. А. Бруевич^а, Э. В. Кононович

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Университетский просп., д. 13.

E-mail: ^аred-field@yandex.ru

Статья поступила 31.05.2010, подписана в печать 07.09.2010

Наблюдения временных рядов индексов солнечной активности сравниваются с новыми одно-временными наблюдениями вариаций потоков фотосферного и хромосферного излучения 33 звезд программы «НК-проекта», проведенными в течение последних 20 лет. У этих звезд помимо ранее известной, обнаруженной в обсерваториях Маунт Вилсон и Стенфордского университета, циклически хромосферного излучения звезд на одиннадцатилетней временной шкале, нами выявлена циклическая, подобная квазидвухлетним вариациям (КДВ) потоков излучения Солнца. Представлены результаты вычислений периодов вариаций потоков излучения звезд на квазидвухлетней шкале.

Ключевые слова: Солнце, звезды солнечного типа, активные области, одиннадцатилетние и квазидвухлетние циклы активности.

УДК: 523.345; 523.98. PACS: 96.60.Mz, 96.60.Na, 96.60.qd, 97.20.Jg.

Введение

Фотометрические наблюдения звезд с активными атмосферами, регулярно проводимые в оптическом диапазоне с середины XX в., выявили у части из них малоамплитудную переменность, вызванную главным образом наличием на поверхности звезд темных пятен, подобных солнечным. Чуть позже в обсерватории Маунт Вилсон была начата обширная программа одно-временных наблюдений более сотни звезд с выраженной хромосферной активностью по типу солнечной. Эти наблюдения — программа «НК-проекта» — продолжаются более 40 лет с 1965 г. по настоящее время [1, 2].

В рамках «НК-проекта» производится определение отношения потока излучения в центрах эмиссионных линий H и K Ca II (396.8 и 393.4 нм соответственно) к потоку излучения в близлежащем континууме (400.1 и 390.1 нм), названного авторами наблюдений индексом S_{CaII} . Этот индекс S_{CaII} является хорошим индикатором хромосферной активности как Солнца, так и звезд.

Для расчетов периодов циклической активности атмосфер Солнца и звезд нами используются новые данные одновременных наблюдений вариаций потоков как фотосферного и так и хромосферного излучения Солнца и 33 звезд программы «НК-проект», полученные в течение последних 20 лет в Лоувелловской (фотометрические наблюдения) и Смитсоновской обсерваториях Стенфордского университета (наблюдения в хромосферных линиях) [1].

Главная цель настоящей работы — подтверждение существования циклических вариаций на квазидвухлетней временной шкале у большей части исследуемых звезд солнечного типа, а также определение периодов этих вариаций.

1. Долговременные изменения активности звезд солнечного типа

Солнечная и звездная активность — это совокупность регулярных появлений в атмосфере характер-

ных образований, связанных с выделением большого количества энергии, частота и интенсивность которых циклически изменяются.

В настоящей работе мы рассматриваем циклические вариации потоков излучения атмосфер на одиннадцатилетней и квазидвухлетней временных шкалах. Длительность так называемого одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на самом деле изменяется у Солнца от 8 до 15 лет за многие годы наблюдений. Речь идет о регулярных наблюдениях солнечной активности в течение последних полутора веков, а также о косвенных данных, в том числе радионуклидах и др., на временных шкалах порядка 1000 лет. Основными индексами солнечной активности, характеризующими излучение полного диска Солнца, являются числа Вольфа (самые длинные по времени ряды наблюдений) и поток радиоизлучения на волне 10.7 см ($F_{10.7}$). Внеатмосферные наблюдения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах от всего солнечного диска и от отдельных активных областей (характеризующие активность на различных высотах атмосферы) начаты в шестидесятые годы прошлого века. Эти важные для понимания природы солнечной активности наблюдения, к сожалению, менее регулярны по сравнению с наземными наблюдениями, что зависит от времени работы соответствующей аппаратуры на околоземной орбите. Однако согласно многочисленным исследованиям солнечных индексов активности, в частности потоков в отдельных линиях в коротковолновой области спектра, все они достаточно хорошо коррелируют с числами Вольфа и с более объективным индексом активности $F_{10.7}$.

Наблюдения звезд дают нам информацию только о величине потоков излучения от полного диска. Выбирая звезды, наиболее близкие по своим характеристикам к Солнцу, мы переносим знания о физических процессах в солнечной атмосфере на эти звезды, что дает возможность успешно интерпретировать изменения потоков излучения от них. Естественно, Солнце и каждая отдельная звезда солнечного типа имеют

различия в массе, плотности, температуре поверхности, общей площади пятен, их контрастности, зависимости температуры фотосферы и хромосферы от высоты, площади и контрастности факелов и по многим другим параметрам. Анализ наблюдений вариаций потоков излучения Солнца и звезд солнечного типа дает основание предположить, что атмосферы большей части этих звезд имеют подобное солнечной атмосфере строение. Различие лишь в параметрах, зависящих от массы звезды, ее спектрального класса, возраста, химсостава и проч. Такой подход позволяет успешно интерпретировать наблюдения вариаций потоков излучения многих звезд солнечного типа, рассматривая эти звезды как прообразы Солнца, в частности на разных стадиях эволюции.

У звезд «НК-проекта» периоды одиннадцатилетней циклической активности (по наблюдениям в течение 40 лет [1, 2]) мало изменяются по величине для одной звезды и варьируются от 7 до 20 лет для разных звезд, у которых эта активность выявлена (примерно у 30% из общего числа звезд этой программы).

Образованиями на диске, отвечающими за вневысшечную активность атмосфер звезд солнечного типа, являются (по аналогии с детально изученными образованиями на Солнце) пятна и факелы в фотосфере,

флокулы в хромосфере, протуберанцы и выбросы корональной массы в короне. Области, где в совокупности наблюдаются эти явления, называются центрами активности или активными областями.

Таким образом, при анализе потоков излучения как в линиях H и K Ca II (чувствительных к хромосферной активности), так и потоков от всего диска в широкополосных фильтрах фотометрической системы, близкой к UVB [1, 2], для Солнца и звезд нужно учитывать вклад от существующих на диске активных областей. Активные области образуются там, где из-под фотосферы появляются сильные магнитные поля. То есть различные проявления активности атмосфер Солнца и звезд являются результатом эволюции магнитных полей. В этом участвуют как глобальные магнитные поля, так и локальные; важно также их взаимодействие с замагниченным веществом в подфотосферных слоях звезд, вовлеченных в конвективные движения. По размерам и продолжительности существования активные области сильно различаются — они могут наблюдаться от нескольких часов до нескольких месяцев.

Ранее показано, что из всей совокупности звезд солнечного типа, относящихся к звездам спектральных классов *F, G* и *K* главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга–Ресселла, регулярная цик-

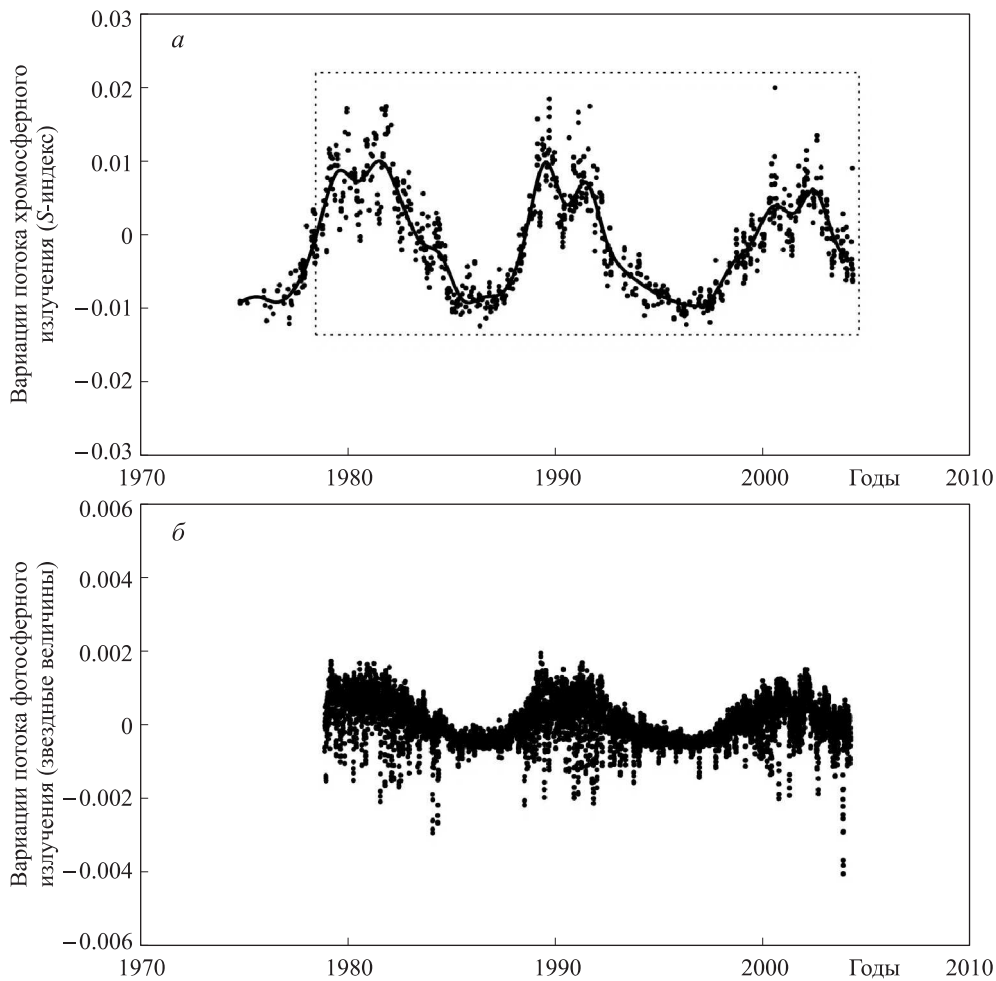


Рис. 1. Вариации потоков излучения для Солнца за период с 1970 по 2004 г. согласно наблюдениям [1]: а — наблюдения в линиях ионизованного кальция, результаты представлены в величинах S-index, б — наблюдения в фотометрической системе *uvby*, результаты представлены в звездных величинах

личность хромосферной активности по типу солнечной чаще наблюдается у звезд поздних спектральных классов G и K , имеющих достаточно сформированные подфотосферные конвективные зоны [3]. Эти звезды относительно медленно вращаются вокруг своей оси (период вращения составляет порядка 25–45 сут, в отличие от 3–10 сут у звезд с тонкими подфотосферными конвективными зонами). Солнце, звезда класса $G2$, вращается относительно звезд с периодом 25 сут. Периоды вращения вокруг своей оси для выборки исследуемых звезд T_{rot} , а также их спектральный класс, качество их одиннадцатилетней цикличности и значения соответствующих периодов $T_{11}^{\text{НК}}$ согласно ранее проведенным оценкам из [2] представлены в таблице.

На рис. 1 представлены изменения потоков излучения для Солнца, а на рис. 2 для одной из исследуемых звезд HD 18256 из [1]. На рис. 1, *a* и 2, *a* приведены изменения потоков излучения, наблюдаемые в линиях H и K Ca II, характеризующие излучение хромосфер Солнца и звезды соответственно. На рис. 1, *б* и 2, *б* приведены вариации фотосферного излучения Солнца и звезды соответственно.

Выше мы упоминали, что в основе всех интерпретаций вариаций потоков излучения звезд лежит следующее предположение: на звездах солнечного типа (и это подтверждается всеми наблюдениями) существуют такие же активные области, эволюционирующие в течение одного или нескольких периодов вращения вокруг своей оси по тем же законам, что и на Солнце. Кроме того, сама временная зависимость вариаций потока излучения Солнца и звезд, в которой учтена вращательная модуляция (временная шкала — около месяца), на больших масштабах (порядка нескольких лет) имеет вид некой синусоиды с периодом T_{11} (соответствует одиннадцатилетней шкале циклической активности).

На примере изменений потоков излучения в линиях H и K Ca II для Солнца и звезд мы видим (рис. 1, *a* и 2, *a*), что амплитуда этой синусоиды несколько меняется от цикла к циклу. Величина изменений амплитуды кривых блеска звезды для каждого конкретного цикла зависит от вклада существовавших ранее и уже распавшихся активных областей в так называемое фоновое излучение в хромосферных линиях. Дополнительный вклад в увеличение амплитуды в хромосферных линиях вносит поярчения в максимуме цикла от так называемой хромосферной сетки.

Для Солнца одной из важнейших задач является прогноз циклической активности, влияющей на ряд земных процессов, и этим вопросом с середины прошлого века успешно занимаются многие специалисты. Оказалось, что звезды из «НК-проекта», у которых за 40 лет непрерывных наблюдений выявлены устойчивые циклы на одиннадцатилетней временной шкале, настолько схожи в своей циклической активности с солнечной, что для прогноза потоков излучения от этих звезд вполне применимы методы, используемые в практике солнечных прогнозов [4]. Это еще раз подтверждает подобие различных проявлений в эволюции активности атмосфер у Солнца и звезд солнечного типа.

2. Результаты вычислений периодов вариаций потоков звезд

В последнее время появились работы, где с помощью современных подходов (применение вейвлет-анализа к данным наблюдений) исследуются вариации излучения Солнца и звезд на разных временных шкалах. В частности, в [5] проводится анализ цикличности солнечной активности по наблюдениям солнечных пятен (1750–2000 гг.) и солнечного радиоизлучения

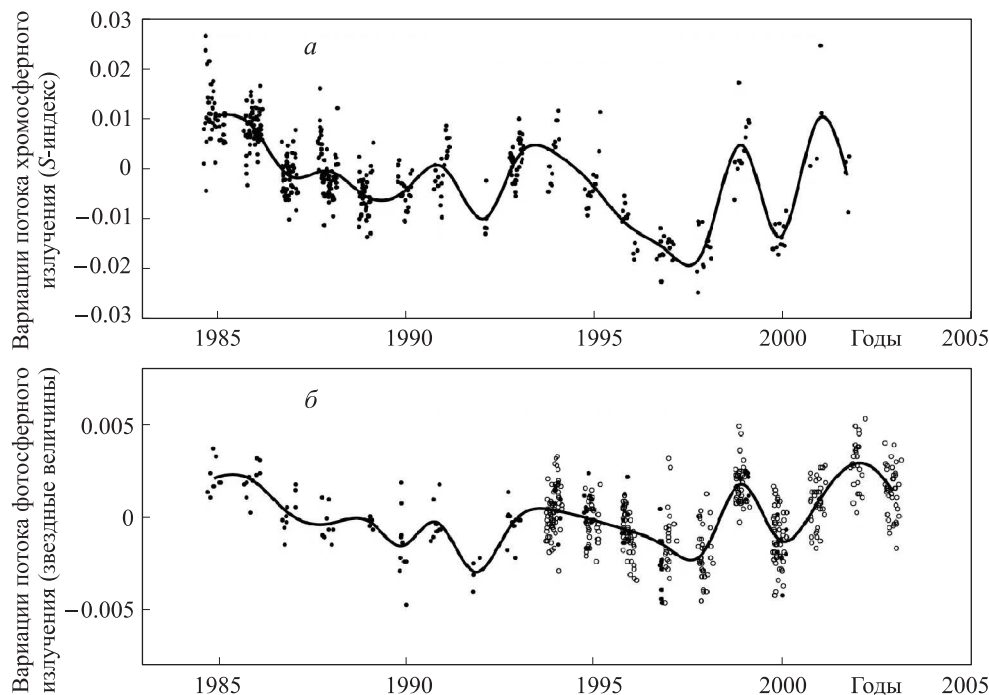


Рис. 2. Вариации потоков излучения для звезды HD 18256 за период с 1984 по 2002 г. согласно наблюдениям [1]: *a* — наблюдения в линиях ионизованного кальция, результаты представлены в величинах S-index, *б* — наблюдения в фотометрической системе $ubvy$, результаты представлены в звездных величинах

№	Звезда	Спектр. класс	Период вращения T_{rot} , сут	Качество цикличности [1]	Период T_{11}^{HK} , лет [1]	Период одиннадцатилетних циклов T_{11} , лет	Период КДВ-циклов T_2 , лет
1	Солнце	G2–G4	25	EXCELL	10.0	10.7	2.7
2	HD 1835	G2.5	8	FAIR	9.1	9.5	3.2
3	HD 10476	K1	35	EXCELL	9.6	10.0	2.8
4	HD 13421	G0	17	UNACT	—	—	—
5	HD 18256	F6	3	FAIR	6.8	6.7	3.2
6	HD 25998	F7	2	UNACT	—	7.1	—
7	HD 35296	F8	4	UNACT	—	10.8	—
8	HD 39587	G0	5	UNACT	—	10.5	—
9	HD 75332	F7	4	UNACT	—	9.0	2.4
10	HD 76572	F6	4	POOR	7.1	8.5	—
11	HD 81809	G2	41	EXCELL	8.2	8.5	2.0
12	HD 82885	G8	18	FAIR	7.9	8.6	—
13	HD 103095	G8	31	EXCELL	7.3	8.0	—
14	HD 114710	F9.5	12	GOOD	16.6	16.0	2.0
15	HD 115383	G0	3	UNACT	—	10.3	3.5
16	HD 115104	K1	18	GOOD	12.4	11.8	2.7
17	HD 120136	F7	4	POOR	11.6	—	3.3
18	HD 124570	F6	26	UNACT	—	—	2.7
19	HD 129333	G0	3	UNACT	—	9.0	3.2
20	HD 131156	G2	6	UNACT	—	8.5	2.8
21	HD 143761	G0	17	UNACT	—	—	—
22	HD 149661	K2	21	GOOD	17.4	14.5	3.5
23	HD 152391	G7	11	EXCELL	10.7	10.8	2.8
24	HD 157856	F6	4	FAIR	—	12.9	2.6
25	HD 158614	G9	34	UNACT	—	12.0	2.6
26	HD 160346	K3	37	EXCELL	7.0	8.1	2.3
27	HD 161239	G2III	29	FAIR	5.7	6.5	—
28	HD 182572	G8	41	UNACT	—	10.5	3.1
29	HD 185144	K0	27	UNACT	—	6.5	2.6
30	HD 190007	K4	29	FAIR	—	11.0	2.5
31	HD 201091	K5	35	EXCELL	—	13.7	2.8
32	HD 201092	K7	38	GOOD	—	11.7	2.5
33	HD 203387	G8	—	UNACT	—	—	2.6
34	HD 216385	F7	7	POOR	—	7.0	2.4

(1950–2000 гг.). Обнаружена четко выраженная цикличность солнечной активности с периодами 10–11 лет и 2–3 года.

Этими же авторами исследуются вариации излучения звезды солнечного типа EI Egi. Определен период цикличности вариаций блеска этой звезды, составляющий 2.7 года, что согласуется с нашими результатами вычислений для 33 звезд и подтверждает широкое распространение явления квазидвухлетних вариаций (КДВ) у звезд солнечного типа.

В одной из последних работ, посвященной КДВ-потокам солнечного излучения [6] подчеркивается важность изучения этой проблемы. Оказалось, что квазидвухлетние модуляции полного потока солнечного излучения тесно связаны с различными КДВ-процессами на Земле, в частности с КДВ-скоростью вращения Земли, КДВ-скоростью стратосферного ветра и др. Существование активности у звезд на квазидвухлетней временной шкале подчеркивает тот факт, что солнечная

активность — характерное явление для звезд главной последовательности поздних спектральных классов с развитыми подфотосферными конвективными зонами. Их возраст оценивается примерно в несколько миллиардов лет.

Результаты наших вычислений представлены в таблице. Мы использовали данные наблюдений потоков излучения в хромосферных линиях (индекс S_{CaII}). С помощью спектрального анализа изменения потоков излучения (см. рис. 1 и 2) по методу быстрого преобразования Фурье для Солнца и 33 звезд нами были определены периоды одиннадцатилетней цикличности (период T_{11}) и квазидвухлетней цикличности (период T_2) хромосферной активности.

Процурк в колонках с T_{11} и T_2 означает, что на данной временной шкале периодичность нами не выявлена. В таблице представлены также результаты определения одиннадцатилетних периодов звезд «НК-проекта» T_{11}^{HK} и качества цикличности кривых блеска в линиях иони-

зованного кальция, выполненные самими наблюдателями [1] при первичной обработке наблюдений. Видно хорошее соответствие этих результатов с нашими результатами вычислений периодов T_{11} .

Отметим, что у части звезд с отчетливо выраженными одиннадцатилетними циклами из [1, 2] изменения потоков излучения от фотосфер и в хромосферных линиях имеют подобно Солнцу двухвершинную форму в области максимума цикла.

Согласно результатам таблицы более 75% звезд из изучаемой нами выборки [1, 2] имеют достаточно выраженные квазидвухлетние вариации потоков, аналогичные вариациям солнечного излучения на соответственной временной шкале. Периоды квазидвухлетней цикличности звезд (величины T_2) заключены в пределах от 2.2 до 3.5 года.

Предварительный анализ КДВ на звездах показал, что длительность такого цикла непостоянна в течение одного одиннадцатилетнего цикла, как и в случае вариаций потоков излучения от Солнца. У Солнца длительность КДВ потоков меняется в среднем от 39 месяцев в начале одиннадцатилетнего солнечного цикла до 25 месяцев к концу его [7].

Мы сопоставили данные о фотосферном и хромосферном излучении звезд «НК-проекта» по наблюдениям, опубликованным в [1]. Для звезд с низкой хромосферной активностью (группа I — «прямая» зависимость, сюда входит Солнце) фотосферное излучение коррелирует с S-индексом на временных шкалах в 3–20 лет. Другая часть звезд (группа II — «обратная» зависимость) характеризуется обратно направленными вариациями в фотосферном континууме и в хромосферных линиях. Коэффициенты корреляции между хромосферными и фотосферными индексами излучения для части звезд оказываются достаточно высокими (до 0.7), отличаясь по знаку для групп I и II. Показано, что КДВ потоков излучения существуют как у звезд с корреляцией, так и с антикорреляцией активности на разных уровнях атмосферы.

Заключение

Проведен статистический анализ наблюдений Солнца и 33 звезд «НК-проекта» методом быстрого преобразования Фурье. Из спектрального анализа соответствующих изменений потоков излучения в линиях Ca II нами определены периоды одиннадцатилетней цикличности T_{11} , а также выявлена цикличность, подобная квазидвухлетней солнечной и определены периоды T_2 . Результаты представлены в таблице.

Из таблицы видно, что периоды циклов на одиннадцатилетней шкале $T_{11}^{\text{НК}}$, ранее определенные наблюдателями Маунт Вилсон при первичной обработке наблюдений по программе «НК-проект» [2], хорошо согласуются с нашими периодами T_{11} .

Можно сделать вывод, что явление КДВ потоков излучения среди звезд солнечного типа распространено достаточно широко. По нашим оценкам, оно наблюдается у звезд примерно в два раза чаще, чем циклическая активность на одиннадцатилетней шкале. Величины периодов КДВ-циклов T_2 для изучаемой выборки звезд, согласно нашим расчетам, изменяются в интервале от 2.2 до 3.5 года.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-02-01010).

Список литературы

1. Lockwood G.W., Skiff B.A., Baliunas S.L. et al. // *Astrophys. J. Suppl.* 2007. **171**. P. 260.
2. Baliunas S.L., Donahue R.A., Soon W.H. // *Astrophys. J.* 1995. **438**. P. 269.
3. Бруевич Е.А., Кацова М.М., Соколов Д.Д. // *Астрон. журн.* 2001. **78**. С. 48.
4. Бруевич Е.А. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 1999. № 6. С. 827.
5. Kollath Z., Olah K. // *Astron. Astrophys.* 2009. **501**. P. 695.
6. Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. // *Солнечно-земная физика.* 2008. **2**, № 12. С. 291.
7. Храмова М.Н., Кононович Э.В., Красоткин С.А. // *Астрон. вестн.* 2002. **36**, № 6. С. 548.

The atmospheric activity of the Sun and solar-like stars at the 11-year and quasi-biennial time scales

E. A. Bruevich^a, E. V. Kononovich

P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Universitetskii pr. 13, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^ared-field@yandex.ru.

The solar activity indexes observations are compared with new simultaneous observations of photospheric and chromospheric fluxes variations of 33 «НК-project» stars during last 20 years. The Maunt Wilson and Stenford university observatories researchers determined earlier that some of these stars show the evident of 11-year cyclic chromospheric fluxes variations. We determine that most of these stars have also quasi-biennial fluxes variations like the Sun. We present the results of our quasi-biennial fluxes variations periods calculations for 33 «НК-project» stars.

Keywords: Sun, solar-like stars, active regions, 11-year and quasi-biennial cyclic chromospheric fluxes variations. PACS: 96.60.Mz, 96.60.Na, 96.60.qd, 97.20.Jg.

Received 31 May 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2011).

Сведения об авторах

1. Бруевич Елена Александровна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.; тел.: (495) 939-22-45, e-mail: red-field@yandex.ru.
2. Кононович Эдвард Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-48-90, e-mail: konon@sai.msu.ru.