

УДК 523.98

© С. А. Дружинин, А. А. Певцов, В. И. Левковский, М. В. Никонова

Прямые измерения короткопериодических крутильных колебаний солнечных пятен.

I. Первые результаты

Представлены первые результаты прямых измерений одной из разновидностей собственных движений пятен — их крутильных колебаний. Для трех пятен исследовался спектральный состав сигналов лучевой скорости от двух участков полутени, расположенных симметрично относительно тени пятна, находящегося вблизи лимба. Выбранные участки полутени находились на линии, перпендикулярной к направлению на центр изображения Солнца. Основное внимание уделено периодам от 1 мин до нескольких часов. Результаты работы не свидетельствуют о бесспорном наличии крутильных колебаний пятен с периодом порядка 1 ч, обнаруженных в [4, 11]. Обсуждаются особенности квазипятиминутных колебаний в полутени пятна и неперриодических одиночных флюктуаций скорости в разных участках полутени, наблюдавшихся авторами.

DIRECT MEASUREMENTS OF SHORT-PERIOD TORSIONAL OSCILLATIONS OF SUNSPOTS. I. FIRST RESULTS, by Druzhinin S. A., Pevtsov A. A., Levkovskij V. I., Nikonova M. V.—The first results of direct measurements of one of varieties of proper motions of sunspots, i. e. their torsional oscillations are presented. For three sunspots (table) a study has been made of the spectral composition of line-of-sight velocity signals from two penumbra areas symmetric about the sunspot umbra near the limb. The penumbra areas chosen were located on a line perpendicular to the direction of the solar image. Main attention is focused on periods from one minute to several hours. The results reported here do not give convincing evidence for the presence of torsional oscillations of sunspots with a period of about an hour as detected in [4, 11]. Finally we discuss some typical features of quasi-five-minute oscillations in the sunspot penumbra and of non-periodic single velocity fluctuations in different penumbra areas as observed by the authors.

Введение. О существовании вращательных (вихревых, крутильных) движений солнечных пятен известно достаточно давно. Наиболее раннее упоминание о таком исследовании относится к 1891—1893 годам, когда Кемпфф изучал пятна вытянутой формы (см. Герасимович Б. П. Физика Солнца.— М.: ОНТИ, 1935). Из 638 исследованных им пятен вращались только 13. Скорость вращения составляла от 7 до 35 град/сут. Позднее этот тип собственных движений пятен интенсивно исследовался как по фотогелиограммам (например, [1, 2, 9, 12]), так и по спектральным наблюдениям [2]. В [2] обнаружены периодические изменения ориентации солнечного пятна, которые автором названы крутильными колебаниями. Период таких колебаний составлял 6 сут.

Позднее [4] по наблюдениям на магнитографе Крымской астрофизической обсерватории обнаружены крутильные колебания с периодом около 40 мин. Одновременно и независимо в [11] отмечены периодические изменения напряженности магнитного поля и связанное с этим изменение лучевой скорости, которое авторы объяснили возможными крутильными колебаниями пятна с периодом 45 мин.

Практически с самого открытия крутильных колебаний предпринимаются попытки использовать их для диагностики физических условий в подфотосферных слоях под пятном, оценить глубину части пятна, принимающей участие во вращении (см. работы [3, 9, 10]). Изучение таких колебаний может быть полезно и для понимания явления

солнечных вспышек [1, 14]. К настоящему времени выполнено много работ по крутильным колебаниям пятен, но целенаправленные прямые измерения таких колебаний до сих пор не проводились. Данной работой авторы попытались восполнить этот пробел, уделив особое внимание короткопериодическим флуктуациям (порядка 1 ч и менее).

Методика. Метод наблюдения крутильных колебаний основан на одновременной фотоэлектрической регистрации лучевой скорости от участков полутени, расположенных симметрично относительно тени пятна, находящегося вблизи лимба. Эти участки выбирались на линии,

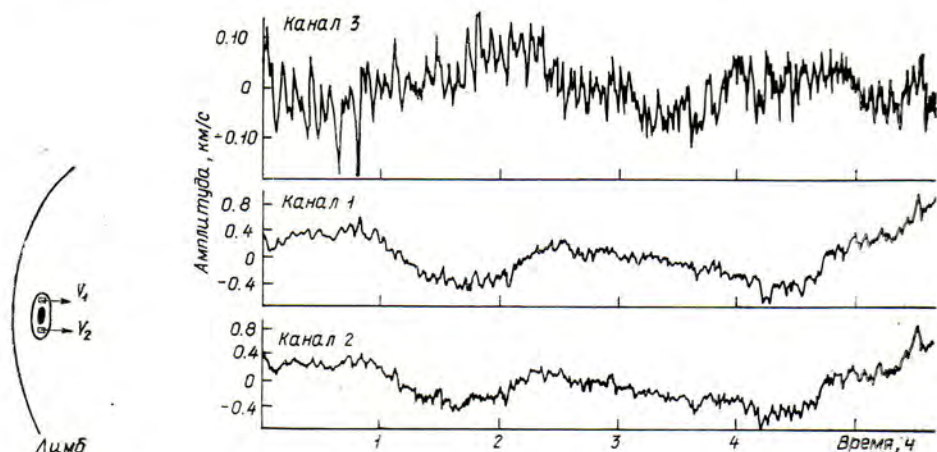


Рис. 1. Метод измерения крутильных колебаний солнечного пятна

Рис. 2. Сигналы лучевых скоростей от двух участков полутени (каналы 1, 2) и дифференциальный сигнал (канал 3) для 16.06.88

перпендикулярной к направлению на центр изображения Солнца. На рис. 1 схематично показано расположение наблюдаемых участков 1 и 2 полутени пятна. Полагаем, что при наличии крутильных колебаний в пятне следует ожидать противофазные изменения лучевой скорости в этих участках полутени.

Наблюдательные проблемы. Основная сложность, которая всегда возникает при получении непрерывных серий наблюдений солнечных пятен, заключается в необходимости точного удержания пятна на щели спектрографа. Существующие в настоящее время гиды не удовлетворяют требованиям данной наблюдательной задачи. Инерция больших зеркал, поворотом которых компенсируется сдвиг изображения, и люфты в приводах ограничивают точность удержания. Доступные нам для наблюдений телескопы имеют фотогиды, стабилизирующие положение изображения по одному его краю в каждом из направлений гидирования. Изменение рассеянного света при таком гидировании сказывается на положении изображения на щели спектрографа. Телескоп, на котором планировались наблюдения, оснащен фотогидом с зеркалом меньшего диаметра, чем главное зеркало. Если размеры атмосферных неоднородностей для такого телескопа сравнимы с размером зеркала гида (но меньше — главного зеркала), изображение на датчиках фотогида будет смещаться, в то время как в главном фокусе оно лишь размоется. В этой ситуации работа фотогида приведет к ложным смещениям изображения в главном фокусе телескопа. Все изложенное определило необходимость разработки нового гидирующего устройства, свободного от перечисленных недостатков.

Описание телескопа и регистрирующей аппаратуры. Наблюдательный материал получен в июне 1988 г. в Астрономическом институте АН УзССР (Ташкент) на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5-

со спектрографом АСП-20. Телескоп оснащен фотогидом, работающим в дополнительном пучке. Размер зеркала гида 38 мм, фокусное расстояние 17 м. Для улучшения качества изображения входное окно павильона телескопа закрыто стеклянной пластиной.

Специально для исследования крутильных колебаний пятен нами разработан фотогид для солнечного пятна [7]. Фотогид установлен перед щелью спектрографа и реагирует непосредственно на изображение пятна. Смещения изображения регистрируются квадрантным фотодиодом и компенсируются поворотом плоскопараллельных стеклянных пластинок. В состав гида входит также призма Дове. Точность удержания пятна на щели спектрографа около 1". Гид хорошо компенсирует уходы изображения с частотой до 2 Гц. Основной недостаток фотогида — его нельзя использовать для гидирования динамично развивающихся пятен.

Наблюдения проводились по следующей схеме. Изображение солнечного пятна с помощью призмы Дове ориентировалось так, чтобы направление центр — край располагалось перпендикулярно входной щели спектрографа. На щели устанавливалась маска, перекрывающая свет от фотосферы и тени пятна. Так от двух участков полутени в спектрографе формировалось две полосы спектра — каждая высотой 10". Наблюдения проводились в немагнитной линии Fe I λ 543.45 нм при дисперсии 0.05 нм/мм. Смещение спектральных линий в обоих спектрах регистрировалось с помощью диссектора ЛИ-605-3 (входная апертура 0.1×3 мм²), управление электронным сканированием которого построено так, чтобы квазисовременно двумя каналами измерять сдвиги линий на двух участках его фотокатода. Постоянная времени измерительных каналов — 3 с. Описание тахометра на основе диссектора приведено в [5].

По сути выбранный нами метод регистрации является дифференциальным и позволяет по фазовым и амплитудным соотношениям флуктуаций сигналов лучевой скорости в каждом из каналов судить об их природе и отделять реальные сигналы от шумов спектрографа. Поскольку предварительно оба канала были сбалансированы так, что при одинаковом сдвиге линии на их выходах регистрировались одинаковые сигналы, шумы спектрографа в каналах проявлялись одинаково, с различием не более 10 м/с.

Сигналы лучевой скорости от двух участков полутени и сигнал их разности (дифференциальный) записывались на магнитную ленту на многоканальном магнитофоне Н-067. Во все дни наблюдений одновременно с записью лучевых скоростей регистрировались сигналы дрожания краев изображения Солнца по двум координатам с общего гида, а 15 июня — также сигналы смещения пятна в главном фокусе.

Результаты наблюдений. В течение пяти дней выполнены наблюдения трех групп пятен. Данные о них представлены в таблице. Ни одно из исследованных пятен не было униполярным. Наблюдения 10 июня проводились в лидере биполярной группы, а в последующие дни — в группах, состоящих из большого пятна, окруженного мелкими

Характеристики исследованных пятен и выделенные периоды колебаний в них

Дата, июнь 1988 г.	Время UT	θ , град	Номер группы по СД	Периоды, мин
10	6 ^h 05 ^m —10 ^h 20 ^m	59	108	74, 53, 34, 9
12	4 25 —10 15	27	115	112, 53, 45, 37, 6
15	6 00 — 8 52	74	118	128, 54, 27, 20, 17, 15, 9, 5
16	4 20 —10 00	62	118	158, 57, 5
17	3 37 — 8 01	50	118	70, 51, 25, 20, 12, 11, 9, 6 5

порами или пятнами. Все три группы развивались, при этом видимых изменений в структуре пятна за время наблюдений не происходило.

Сигналы V_1 и V_2 от двух участков полутени пятна, полученные описанным выше способом, имеют ряд особенностей.

1. Прежде всего обращает на себя внимание, что в обоих каналах сигналы V_1 и V_2 показывают одинаковый тренд в коротковолновую сторону. В среднем этот сдвиг эквивалентен скорости 2.1 км/с (или

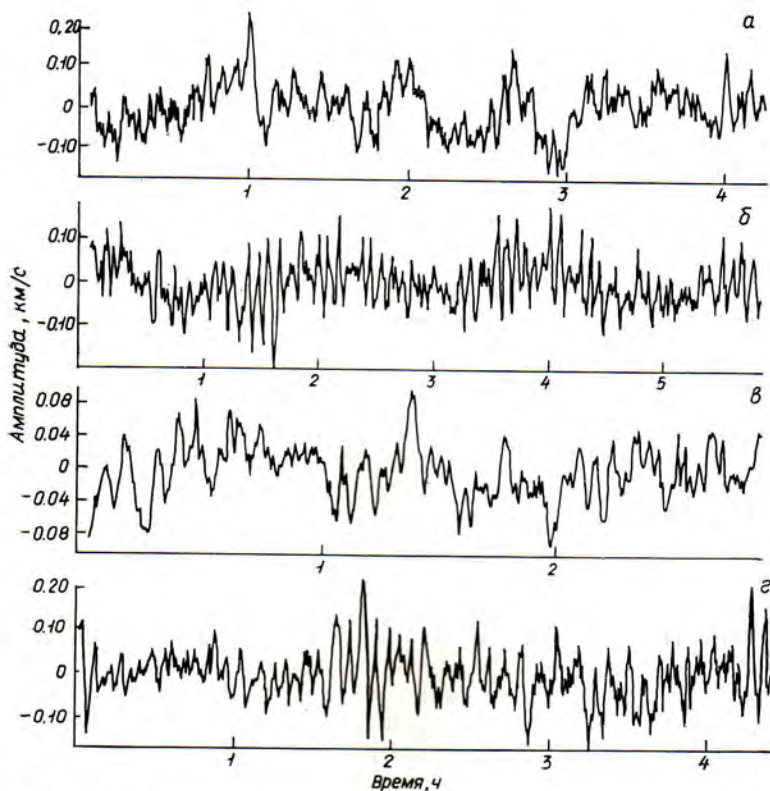


Рис. 3. Дифференциальный сигнал в разные дни наблюдений (канал 3): а — 10.06.88; б — 12.06.88; в — 15.06.88; г — 17.06.88

3.8 м) за 1 ч. Вероятнее всего, он обусловлен дрейфом спектрографа, поскольку подобный тренд наблюдается и для теллурических линий.

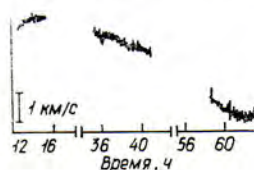
2. После удаления параболического тренда сигналы V_1 и V_2 испытывают почти синфазные низкочастотные колебания (период от 1 до 2.5 ч), амплитуды же этих колебаний (до 600 м/с) в разных каналах разные, что, возможно, свидетельствует об их солнечной природе (рис. 2).

3. Кроме низкочастотных синфазных колебаний в сигналах каждого канала периодически наблюдаются возмущения скорости (до 200 м/с), по форме похожие на одиночные колоколообразные импульсы (рис. 2, ср. каналы 1 и 2). Эти флуктуации вносятся в дифференциальный сигнал от одного из каналов и более заметны в те дни, когда пятно находится ближе к краю диска Солнца.

4. Противофазные низкочастотные колебания скорости в двух каналах, которые, как ожидалось, должны были отмечаться при крутильных колебаниях, не обнаружены ни в одну из пяти дат наблюдений, однако за счет разной амплитуды колебаний в каналах 1 и 2 в дифференциальном сигнале скорости низкочастотные колебания видны. Амплитуда таких колебаний 50—100 м/с, периоды от 20 до 160 мин (см. таблицу и рис. 3).

5. Как отмечалось выше, в один из дней наблюдений одновременно с записью скоростей регистрировались сигналы с датчиков общего фотогида и сигналы смещения пятна в главном фокусе, которые компенсирует местный фотогид. Визуальное сравнение этих сигналов с сигналами скорости от полутеней показало, что какой-либо значимой зависимости между ними нет. Проведенный затем спектральный анализ сигналов в целом подтвердил это. Единственным исключением является период 128 мин, который отмечается и в сигналах скорости от полутеней, и в дифференциальном сигнале, и в сигнале сдвига пятна вдоль направления к лимбу. Фазы колебаний всех сигналов близки. Амплитуда колебания положения пятна составляет около $0.5-0.8''$, и мы склонны считать, что оно имеет солнечное происхождение, поскольку

Рис. 4. Поведение дифференциального сигнала (канал 3) в три последовательных дня для СД 118/88



ку более короткопериодические колебания (менее 10 мин) положения пятна с гораздо большими амплитудами (до $3''$) не коррелируют с сигналами скорости.

6. Практически во все дни наблюдений в сигналах скорости видны квазипятиминутные флуктуации скорости с амплитудой до 200 м/с, имеющие цуговый характер. Иногда эти флуктуации синфазны в разных каналах, иногда противофазны, а иногда отмечаются в сигналах скорости только одной из полутеней. При удалении пятна от края диска Солнца амплитуда флуктуаций увеличивается (ср. рис. 3, а и б).

7. Дифференциальный сигнал для пятна СД 118/88 в три последовательных дня наблюдений имел разный наклон (рис. 4).

Обсуждение результатов наблюдений. Сигналы V_1 и V_2 имеют сложный спектральный состав, причем спектры скоростей в обоих каналах различны (различий больше в области минутных периодов). Вместе с тем сдвиги линий, вызванные шумами спектрографа, в обоих каналах проявляются одинаково. Это следует из сравнения записей V_1 и V_2 и дифференциального сигнала; явные шумы в сигналах V_1 и V_2 полностью вычитаются и отсутствуют в разностном сигнале. Спектральный состав сигналов скоростей в полутенях и дифференциального сигнала отличаются от спектрального состава колебаний скорости в фотосфере. В области коротких периодов эти спектры имеют пики около 1, 3 и 5—7 мин.

Как отмечалось, противофазных низкочастотных колебаний в полутени не обнаружено. Что касается низкочастотных синфазных изменений сигналов V_1 и V_2 , то, поскольку мы регистрируем скорости в двух пространственно разнесенных точках поперек дисперсии (примерно на 2.5—3 мм), в принципе нельзя полностью исключить различное влияние спектрографа на эти два канала. Однако величина такого различия должна быть невелика (около 10 м/с, согласно [6]). Возможна ситуация, когда на синфазные шумы спектрографа накладываются противофазные сигналы крутильных колебаний пятна. Это также может привести к различию амплитуд сигналов V_1 и V_2 . Если же регистрируемые нами сигналы имеют солнечную природу, наблюдаемое соотношение амплитуд V_1 и V_2 можно было бы объяснить вращением (колебаниями) пятна вокруг точки, находящейся за его пределами, подобно колебаниям, совершаемому маятником. В этом случае наш дифференциальный сигнал действительно будет описывать «крутильную» составляющую колебаний пятна. В пользу такого «маятникового»

го» движения свидетельствуют и сигналы смещения солнечного пятна (с гйда для пятна) в направлении центр — край. Амплитуды колебаний скорости в полутени и смещение пятна хорошо согласуются между собой. Возможны, на наш взгляд, и такие движения, когда все пятно совершает вертикальные колебания. При этом может возникнуть поворот пятна и его крутильные колебания. При регистрации лучевых скоростей в полутенях на синфазные сигналы от вертикальных колебаний наложатся противофазные от крутильных, что также приведет к различию амплитуд сигналов в двух каналах.

В таблице приведены наиболее значимые периоды (с уровнем значимости не ниже 0.9995) в спектре колебаний в дифференциальном сигнале, которые выделяются при обработке методом корреляционного периодограммного анализа (КПГА) [8].

Необходимо обратить внимание на период около 1 ч, который отмечается во все дни наблюдений. Подчеркнутые в таблице периоды имеют наибольшую мощность. Скользящий КПГА свидетельствует о том, что все периоды менее 90 мин в течение дня наблюдений заметно изменяют свою мощность, а иногда и пропадают. Вероятно, такие колебания не постоянны во времени, а скорее выглядят как цуг из 2—3 колебаний.

Таким образом, наши наблюдения прямо не показывают наличия крутильных колебаний порядка 1 ч (с амплитудой больше 20 м/с) относительно центра пятна. В лучшем случае можно говорить лишь о колебаниях «маятникового» типа либо о вертикальных колебаниях, происходящих одновременно с крутильными. Однако, поскольку остается не выясненной природа низкочастотных синфазных колебаний в сигналах скорости в полутенях, нельзя исключить и инструментальные причины. Возможно, например, влияние изменения прозрачности атмосферы на вариации дрейфа спектрографа при его прогреве.

Поведение дифференциального сигнала V_3 для пятна СД 118/88 за три последовательных дня (рис. 4) позволяет предположить, что разный наклон в графиках этого сигнала, возможно, связан с крутильными колебаниями пятна с периодом 5 сут. Мы не проводили специального измерения фотогелиограмм пятна, но по ежедневным зарисовкам из бюллетеня «Солнечные данные» можно сделать вывод о том, что действительно это пятно совершало такие колебания с периодом несколько суток; по «Солнечным данным» это видно в те дни (с 17 по 22 июня), когда тень пятна разделилась на две. Амплитуда колебаний скорости — порядка 3 км/с.

Особенностью одиночных колоколообразных возмущений в сигналах V_1 и V_2 является то, что они как бы вызываются смещением спектральной линии только в одну сторону — от наблюдателя. Поскольку V_1 и V_2 наблюдаются одновременно, из фазового соотношения флюктуаций можно уверенно констатировать солнечное происхождение этих особенностей. Такие колоколообразные возмущения можно объяснить яркими сгустками плазмы, распространяющимися от внешней границы полутени в тень пятна вдоль дугообразных волокон полутени. Подобные сгустки наблюдаются на последовательных снимках пятен с высоким разрешением [13]. Скорость их распространения достигает нескольких километров в секунду и на небольшой части своей траектории (при наблюдении под углом к поверхности вблизи лимба) они могут дать вклад в лучевую скорость, что и регистрируется нами как одиночное возмущение.

Квазипятиминутные колебания в сигналах V_1 и V_2 отмечались во все даты. Наблюдавшееся увеличение амплитуды флюктуаций скорости этих колебаний при удалении пятна от края диска Солнца (рис. 3, а, б) свидетельствует о том, что в полутени происходят скорее вертикальные колебания, нежели крутильные. Точный период этих колебаний отличается от 5 мин и составляет в разные дни от 4.5 до

8 мин. Во время регистрации колебаний 17 июня в группе СД 118/88 рядом с пятном произошла вспышка балла 2 (согласно данным Астрономического института АН УзССР), момент начала вспышки совпал со сбоем фазы квазипятиминутных колебаний, а момент ее окончания — с восстановлением противофазных квазипятиминутных колебаний в полутени данного пятна. В течение этого дня наблюдений зарегистрирован еще один сбой фазы колебаний, однако уже без каких-либо вспышек.

Основные выводы. 1. Результаты прямых измерений не свидетельствуют о бесспорном наличии крутильных колебаний пятен с периодом порядка 1 ч (с амплитудой больше 20 м/с); 2. Поведение дифференциального сигнала для СД 118/88 в разные дни наблюдений свидетельствует о том, что это пятно, возможно, совершало крутильные колебания с периодом порядка 5 сут или более; 3. Для пятна вблизи края диска в сигналах лучевых скоростей от каждой из полутеней наблюдаются одиночные колоколообразные возмущения, вызванные смещением плазмы от наблюдателя; 4. Квазипятиминутные колебания в разных участках полутени имеют случайную фазу. Скорее всего это вертикальные колебания.

Авторы выражают благодарность В. М. Григорьеву за полезное обсуждение и И. С. Саттарову за предоставление возможности наблюдений на АЦУ-5.

1. *Гопасюк С. И.* Временные изменения структуры поперечного магнитного поля в группах пятен и оптические явления // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1965.— 33.— С. 100—110.
2. *Гопасюк С. И.* Некоторые особенности вращения пятен // Там же.— 1981.— 64.— С. 108—118.
3. *Гопасюк С. И.* Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля // Астрон. журн.— 1984.— 62, вып. 1.— С. 157—162.
4. *Гопасюк С. И.* О возможном присутствии в пятнах крутильных колебаний с периодом около 40 минут // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1985.— 73.— С. 9—15.
5. *Дружинин С. А.* Измерения лучевых скоростей с тахометром на базе диссектора // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.— 1982.— Вып. 60.— С. 154—160.
6. *Дружинин С. А.* Методы фотоэлектрических измерений лучевых скоростей и результаты наблюдений в спокойной фотосфере и тени пятен: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Киев, 1985.— 14 с.
7. *Дружинин С. А., Маслов И. Л., Певцов А. А.* Фотогид для солнечного пятна // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.— 1988.— Вып. 83.— С. 149—153.
8. *Копецкий М., Куклин Г. В.* К вопросу об 11-летней вариации средней продолжительности жизни групп солнечных пятен // Там же.— 1971.— Вып. 2.— С. 167—179.
9. *Певцов А. А., Саттаров И. С.* Исследование крутильных колебаний солнечных пятен // Солнеч. данные.— 1985.— № 3.— С. 65—71.
10. *Соловьев А. А.* Крутильные колебания пятен // Там же.— 1984.— № 1.— С. 73—78.
11. *Berton R., Rayrole J.* Overstable vertical velocity oscillations coupled with magnetic field torsional oscillations in active regions // Astron. and Astrophys.— 1985.— 152, N 2.— P. 219—228.
12. *Knořka S.* Rotational motions of sunspots // Bull. Astron. Inst. Czech.— 1975.— 26, N 3.— P. 151—158.
13. *Miller R. H.* Fine structure of active regions // Publ. Astron. Inst. Czech.— 1987.— N 66.— P. 15—19.
14. *Stenflo J. O.* A mechanism for the build-up of flare energy // Solar Phys.— 1969.— 8, N 1.— P. 115—118.

Сиб. ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
Сиб. отд-ния АН СССР, Иркутск

Поступила в редакцию
12.06.89