

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ**

**Том II**

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,  
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва  
2011

УДК 504.0  
ББК 26.2  
Г35

**Экстремальные природные явления и катастрофы** : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;  
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

**Г35 Т. 2 : Геология урана, геоэкология, гляциология** / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;  
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геоэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геоэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого кернового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геоэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранению и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0  
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0  
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011  
© Коллектив авторов, 2011

*В.М. Григорьев<sup>1</sup>, Л.В. Ермакова<sup>1</sup>, А.В. Мордвинов<sup>1</sup>, Ю.А. Наговицын<sup>2</sup>, А.Г. Тлатов<sup>3</sup>,  
В.Г. Иванов<sup>2</sup>, Е.В. Милецкий<sup>2</sup>, Е.Ю. Наговицына<sup>2</sup>, А.И. Хлыстова<sup>1</sup>, С.А. Язев<sup>1</sup>*

# **ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ**

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики СО РАН

<sup>2</sup> Главная (Пулковская) обсерватория РАН

<sup>3</sup> Кисловодская горная астрономическая станция ГАО РАН

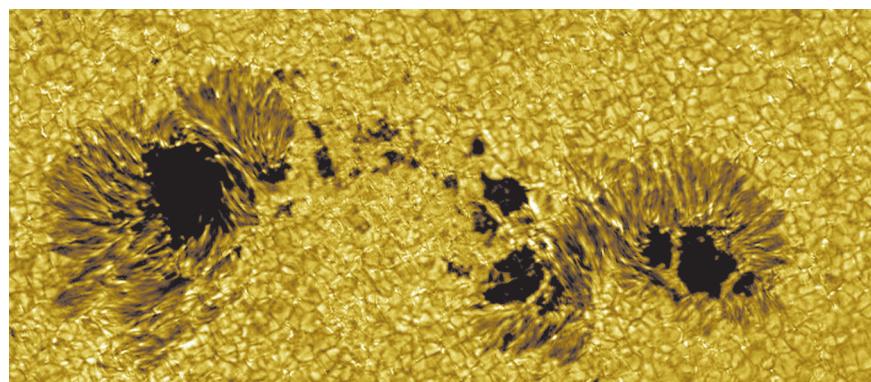
Представлены результаты исследований рождения и эволюции активных областей. На основе многолетних наблюдений короны Солнца изучены изменения структуры корональных лучей, полярных лучевых структур, сделаны выводы о долговременных изменениях глобального магнитного поля Солнца. Представлены результаты изучения магнитной активности Солнца на большой шкале времени на основе прямых и косвенных данных. Впервые реконструировано широтно-временное распределение солнечных пятен в период Маундеровского минимума.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Обнаружение солнечных пятен было одним из первых открытий, сделанных с помощью телескопа, изобретенного 400 лет назад. Понимая важность этого открытия, европейские астрономы стремились регулярно наблюдать солнечные пятна. История телескопических наблюдений Солнца, анализ косвенных дан-

ных о числах солнечных пятен из природных архивов Земли показали, что магнитная активность Солнца изменяется в 11-летнем цикле и на большой шкале времени. Непрерывный мониторинг, выполняемый космическими обсерваториями в последние десятилетия, показал, что наряду с пятнообразательной деятельностью Солнца, изменяются характеристики его вращения, светимость и спектральный состав излучения. Эти изменения находятся в сложной взаимосвязи и служат проявлением термодинамических и магнитогидродинамических процессов, которые охватывают все Солнце, определяя его внутреннюю структуру и эволюцию [Пипин, Кичатинов, 2000]. Магнитные поля, генерируемые в недрах Солнца циклонической конвекцией и дифференциальным вращением, всплывают на поверхность Солнца и наблюдаются в виде активных областей (рис. 1) и крупномасштабных магнитных полей [Демидов, Григорьев, 2004].

Анализ изменений основных физических характеристик Солнца в их взаимосвязи важен для диагностики процессов, происходящих в его атмосфере и конвективной зоне. Изучение пространственно-



**Рис. 1.** Формирующаяся группа пятен 8 июля 2005 г. Изображение получено на Датском оптическом телескопе (о. Ла Пальма)

временной организации солнечной активности, эволюции крупномасштабных магнитных полей и характеристик вращения Солнца создают эмпирическую базу для понимания природы солнечного магнетизма. Знание спектрально-временных закономерностей циклических и долговременных изменений солнечной активности также дает основу для построения эмпирических моделей, с помощью которых выполняются реконструкции солнечной активности в прошлом и ее прогноз в обозримом будущем [Наговицын, 2006; Огурцов, 2009; Mordvinov, Kramynin, 2010].

Изменения магнитных и термодинамических характеристик Солнца воздействуют на состояние гелиосферы и проявляются в вариациях геометрии межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра и в возрастании геомагнитной возмущенности, которое наблюдалось в XX в. [Наговицын, 2006; Мордвинов, 2008]. Соответствующие изменения в геосфере иногда приобретают катастрофический характер, приводя к нарушениям функционирования глобальных энергетических, транспортных и коммуникационных систем. По мере накопления данных, свидетельствующих об изменениях основных характеристик Солнца, развития теоретических представлений о генерации солнечных магнитных полей, достигнуто более глубокое понимание природы солнечного магнетизма, его многообразного воздействия на состояние околосолнечного космического пространства, техносферу и климат Земли [Дергачев и др., 2006; Жеребцов и др., 2008].

В настоящей статье подведены итоги исследований рождения и эволюции активных областей, выполненных в рамках Программы Президиума РАН № 16. На основе многолетних наблюдений короны Солнца изучены изменения ее тонкой структуры, сделаны выводы о долговременных изменениях глобального магнитного поля Солнца. Представлены результаты изучения магнитной активности Солнца в 11-летнем цикле и на вековой шкале времени.

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

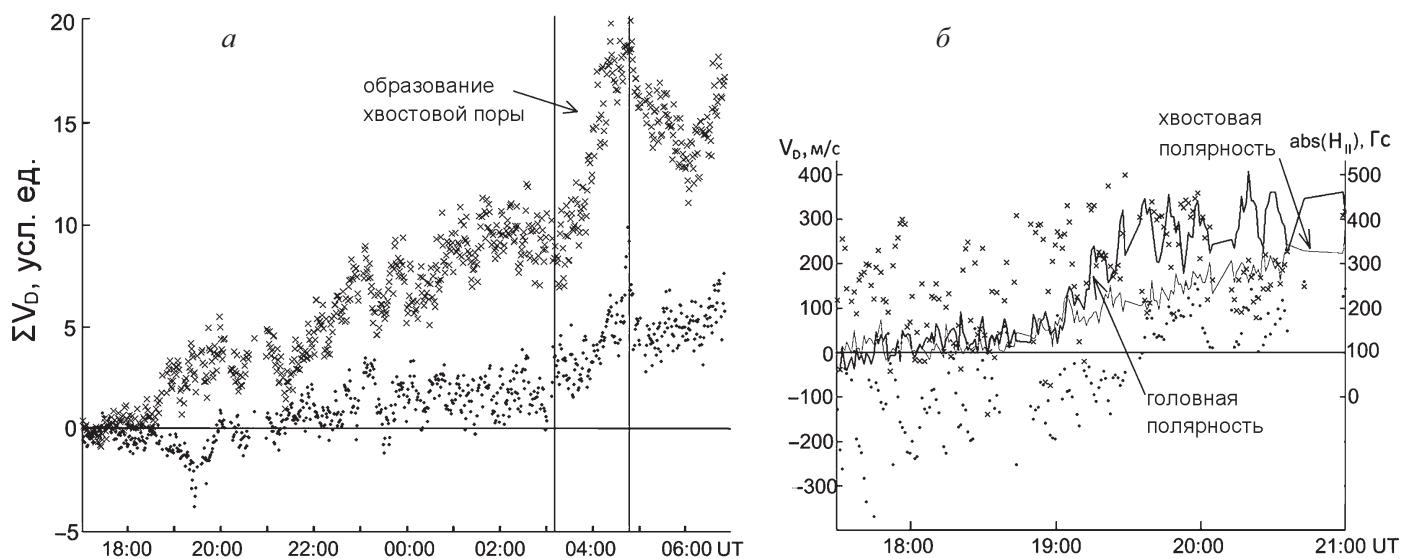
Возникновение активной области вызвано появлением на локальном участке фотосферы биполярного магнитного поля, поток которого увеличивается в течение нескольких суток и может превысить  $10^{22}$  Мкс. Обычно в течение первых полусуток в активной области образуются солнечные пятна. Напряженность магнитного поля в наиболее крупных пятнах превышает 3 кГс. На рис. 1 показано изображение формирующейся биполярной группы пятен. Выполнившиеся ранее исследования опирались, в основном, на нерегулярные измерения магнитного поля и лучевых скоростей и данные, содержащие информацию о магнитном поле в косвенном виде (изображения

в континууме и спектральных линиях). Это не позволяло получить полную картину изменений в атмосфере Солнца, вызванных образованием активной области, и последующих проявлений в космическом пространстве и оставляло широкие возможности для неоднозначной интерпретации. Использование данных космической обсерватории SOHO, имеющих поминутное временное разрешение, дает возможность проследить возникновение активных областей с самого начала, а именно, с момента времени, когда начинается монотонный рост нового магнитного потока с последующим образованием биполярной группы пятен (пары пор).

Для анализа использовались результаты регистрации продольного магнитного поля, лучевой скорости (проекции вектора скорости на луч зрения) и интенсивности непрерывного спектра, получаемые для всего диска Солнца с помощью прибора MDI, установленного на SOHO, с пространственным разрешением 4 дуг. с. Временное разрешение для первых двух рядов данных составляло 1 мин., для последнего – 96 мин. Для всего периода наблюдений SOHO/MDI были отобраны случаи возникновения активных областей вблизи центрального меридиана, для которых существовали непрерывные наблюдения в течение нескольких часов до появления активной области, чтобы можно было уверенно регистрировать начало выхода магнитного поля новой активной области. Предпочтение отдавалось объектам, которые образовались в относительно свободном от старых магнитных полей пространстве, что позволяло выделить возникающую биполярную магнитную структуру, и свободном от значительных вертикальных скоростей, которые могли бы исказить картину движений вещества.

Для детального рассмотрения были отобраны четыре активные области NOAA 8782, NOAA 8973, NOAA 10491, NOAA 10488, размеры которых в максимуме развития достигли соответственно 400, 130, 120 и 1800 м.д.п. Такой выбор объектов позволил проследить динамику появления в фотосфере магнитного поля и соответствующей картины вертикальных движений для активных областей разной мощности. Анализируемый период развития составлял около половины суток. Исследовались следующие характеристики процесса: последовательность изменений, наличие подъема и опусканий вещества, скорость подъема магнитных арок, характерные временные и пространственные масштабы, асимметрия вертикальных скоростей в областях магнитного поля противоположной полярности, взаимосвязь опусканий вещества и усиления магнитного поля.

В результате построена обобщенная картина возникновения активной области, основанная на данных, имеющих высокое временное разрешение [Григорьев и др., 2007, 2008, 2009, 2011]. Она описывает динамику магнитного поля и вещества в фотосфере при образовании типичной биполярной активной области, какими являются первые три из упомянутых выше. Активная область 10488, одна из самых сильных об-



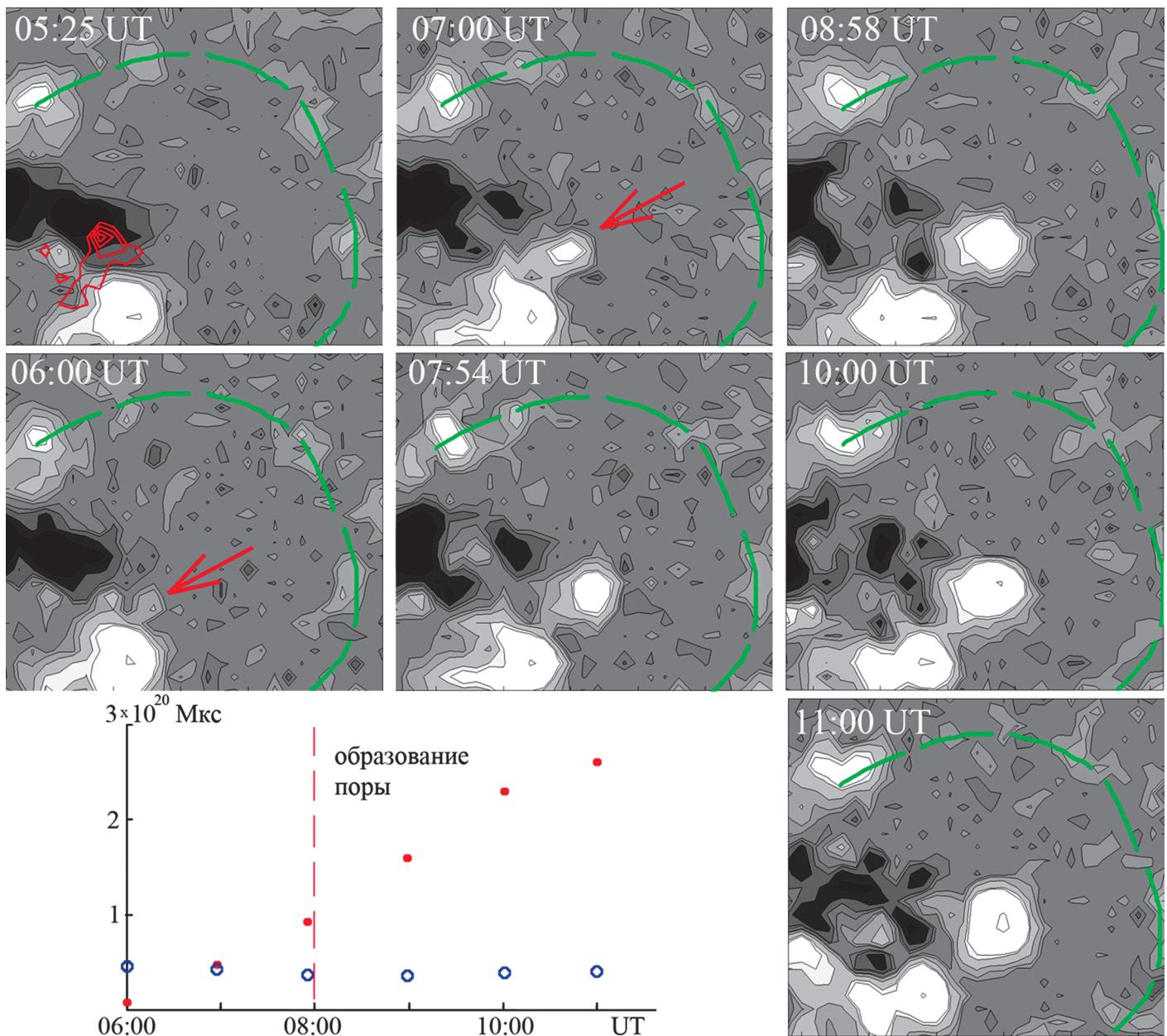
**Рис. 2.** Движения вещества в фотосфере на ранней стадии развития NOAA 8782: *а* – суммарные лучевые скорости  $\Sigma V_0$  внутри контуров, очерчиваемых изолиниями  $\pm 60$  Гс; *б* – максимальная напряженность и лучевая скорость в этом же пикселе. Точки – ведущая полярность, крестики – последующая

ластей предыдущего цикла активности, демонстрирует более сложную динамику, в которой, тем не менее, прослеживаются все излагаемые ниже признаки. Возникновение активной области в фотосфере начинается с появления локальной области усиленного подъема размером в несколько дуг. с. и образования биполярной пары холмов магнитного поля, расположенных по обе стороны от нее. Для случая мощной активной области 10488 первоначальные изменения в картине лучевых скоростей на несколько минут опережали изменения в продольных магнитных полях, что связано с проникновением в фотосферу горизонтального магнитного поля. Для остальных активных областей зарегистрировать разницу во времени между началом подъема и появлением нового магнитного поля не удалось, поскольку в начальный момент интенсивность процессов сравнима с шумом. Скорость подъема магнитных арок составляет 0,4–0,7 км/с и повышается с увеличением мощности активной области. В активной области 10488 скорость подъема арок достигала 1 км/с. Участки подъема на линии раздела полярностей со временем ослабевают, усиливаются повторно, появляются в других местах. Продолжительность существования области подъема – несколько десятков минут.

Вслед за образованием холмов продольного магнитного поля начинается опускание вещества в одном (а позднее и в другом) магнитном полюсе. В рассмотренных активных областях опускание возникало сначала в области магнитного поля последующей полярности, происходило это в течение первого часа жизни (см. рис. 2, *а*, отрицательная лучевая скорость соответствует движению к наблюдателю). Временной масштаб для скорости опускания существенно больше,

чем для скорости подъема. Подъем свидетельствует о прохождении через фотосферу горизонтального магнитного поля, что является относительно кратковременным процессом, опускание – о стекании вещества вдоль силовых линий, которое усиливается в месте образования поры. Сопоставление движений вещества в двух пикселях с максимальной напряженностью продольного поля противоположной полярности в начальный период развития показывает, что они имеют противоположное направление (см. рис. 2, *б*). Возможно, это говорит о существовании в начальный момент движения вещества внутри всплывающей трубки магнитного поля в направлении от ведущего конца к последующему, вызванном действием силы Кориолиса [Fan et al., 1993]. В дальнейшем преобладающим движением становится стекание вещества из вершины петлеобразной магнитной трубки в ее основания.

Концентрация большей части магнитного потока во всплывающей петлеобразной трубке происходит прежде, чем он достигнет поверхности Солнца. Возникновение устойчивых пятен не является результатом сгребания слабого магнитного поля турбулентными конвективными потоками, а связано с выходом на поверхность магнитного поля большей напряженности (рис. 3). Рост напряженности магнитного поля в процессе образования поры сопровождается ростом скорости опускания вещества. Недостаточно высокая скорость опускания свидетельствует о прекращении развития и последующем разрушении объекта. В картине изменений продольного магнитного поля и лучевых скоростей в области появления поры не найдено указаний на включение в действие какого-либо МГД-механизма, приводящего к росту напряженности

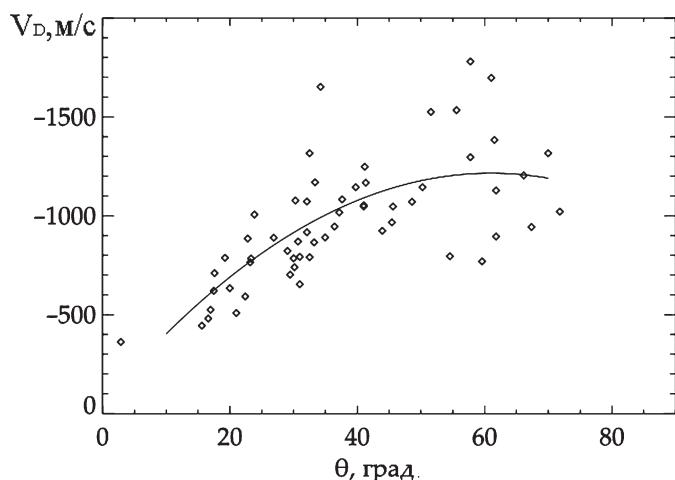


**Рис. 3.** Динамика магнитного поля в области возникновения ведущего пятна активной области NOAA 8973. На магнитограммах белый цвет соответствует магнитному полю ведущей полярности, чёрный – последующей. Красные контуры на левом верхнем кадре (изолинии отрицательной лучевой скорости) отмечают появление вершины всплывающей трубы магнитного поля, стрелки – ведущий магнитный полюс. График показывает рост магнитного потока в формирующемся пятне (точки) и неизменность его в окружающем пространстве (кружки), ограниченном на магнитограммах зеленым контуром

сти. Возможно, пора «выныривает» из подфотосферных слоев, а усиление скорости опускания вызвано уменьшением газовой плотности в ней.

Рассматривая объекты, существенно удаленные от центра диска Солнца, можно получить информацию о скорости горизонтального растекания вещества во всплывающей системе трубок магнитного поля. С этой целью были проанализированы 58 активных областей с нормальной конфигурацией магнитного поля, магнитный поток которых больше  $10^{21}$  Мкс.

Исследуемые выходы магнитных потоков изолированы от крупных концентраций уже существующих магнитных полей, имеют разные пространственные масштабы и располагаются на разном расстоянии от центра солнечного диска. На рис. 4 приведены максимальные значения отрицательных лучевых скоростей, регистрируемые в течение первых полусяток жизни активной области, в зависимости от ее положения относительно центра диска (по одному значению для активной области). Расстояние от центра диска



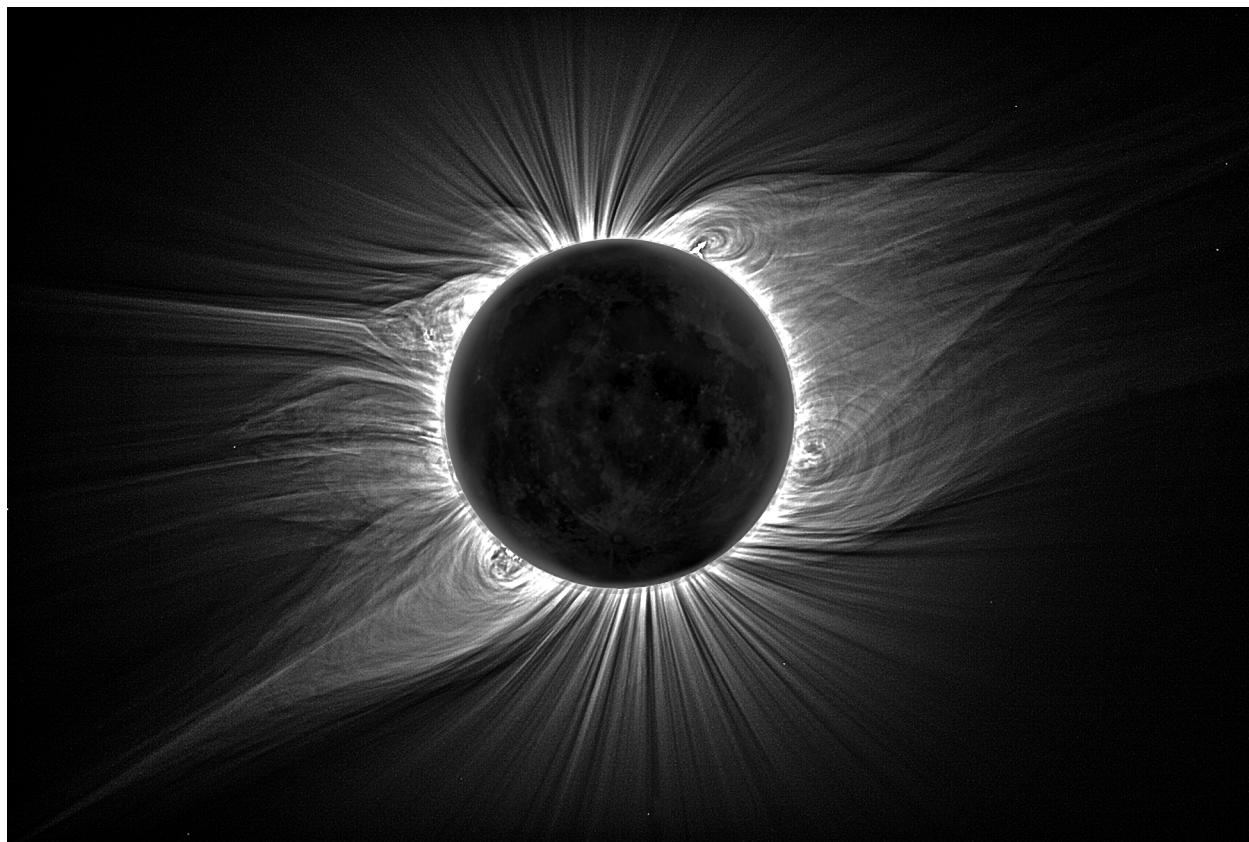
**Рис. 4.** Максимальные отрицательные скорости в первые 12 часов выхода активных областей в зависимости от гелиоцентрического угла, соответствующего положению активной области в этот момент времени. Сплошная линия соответствует уравнению регрессии  $v = -53,36 - 38,08\theta + 0,31\theta^2$

выражено через гелиоцентрический угол  $\theta$ . То обстоятельство, что максимум регрессионной кривой располагается далее  $45^\circ$ , говорит в пользу того, что максимальные значения горизонтальных скоростей выше вертикальных. Следовательно, в первые часы развития активных областей скорости растекания ве-

щества превосходят скорости подъема. Описанные свойства характеризуют условия во всплывающей трубке магнитного потока.

## ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОРОНЫ В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ВЕКОВОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ

Магнитное поле Солнца имеет многомасштабную и иерархическую организацию: наряду с сильными локальными магнитными полями солнечных пятен и активных областей существуют крупномасштабные магнитные поля, глобальное магнитное поле, представленное тороидальной и полоидальной составляющими. Крупномасштабное магнитное поле Солнца во многом управляет физическими процессами в атмосфере Солнца, участвует в формировании гелиосферного токового слоя (ГТС), модулирует поток космических лучей и геомагнитную активность. Структура короны Солнца хорошо визуализирует глобальное магнитное поле во время полных солнечных затмений [Всехсвятский и др., 1965; Sykora *et al.*, 2003; Tlatov, 2010a]. На рис. 5 показана тонкая структура короны Солнца, полученная М. Дрюкоммлером с помощью фильтрации изображений полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. [Judge *et al.*, 2010].



**Рис. 5.** Тонкая структура короны во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г.

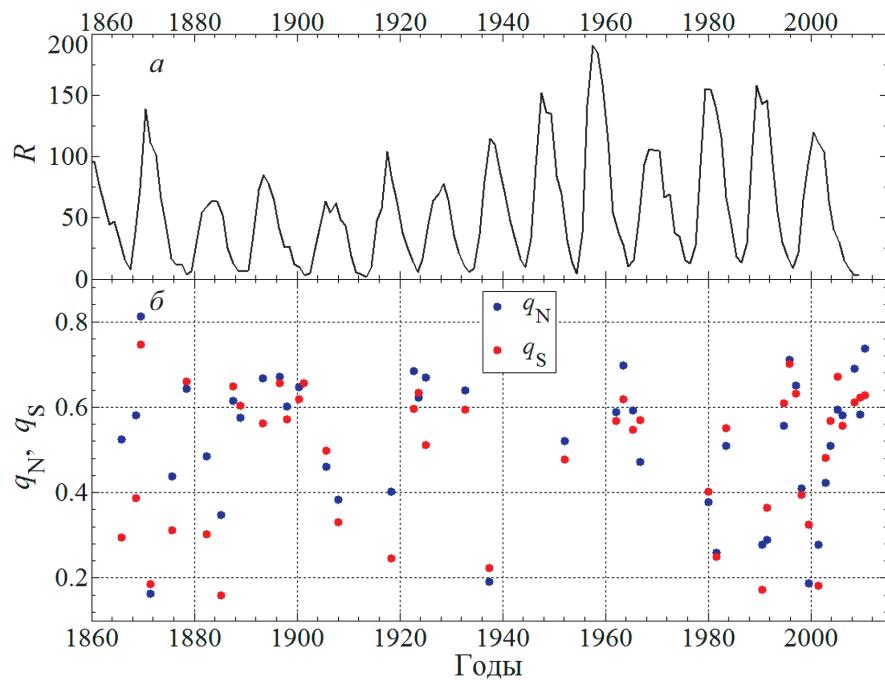


Рис. 6. Временной ряд чисел пятен  $R$  (а) и изменения положений магнитных фокусов  $q_N, q_S$  (б)

В эпохи минимума солнечной активности в приполярных областях наблюдаются полярные лучевые структуры (ПЛС) в виде так называемых полярных щеточек (перьев). Элементы ПЛС не строго радиальны: касательные вблизи их оснований пересекаются не в центре солнечного диска, как было бы при их строгой радиальности, а вблизи некоторых точек – магнитных фокусов. Удаление магнитных фокусов от центра солнечного диска характеризует геометрию полоидального магнитного поля Солнца и приходится на область ниже основания конвективной зоны ( $0,713 R_\odot$ ). Расстояния магнитных фокусов от центра Солнца также количественно характеризуют сверхрадиальное расширение полярных корональных дыр. Такая геометрия открытых магнитных конфигураций служит определяющим фактором при образовании высокоскоростных потоков солнечного ветра [Коваленко, 1983; Wang, Sheeley, 1990]. Положения магнитных фокусов в Северном и Южном полушариях Солнца характеризуют степень нерадиальности полярных лучевых структур, которая изменяется в зависимости от фазы 11-летнего цикла.

Анализ фильтграмм Солнца, полученных в спектральной линии FeIX/X 171Å крайнего ультрафиолетового диапазона по данным космической обсерватории SOHO/EIT позволил изучить изменения ПЛС в цикле 23 [Клепиков, Филиппов, 2006]. В начале цикла удаление магнитных фокусов от центра солнечного диска, выраженное в долях радиуса Солнца, в Северном и Южном полушариях  $q_N, q_S$  составляло около 0,6. В период смены знака полярного магнитного поля положение фокуса в Северном полушарии уменьшилось до 0,55, а в Южном полушарии – до

0,50: ПЛС стали ближе к радиальным. Вслед за изменениями, связанными со сменой знака полярного магнитного поля, расстояния от центра до магнитных фокусов увеличивались и составили около 0,6 в 2005 г. Анализ изображений короны, полученных во время солнечных затмений, показал, что удаление магнитных фокусов от центра диска продолжилось и в 2006, 2008, 2009 гг. [Язев и др., 2006, 2009; Язев, Батмунах, 2009].

Анализ изображений короны, полученных в XIX–XXI веках [Judge et al., 2010; Язев и др., 2009], позволил изучить изменения глобального магнитного поля Солнца в зависимости от фазы 11-летнего цикла. Для визуализации тонкой структуры ПЛС была применена узкополосная фильтрация изображений солнечных затмений, выполняемая с помощью быстрого двумерного преобразования Фурье. На рис. 6, а приведен график среднегодовых значений чисел пятен  $R$ . На рис. 6, б показаны положения магнитных фокусов в Северном и Южном полушариях  $q_N(t), q_S(t)$ , которые демонстрируют сложные изменения. Данные наблюдений распределены по времени неравномерно. В периоды, когда имеются несколько измерений за 11-летний цикл, между числами пятен и положением фокусов существует отрицательная корреляция. На рис. 7 показаны положения магнитных фокусов в зависимости от фазы 11-летнего цикла  $\varphi(t)=(t_2-t)/(t_2-t_1)$ , где  $t_1$  и  $t_2$  – моменты предшествующего и последующего минимумов активности. Сглаженный ход изменений геометрии ПЛС в 11-летнем цикле характеризуется регрессионной кривой [Мордвинов и др., 2011].

Циклические изменения положений магнитных фокусов по наблюдениям солнечных затмений за период

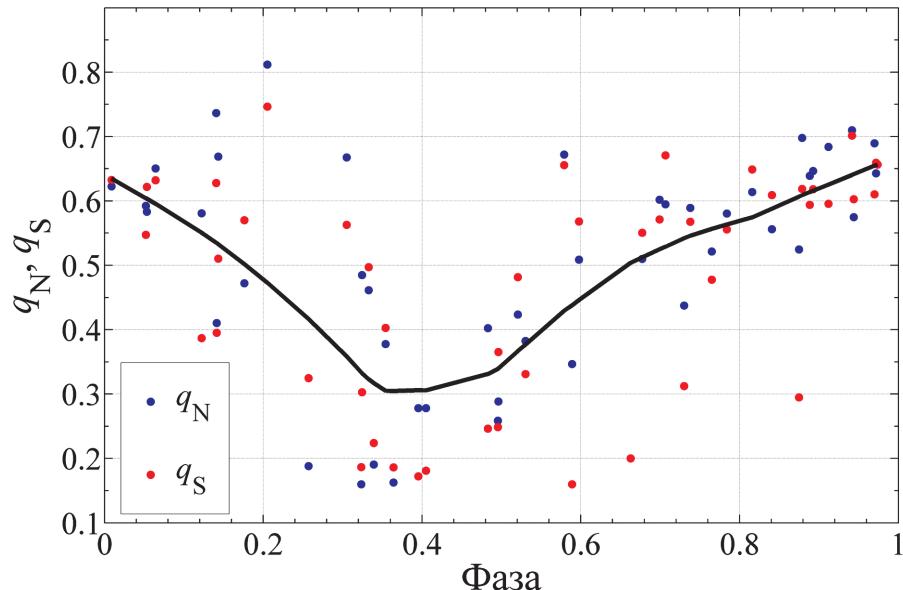


Рис. 7. Положения магнитных фокусов в зависимости от фазы 11-летнего цикла

1806–2010 гг. составляют около 0,35 по амплитуде, что заметно превышает амплитуду циклических вариаций, оцененных по изображениям Солнца в линии 171 Å для цикла 23 [Клепиков, Филиппов, 2006]. Возможно, что изменения положений магнитных фокусов в период переполюсовки определяются не столько эволюцией магнитного диполя в глубоких слоях, сколько процессами в атмосфере Солнца [Язев и др., 2009]. Известно, что по мере развития 11-летнего цикла активные области в приэкваториальных областях дрейфуют к экватору, при этом головные части магнитных диполей смещаются к экватору в большей степени, чем хвостовые. На гелиоширотах выше 70° общая активность невысока, в результате диффузия и меридиональная циркуляция приводят к тому, что остатки магнитных областей беспрепятственно дрейфуют к полюсам.

Типичная картина приполярных магнитных полей, в которой присутствуют магнитные поля с открытой и закрытой конфигурациями, представлена на

рис. 8, а. Закрытые магнитные конфигурации, связанные с остатками активных областей, дрейфуют в сторону приполярных открытых конфигураций. Когда области противоположных полярностей подходят друг к другу достаточно близко, происходит пересоединение силовых линий, в результате чего образуется сложная конфигурация, показанная на рис. 8, б. Под действием сил магнитного натяжения силовая линия уменьшает свою кривизну, и основание открытой силовой линии меняет положение. Эта реорганизация приводит к изменению направления касательной и перемещению магнитного фокуса (рис. 8, в). В результате серии последовательных пересоединений положение магнитных фокусов может заметно измениться, приводя к уменьшению расстояний фокусов от центра диска. Именно такие изменения происходят после обращения полярного магнитного поля по наблюдениям в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Наблюдаемая повышенная яркость полярных корональных лучей в крайнем УФ диапазоне свидетель-

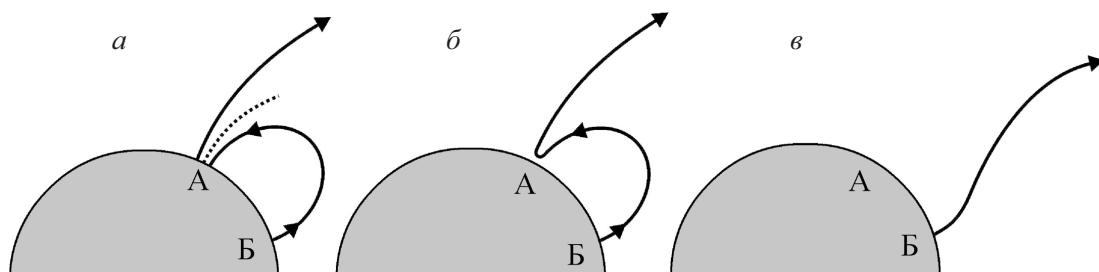


Рис. 8. Схема магнитного пересоединения в приполярной зоне Солнца: а – структура магнитных полей до пересоединения, б – начало пересоединения открытой и закрытой силовых линий, в – результат пересоединения

ствует об их дополнительном разогреве, что можно рассматривать как аргумент в пользу предлагаемого физического механизма.

Таким образом, анализ наблюдений полных солнечных затмений в XIX–XXI вв. показал, что геометрия ПЛС и определяемые ею углы сверхрадиального расширения полярных корональных дыр демонстрируют существование циклических и долговременных изменений. На протяжении всего периода наблюдений степень нерадиальности ПЛС, описанная в терминах магнитных фокусов, испытывает циклические 11-летние изменения. Эти изменения могут возникать в результате пересоединения открытого магнитного поля Солнца в полярных зонах с остаточными магнитными полями активных областей, дрейфующими к полюсам. Изучение динамики солнечного полярного магнитного поля позволило обнаружить вековые изменения его северо-южной асимметрии, по-видимому, связанные с вариациями квадрупольной составляющей магнитного поля Солнца [Мордвинов и др., 2011].

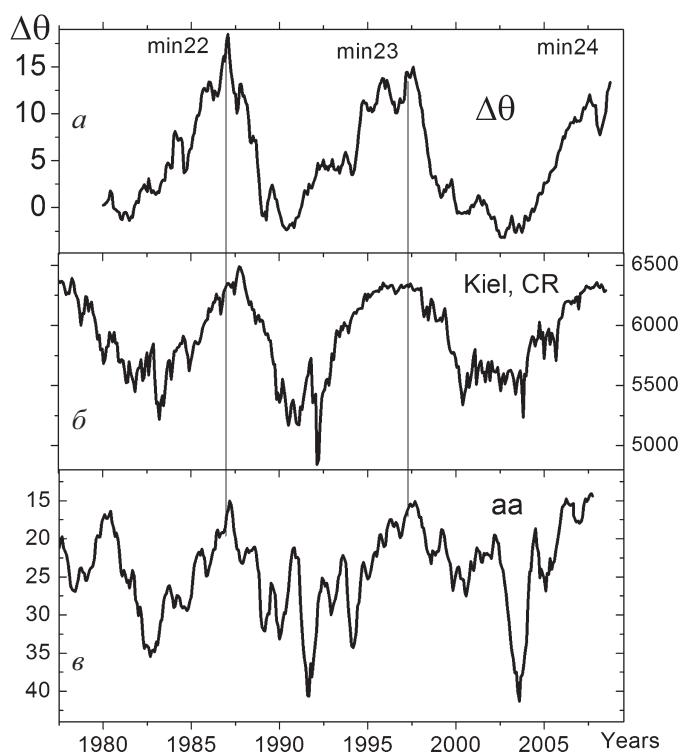
Северо-южная асимметрия магнитного поля Солнца возникает при сложении его дипольной и квадрупольной составляющих, приводя к усилению либо уменьшению напряженности поля на разных полюсах. Такая асимметрия может приводить к асимметрии межпланетного магнитного поля, а также к продолжительным отклонениям гелиосферного токового слоя (далее ГТС)

относительно экваториальной плоскости. Так, устойчивое смещение ГТС к югу, которое существовало в течение продолжительного времени [Mursula, Hiltula, 2004], можно охарактеризовать различием углового раствора полярных лучевых структур  $\gamma_N > \gamma_S$ , что соответствует условию  $q_N > q_S$ . Таким образом, различия в положениях магнитных фокусов в Северном и Южном полушариях Солнца характеризуют асимметрию его магнитного поля и связанное с нею отклонение ГТС относительно плоскости экватора. Различия в положении магнитных фокусов для Северного и Южного полушарий свидетельствуют о различиях скорости солнечного ветра на высоких гелиоширотах, где образуются потоки быстрого солнечного ветра. Различия характеристик солнечного ветра и межпланетного магнитного поля по разные стороны относительно эклиптики обнаружены экспериментально [Smith et al., 2000; Крымский и др., 2007].

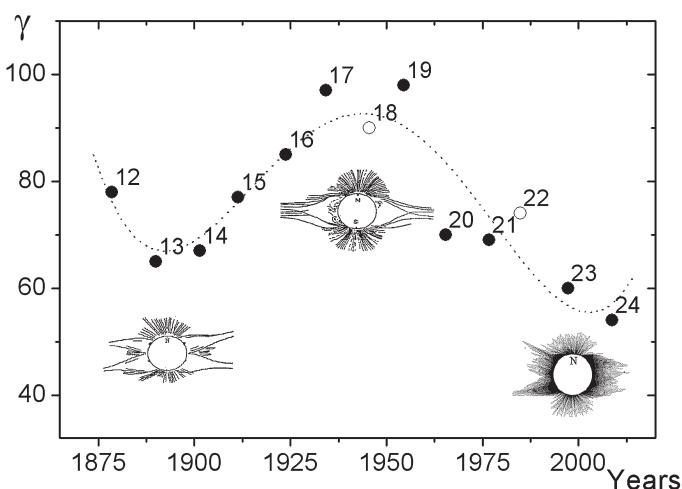
На изображениях короны в приэкваториальной области Солнца наблюдаются лучи, связанные со стримерами (см. рис. 5). Такие корональные лучи обладают повышенной электронной плотностью и прослеживаются до расстояний свыше десяти радиусов Солнца  $10 \cdot R_\odot$ . Направление корональных лучей, как правило, несколько отличается от радиального. Угол, характеризующий эти отклонения  $\Delta\theta$ , зависит от гелиошироты [Eselevich, Eselevich, 2002] и изменяется с фазой солнечного цикла, достигая максимума в эпохи минимума активности [Kim et al., 2004]. Информация об изменении угла  $\Delta\theta$  с фазой цикла важна для теоретических моделей, описывающих структуру короны и геометрию магнитного поля над солнечным лимбом.

Корональные лучи в эпоху минимума активности и фазы спада, как правило, развернуты по направлению к солнечному экватору. Наибольшее отклонение лучей от радиального направления происходит в эпоху минимума активности. Что касается эпохи максимума активности и переполюсовки магнитного поля Солнца, то лучи, как правило, направлены либо параллельно плоскости экватора, либо незначительно отклоняются к полюсам. Анализ данных наблюдений коронографов Mark-3,4 за период 1980–2008 гг. показал, что среднемесячные значения углов наклона корональных лучей  $\Delta\theta$  изменяются с 11-летним циклом активности, достигая максимальных значений в эпоху минимума активности. В минимуме 22-го цикла активности величина угла  $\Delta\theta$  составила около  $18,2^\circ$ , в минимуме 23-го цикла активности –  $14,7^\circ$ , а в минимуме 24-го цикла – около  $9^\circ$ .

На рис. 9 приведены графики изменения индекса геомагнитных возмущений  $aa$  и вариации потока космических лучей. В годы максимума активности значительно влияние активных областей и эруптивных процессов. В эпохи минимума активности и на фазе ее роста поведение индексов  $\Delta\theta$  и  $aa$  имеет близкий характер модуляции. Отклонение корональных стримеров от радиального направления близко к углу наклона ГТС, который определяется как сумма мак-



**Рис. 9.** *a* – Изменения угла отклонения корональных стримеров от радиального направления; *б* – поток космических лучей по данным нейтронного монитора (Киль); *в* –  $aa$  – индекс геомагнитных возмущений



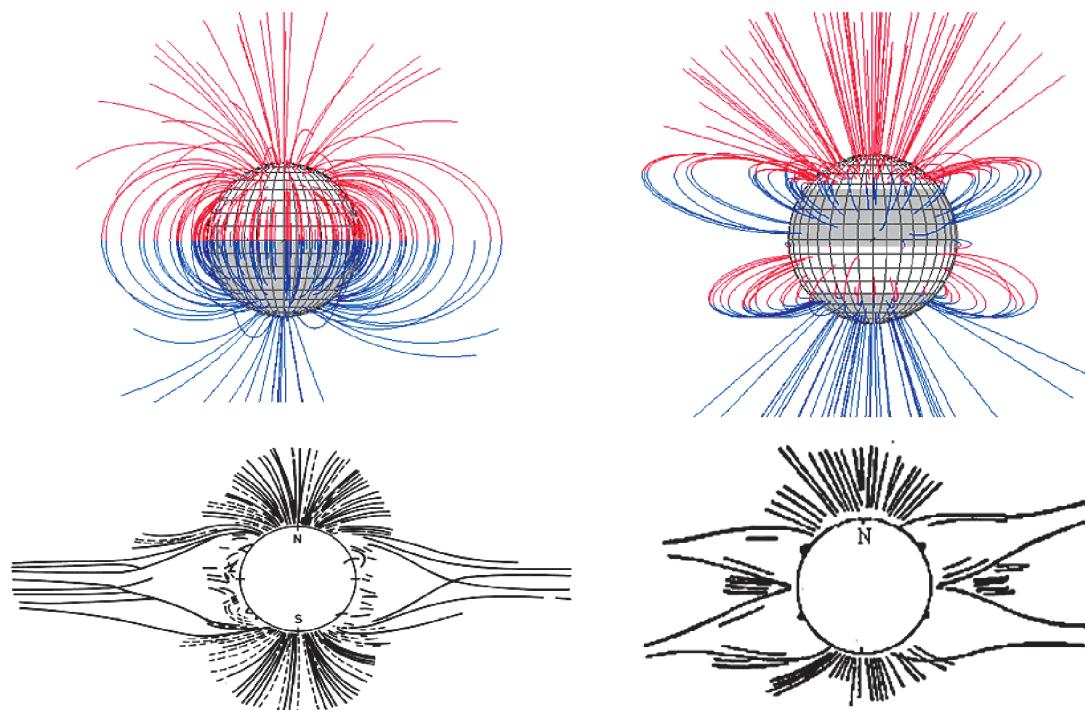
**Рис. 10.** Распределение параметра  $\gamma$  структуры солнечной короны в эпохи минимумов активности. Представлены номера циклов активности. Показана структура короны для минимумов 13, 19 и 24-го циклов

симимальных отклонений широты нейтральной линии для каждого кэррингтоновского оборота. Корреляция между значениями угла  $\Delta\theta$  и углом наклона ГТС составляет  $R = 0,91$ .

Структура короны в эпохи минимумов активности характеризуется ярко выраженным опахальными лучами, расположенными вблизи плоскости гелиоэкватора. Детальный анализ наблюдений полных солнечных затмений показал, что форма короны, угловой

раствор ее шлемовидных лучей на западном и восточном лимбах изменяются не только в течение 11-летнего цикла, но и на столетней шкале времени [Tlatov, 2010b]. Степень «сжатия» короны характеризуется параметром  $\gamma$ , который определяется как сумма угловых растворов опахальных лучей на западном и восточном лимбах. На рис. 10 показаны изменения индекса  $\gamma$  за 1878–2008 гг. и вид солнечной короны в эпохи минимумов активности. В середине XX в. опахальные лучи наблюдались параллельными плоскости экватора. В то же время, в начале XX и XXI вв. шлемовидные лучи имели существенно больший угловой раствор, структура короны значительно отличалась от классической короны минимального типа.

Анализ формы короны [Tlatov, 2010b] выявил вековую модуляцию глобального магнитного поля Солнца, происходившую согласованно с циклом Глайссберга. Вековые изменения глобального магнитного поля проявляются в относительном изменении соотношений между дипольной и квадрупольной компонентами магнитного поля. На рубеже XIX–XX и XX–XXI вв. форма короны больше соответствовала квадрупольной конфигурации, а в середине XX в. – дипольной (рис. 11). Вариации формы короны в минимумах активности отражают влияние глобального магнитного поля на поле во внешней короне, в которой формируется поток солнечного ветра. Отклонение корональных стримеров и потока солнечного ветра от экваториальной плоскости и от плоскости эклиптики может влиять на параметры солнечного ветра на орбите Земли и быть ответственным за вековые изменения геомагнитной активности.



**Рис. 11.** Конфигурация силовых линий для короны дипольного (слева) и октупольного (справа) типов. Также показаны конфигурации короны в эпохи минимумов 13-го и 19-го циклов активности

## ИЗМЕНЕНИЯ ПЯТНООБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА НА ВЕКОВОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ

Прямые наблюдения за Солнцем можно признать удовлетворительными, начиная с 70-х годов XIX в. Надежно установлено, что существует 80–90-летний цикл Глайссберга, который модулирует 11-летнюю цикличность активности Солнца на длительной шкале времени. По ряду косвенных, но надежных данных обнаружен 200-летний цикл Зюсса и вариации активности продолжительностью в нескольких столетий и даже тысячелетий. Изучение таких ярких экстремальных проявлений солнечной активности как, например, глобальный минимум Маундера во второй половине XVII в. или Средневековый и Позднесредневековый глобальные максимумы в XII и XIV вв. соответственно, образованных суперпозицией длительных цикличностей, требует обширного наблюдательного материала.

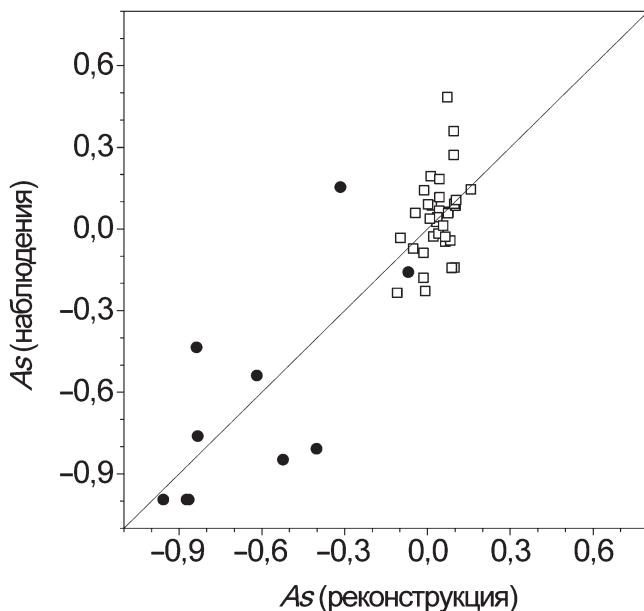
Именно эта цель: получение физически информативных комплексных данных о динамике солнечного, межпланетного и геомагнитного поля на больших временных масштабах – ставилась в Пулкове в рамках программы Президиума РАН № 16. Ранее были выполнены работы по продлению в прошлое рядов традиционных (статистических) индексов солнечной активности. Эти ряды размещены в электронной базе ESAI <http://www.gao.spb.ru/database/esai>, описанной в [Nagovitsyn et al., 2004]. Традиционные данные были дополнены версиями продолженных в прошлое временных рядов индексов различных компонентов солнечной активности, полученных с помощью реставрации ранних наблюдений разных авторов XIX в. и компиляции их в базовые системы. Последующий основной этап исследований был связан с реконструкциями параметров солнечной активности на более длительных временах: порядка нескольких сотен лет. Математическую основу таких реконструкций составили предложенные оригинальные методы MSR (Multi-Scale Regressions) и DPS (Decomposition in pseudo-Phase Space), позволяющие в рамках современных математических подходов устанавливать мультиаспектные (по времени) связи различных индексов СА [Nagovitsyn et al., 2004; Nagovitsyn, 2006]. Первый из этих методов основан на вейвлет-преобразовании и сводится к построению регрессий в пространстве вейвлет-коэффициентов рядов с последующим обратным вейвлет-преобразованием; второй – на разложении индексов по компонентам псевдофазового пространства, полученного преобразованием запаздывающих координат Такенса опорного индекса. Методы позволяют по временному ряду одного индекса, описывающего процесс СА, получать временный ряд другого ее индекса, имея в виду, что оба они производятся единой динамической системой.

В результате исследований была произведена реконструкция основных физических параметров космической погоды на 400-летней временной шкале RSW-400 [Наговицын и др., 2008]. Получены длительные ряды полного пятенного магнитного потока, индексов геомагнитной активности, напряженности ММП, диполь-октупольного индекса крупномасштабного магнитного поля Солнца, а также открытого магнитного потока – важного параметра гелиосферы. В качестве базового использовался продленный ряд суммарной площади пятен [Наговицын, 2005] с дополнением для Маундеровского минимума [Наговицын, 2007]. Отметим, что полученные временные серии, фиксирующие собой наши эмпирические представления о длительном поведении солнечной активности, необходимы для целого ряда гелио- и гелио-геофизических работ.

Длительные временные серии-реконструкции фиксируют изменения глобального магнитного поля Солнца и сопутствующих им вариаций в межпланетном и геомагнитном поле. Однако нас интересуют и более детальные вопросы. Например, как изменились на длительной временной шкале северо-южная асимметрия солнечной активности, средние широты пятен, характеристики зон пятнообразования (так называемых «бабочек Маундера»)? Первые «пилотные» исследования в этом направлении для 300–400-летней шкалы выполнены в работах [Милецкий, Иванов, 2009; Наговицын и др., 2010; Ivanov, Miletzky, 2010].

Вначале – о северо-южной асимметрии пятнообразования. Несмотря на усилия, направленные на исследование закономерностей процесса глобальной пространственной организации солнечной цикличности, физическая картина временных изменений N-S асимметрии активности  $As = (N - S)/(N + S)$  (где  $N$  и  $S$  – значения выбранных индексов в соответствующих полушариях) во многом не ясна. Надежные гринвичские данные о ней имеются только с 1874 г., расширенные, из нашей базы данных ESAI, – с 1821 г. Мы рассмотрели «полушарные» значения индексов солнечной активности отдельно, что позволило произвести реконструкцию N- и S-активности с помощью предложенного нами ранее подхода разложения по псевдофазовому пространству – DPS [Наговицын, 2006]. В качестве опорного ряда площадей пятен в N- и S-полушариях использовались ряды из базы ESAI [www.gao.spb.ru/database/esai](http://www.gao.spb.ru/database/esai) на интервале 1821–2005 гг., в качестве реконструирующего ряда – последняя версия ряда суммарной площади пятен на 400-летнем интервале. Результаты реконструкции: площади пятен в N полушарии описываются на интервале 1821–2005 гг. с коэффициентом корреляции  $\rho = 0,977$ , в S полушарии – 0,970.

Сделаем следующую проверку полученных значений именно в плане асимметрии полушарий  $As$ . При проведении реконструкции активности в отдельных полушариях мы не использовали значения  $As$  в Маундеровском минимуме, известные из работы [Ribes, Nesme-Ribes, 1993]. Рассчитаем этот параметр

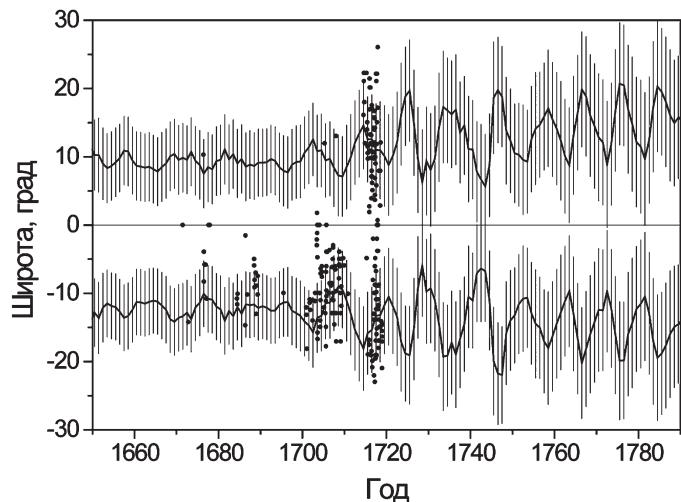


**Рис. 12.** Иллюстрация соответствия модельных значений N-S асимметрии полуширот с наблюдениями. Светлые квадраты – использованные в модели значения (1821–2005 гг.), темные кружки – независимые тестовые наблюдения в Маундеровском минимуме (1671–1718 гг.).

для реконструированных значений и сравним с наблюдениями из цитируемой работы (рис. 12). Для среднепятилетних значений коэффициент корреляции оказывается  $\rho = 0,702$  с коэффициентами регрессии ( $y = a + bx$ )  $a = -0,06 \pm 0,23$ ,  $b = -0,93 \pm 0,33$ , статистически не противоречивыми величинам 0 и 1 соответственно. Мы считаем это хорошим результатом, имея в виду наши скучные сведения о Маундеровском минимуме и вообще недостаточность наших знаний о параметре N-S асимметрии. Общий же коэффициент корреляции между реконструированными значениями  $As$  и всеми ее наблюденными значениями составил 0,875.

Перейдем теперь к следующему интересующему нас индексу активности: средней широте пятнообразования. Произведем раздельную по полуширотам реконструкцию  $\phi_N$  и  $\phi_S$  также с использованием DPS-метода, беря за основу наши данные о наблюденных значениях этих параметров из базы ESAI за 1853–1984 гг. Полученные коэффициенты корреляции между математической моделью и наблюдениями составили  $\rho = 0,833$  для N полушария и  $\rho = 0,852$  – для S. Данные по Маундеровскому минимуму, как и в предыдущем разделе, в модели не использовались.

В качестве теста произведенной реконструкции используем, как и ранее, независимые данные Риб и Нем-Риб по Маундеровскому минимуму (рис. 13). Заметим, что наша реконструкция правильно отражает среднюю картину убывания абсолютных значений широт по мере приближения к этой эпохе, однако

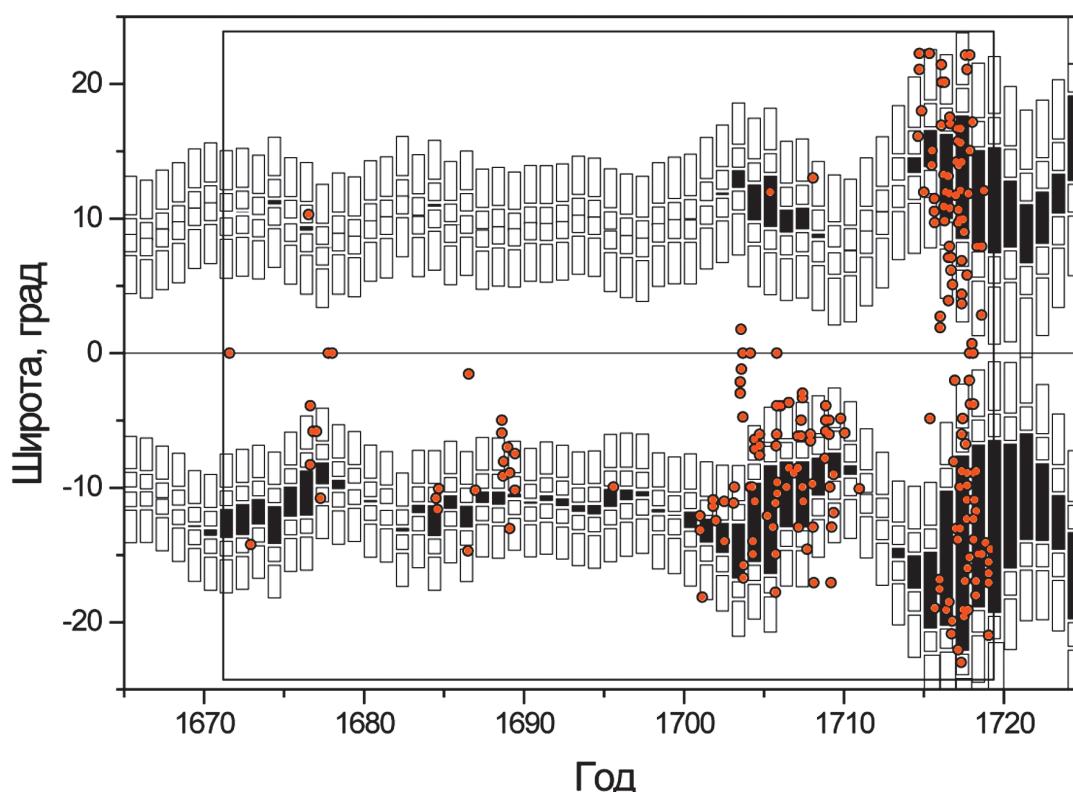


**Рис. 13.** Сравнение модельных значений широт с независимыми тестовыми наблюдениями в Маундеровском минимуме (квадраты). Вертикальные линии – доверительные интервалы модели на уровне 3 $\sigma$

представляется, что реконструированные значения несколько больше наблюдаемых, приблизительно на  $\sim 10\%$ . Подчеркнем, что при построении DPS-модели мы не использовали данных Маундеровского минимума. Поэтому полученные результаты нам кажутся удовлетворительными, хотя для дальнейшего пришлось умножить модельные значения широт для Маундеровского минимума на коэффициент 0,9.

Теперь перейдем к главной цели исследования данного раздела: реконструкции пространственного распределения солнечной активности в Маундеровском минимуме. В работе [Милецкий, Иванов, 2009] для 11-летнего цикла солнечной активности установлена тесная связь между его проявлениями во времени (закон Швабе–Вольфа) и пространстве (закон Шпререра–Маундера). Более конкретно было показано, что ширина бабочек Маундера в 11-летнем цикле зависит от текущего уровня активности. Применяя DPS-метод (для учета зависимостей от более продолжительных циклов, чем 11-летний), с использованием результатов, полученных выше, мы произвели реконструкцию бабочек Маундера, в том числе – это было для нас основным – в одноименном глубоком минимуме солнечной активности. Рис. 14 показывает сравнение полученной картины с наблюдениями по Нем-Риб.

Мы видим, что примененный подход к реконструкции оказался перспективным: модельная картина достаточно хорошо соответствует наблюденной. Результаты, отраженные главным образом на рис. 14, позволяют надеяться на дальнейшее развитие надежных представлений об изменениях солнечной активности в прошлом. По-видимому, впервые получены свидетельства того, что мы можем реконструировать не только общий уровень солнечной активности на длительных временах, но и детали ее развертывания: преобладание пятен



**Рис. 14.** Модельные бабочки Маундера в одноимённом глобальном минимуме солнечной активности (темные области) в сравнении с наблюдениями (оранжевые кружки). Вертикальные прямоугольники показывают  $\sigma$

в той или иной полусфере, дрейф и характер зоны пятнообразования, особенности пространственного распределения активности во время особых эпох, таких как минимум Маундера, что важно для дальнейшего изучения длительного поведения активности Солнца и звезд поздних спектральных классов с магнитными циклами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены новые результаты изучения различных проявлений магнитной активности Солнца. С высоким времененным разрешением изучена динамика магнитного поля и вещества в фотосфере Солнца при возникновении активных областей (от момента зарождения до образования первых пор). Образование активной области связано со всплытием петлеобразной трубки магнитного поля из-под фотосферных слоев. Построена обобщенная картина развития магнитного поля и движений вещества в этот период. На ранней стадии развития активной области зарегистрирована асимметрия доплеровских скоростей между участками магнитного поля противоположной полярности, знак которой соответствует направлению движения вещества из ведущего магнитного полю-

са к последующему. Сделано заключение о том, что концентрация большей части магнитного потока во всплывающей петлеобразной трубке магнитного поля происходит прежде, чем он достигнет поверхности Солнца. Возникновение устойчивых пятен связано с выходом на поверхность магнитного поля большей напряженности. Рост напряженности магнитного поля в процессе образования поры сопровождается ростом скорости опускания вещества.

Исследования формы и структуры короны Солнца дают важную информацию о топологии крупномасштабных магнитных полей Солнца и ее изменениях за большой интервал времени. В минимуме активности наиболее отчетливо проявляются свойства глобального магнитного поля Солнца, его дипольная составляющая. Квадрупольная и октупольная составляющие также дают заметный вклад в общее магнитное поле Солнца, изменяющийся в ходе векового цикла. Анализ наблюдений полных солнечных затмений в XIX–XXI вв. показал, что геометрия полярных лучевых структур и углы сверхрадиального расширения полярных корональных дыр испытывает циклические 11-летние изменения. Предложено объяснение этих изменений, которые возникают в результате пересоединения дипольного магнитного поля Солнца с остаточными магнитными полями активных областей, дрейфующими к полюсам.

К настоящему времени накоплен большой объем данных о поведении магнитного поля Солнца на длительных временах. Эти данные составили электронную базу ESAI <http://www.gao.spb.ru/database/esai>, позволили выполнить реконструкцию основных физических параметров космической погоды за 400 лет. За этот период изучено поведение северо-южной асимметрии магнитной активности Солнца и изменения средних широт зон пятнообразования. Впервые реконструировано широтно-временное распределение пятен в эпоху Маундеровского минимума, согласующееся с эпизодическими наблюдениями конца XVII в. Изучение долговременных изменений магнитного поля Солнца имеет несомненное практическое значение, поскольку такие изменения влияют на состояние околоземного космического пространства и климат Земли. Исследования, выполненные в рамках Программ Президиума РАН, позволили оценить многофакторное влияние солнечной активности на долговременные изменения геомагнитной и климатической системы Земли.

*Работа выполнена по Программе Президиума РАН № 16 при частичной поддержке РФФИ (гранты 09-02-00083, 09-02-90204 Монг\_а, 10-02-00391), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и гранта поддержки ведущих научных школ НШ-3645.2010.2.*

## ЛИТЕРАТУРА

Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Иванчук В.И., Несмянович А.Т. и др. Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве / Ред. С.К. Всехсвятский. Киев, 1965. 216 с.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Динамика лучевых скоростей и магнитного поля в фотосфере Солнца при возникновении мощной активной области NOAA 10488 // Письма в Астрон. журнал. 2007. Т. 33. С. 858–862.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Появление магнитного потока и рождение активных областей // Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы. Т. VIII: Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля / Ред. Н.П. Лаверов и Г.А. Жеребцов. ИСФЗ СО РАН; ИФЗ РАН 2008. С. 13–20.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Появление магнитного потока на солнечной поверхности и рождение активных областей // Астрон. журнал. 2009. Т. 86. С. 935–944.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Динамика лучевых скоростей в фотосфере при возникновении активных областей // Астрон. журнал. 2011. Т. 88. С. 184–195.

Демидов М.Л., Григорьев В.М. Крупномасштабные магнитные поля на Солнце // Солнечно-земная физика. 2004. Т. 6. С. 10–19.

Дергачев В.А., Дмитриев П.Б., Распопов О.М., Юнгнер Х. Вариации потоков космических лучей, модулированные солнечным и земным магнитными полями, и климатические изменения.

Ч. I: Временной интервал до 10000–12000 лет назад (эпоха Голоцен) // Геомагнетизм. Аэрономия. 2006. Т. 46. С. 123–134.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Роль солнечной и геомагнитной активности в изменении климата Земли // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 53–59.

Клепиков Д.В., Филиппов Б.П. Поведение магнитных фокусов полярного поля в цикле солнечной активности по данным SOHO/EIT // Изв. РАН. Сер. физическая. 2006. Т. 70. С. 1436–1438.

Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983. 272 с.

Крымский А.А., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.П. и др. Гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей с циклом солнечной активности // ЖЭТФ Что это? 2007. Т. 131. Вып. 2. С. 214–221.

Милецкий Е.В., Иванов В.Г. Широтные характеристики зоны пятнообразования на Солнце и 11-летний цикл солнечной активности // Астрон. журнал. 2009. Т. 86, № 9. С. 922–927.

Мордвинов А.В. Долговременные изменения асимметрии магнитного поля Солнца и геометрии межпланетного магнитного поля // Космич. исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 323–328.

Мордвинов А.В., Язев С.А., Рыкова Е.Г., Дворкина-Самарская А.А. Долговременные изменения геометрии полярного магнитного поля Солнца по наблюдениям полных солнечных затмений // Солнечно-земная физика. 2011. В печати.

Наговицын Ю.А. К описанию долговременных вариаций магнитного потока Солнца: индекс площадей пятен // Письма в Астрон. журнал. 2005. Т. 31, № 8. С. 622–627.

Наговицын Ю.А. Солнечная и геомагнитная активность на большой временной шкале: реконструкция и возможности для прогнозов // Письма в Астрон. журнал. 2006. Т. 32. С. 382–391.

Наговицын Ю.А. Циклы солнечной активности во время Маундеровского минимума // Письма в Астрон. журнал. 2007. Т. 33. № 5. С. 385–391.

Наговицын Ю.А. Глобальная активность Солнца на длительных временах // Астрофиз. бюлл. 2008. Т. 63. № 1. С. 45–58.

Наговицын Ю.А., Иванов В.Г., Милецкий Е.В., Наговицына Е.Ю. Минимум Маундера: северо-южная асимметрия пятнообразования, средние широты пятен и диаграмма бабочек // Астрон. журнал. 2010. Т. 87. № 5. С. 524–528.

Наговицын Ю.А., Милецкий Е.В., Иванов В.Г., Гусева С.А. Реконструкция физических параметров космической погоды на 400-летней шкале // Космич. исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 291–302.

Огурцов М.Г. Прогноз 24-го цикла солнечной активности на основе информации о солнечной активности за последние 10000 лет // Геомагнетизм. Аэрономия 2009. Т. 49, № 3. С. 427–430.

Пипин В.В., Кичатинов Л.Л. Солнечное динамо и колебания интегрального потока излучения в 11-летнем цикле // Астрон. журнал. 2000. Т. 77. С. 872–880.

Язев С.А., Батмуунх Д. Наблюдения полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. в Монголии // Земля и Вселенная. 2009. № 1. С. 57–61.

Язев С.А., Батмуунх Д., Барабанов С.И. Наблюдения солнечного затмения на пике Терскол // Земля и Вселенная. 2006. № 6. С. 102–104.

- Язев С.А., Мордвинов А.В., Пещеров В.С., Семенов Д.В., Лхагва-жас Ч., Улам-Оргех Д., Бат-Отгон Б., Тувшинтуяа П., Даваахуу Г., Батмуух Д., Вашиаа С. Структура короны по наблюдениям полных солнечных затмений на предминимальной фазе 23 цикла солнечной активности // Тр. совещания «Циклы активности на Солнце и звездах» (Москва, 18–19 декабря 2009 г.). СПб., 2009. С. 135–142.
- Eselevich V.G., Eselevich M.V. Study of the nonradial directional property of the rays of the streamers belt and chains in the solar corona // Solar Physics. 2002. V. 208. P. 5–16.
- Fan Y., Fisher G.H., Deluka E.E. The origin of morphological asymmetries in bipolar active regions // Astrophys. Journ. 1993. V. 405. P. 390–401.
- Ivanov V.G., Miletsky E.V. Width of Sunspot Generating Zone and Reconstruction of Butterfly Diagram // Solar Physics. 2010. V. 268. N 1. P. 231–242.
- Judge P.G., Burkepile J., de Toma G., Druckmüller M. Historical Eclipses and the Recent Solar Minimum Corona // ASP Confer. ser. 2010. V. 428. P. 171–176.
- Kim G.D., Makarov V.I., Tlatov A.G. Measurements of brightness and nonradial direction of coronal streamers according to data of SOHO/Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment (LASCO)-C2 // Intern. Journ. Geomagnetism and Aeronomy. 2004. V. 5. GI2011.
- Mordvinov A.V., Kramynin A.P. Long-term changes in sunspot activity, occurrence of grand minima and their future tendencies // Solar Physics. 2010. V. 264. P. 269–278.
- Mursula K., Hiltula T. Systematically asymmetric heliospheric magnetic field: evidence for a quadrupole mode and non-axisymmetry with polarity flip-flop // Solar Physics. 2004. V. 224. P. 133–143.
- Nagovitsyn Yu.A., Ivanov V.G., Miletsky E.V., Volobuev D.M. ESAI data base and some properties of solar activity in the past // Solar Physics. 2004. V. 224. № 1–2. P. 103–112.
- Ribes J.C., Nesme-Ribes E. The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715 // Astronomy. Astrophysics. 1993. V. 276. P. 549–563.
- Smith E.J., Jokipii J.R., Kota J., Lepping R.P., Szabo A. Evidence of a north-south asymmetry in the heliosphere associated with a southward displacement of the heliospheric current sheet // Astrophys. Journ. 2000. V. 533. P. 1084–1089.
- Sykora J., Badalyan O.G., Obrikko V.N. Connections between the white-light eclipse corona and magnetic fields over the solar cycle // Solar Physics. 2003. V. 212. P. 301–318.
- Tlatov A.G. The Non-radial Propagation of Coronal Streamers within a Solar Cycle // Astrophys. Journ. 2010a. V. 714. P. 805–809.
- Tlatov A.G. The centenary variations in the solar corona shape in accordance with the observations during the minimal activity epoch // Astronomy. Astrophysics. 2010b. V. 522. A27.
- Wang Y.M., Sheeley N.R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion // Astrophys. Journ. 1990. V. 355. P. 726–735.

# СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Владова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ . . . . .	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Сущев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ . . . . .	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ . . . . .	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омельяненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ . . . . .	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ) . . . . .	77
<i>Б.И. Омельяненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА . . . . .	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омельяненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ . . . . .	99
<i>И.Н. Солодов, А.К. Лисицын</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ . . . . .	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ . . . . .	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЁДНИКОВОГО ПОКРОВА . . . . .	139

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ . . . . .	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА . . . . .	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА . . . . .	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ . . . . .	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куянцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА . . . . .	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ . . . . .	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ . . . . .	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА . . . . .	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ . . . . .	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ) . . . . .	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ . . . . .	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТИКИ УДАРА . . . . .	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ) . . . . .	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ . . . . .	355

---

<i>Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич</i>	
ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ	
И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ . . . . .	373
<i>В.Ч. Хон, И.И. Мохов</i>	
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ	
И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ . . . . .	392
<i>В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов,</i>	
<i>В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев</i>	
ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ	
В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ . . . . .	399
<i>С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С. Андреева, И.В. Николаев</i>	
ОСОБЕННОСТИ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ	
И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ	
В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА . . . . .	413

Научное издание

# ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

## ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы  
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. Собисевич Алексей Леонидович

Технический редактор В.И. Горбенко  
Компьютерная верстка К.А. Мордвинцев  
Корректор С.Б. Суслова

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8  
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»  
109544 Москва, ул. Рабочая, 91