

Астрономическое общество

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В.Пушкова Российской академии наук

Институт астрономии Российской академии наук

Астрономия-2018

Том 2

Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы

Москва
2018

Астрономия-2018

Том 2

Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы

Под редакцией В.Н. Обридко

В рамках конференции "Астрономия-2018", приуроченной к XIII съезду Международной общественной организации "Астрономическое общество" (ГАИШ МГУ, 22-26 октября 2018), была проведена секция «Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы». В настоящий том входят краткие сообщения, отражающие наиболее важные результаты, доложенные на конференции. Основная тематика включает в себя следующие направления:

1. Солнечная цикличность и строение активных областей.
2. Нестационарные процессы в явлениях солнечной активности.
3. Воздействие солнечной активности на геофизические процессы.
4. Воздействие космических факторов на биосферу Земли.

Astronomy-2018

Volume 2

Solar-Terrestrial Physics – the Current State and Prospects

Edited by V.N.Obridko

The topical session “Solar-Terrestrial Physics – the Current State and Prospects” was held within the framework of the Astronomy-2018 Conference associated with the XIII Assembly of the Euro-Asian Astronomical Society (Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, 22-26 October 2018). This Volume comprises brief communications that present the most important results submitted to the Conference. The main topics discussed are as follows:

1. Solar cycle and structure of active regions.
2. Nonstationary processes in the phenomena of solar activity.
3. The effect of solar activity on geophysical processes.
4. The impact of cosmic factors on the Earth's biosphere.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<i>Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Гайдаш С.П., Ерошенко Е.А., Прямушкина И.И., Трефилова Л.А.</i> Уникальная база данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде.	7
<i>Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Гайдаш С.П., Крякунова О.Н., Николаевский Н.Ф., Прямушкина И.И., Трефилова Л.А.</i> Воздействие различных типов возмущений межпланетной среды на высокоэнергичные электроны на геостационарных орбитах.	11
<i>Абунин А.А., Белов А.В., Черток И.М.</i> Анализ возмущений космической погоды от мощных эруптивных вспышек сентября 2017 г.	15
<i>Бадин В.И.</i> Резонансное УНЧ поглощение при различных направлениях межпланетного магнитного поля.	19
<i>Белшиева. Н.К.</i> Особенности воздействия космогеофизических агентов на организм человека.	23
<i>Белов А.В., Гуцина Р.Т., Янке В.Г.</i> Вариации космических лучей в 23-24 циклах солнечной активности по данным мировой сети станций космических лучей.	27
<i>Биленко И.А.</i> Магнитные поля на фотосфере и в короне в областях корональных дыр.	31
<i>Богод В.М., Кальтман Т.И.</i> Магнитосфера активной области по радионаблюдениям в широком диапазоне длин волн.	35
<i>Подгорный А.И., Борисенко А.В.</i> Использование суперкомпьютера для изучения механизма солнечной вспышки путем МГД моделирования в короне.	39
<i>Бочкарев Н.Г.</i> Влияние межзвездной среды на биосферу Земли.	43
<i>Бусарев В.В.</i> Обнаружение влияния активности Солнца на сублимационную активность примитивных астероидов.	47
<i>Григорьев В.М., Ермакова Л.В.</i> Асимметрия в появлении и развитии нового магнитного потока активных областей.	51
<i>Гуляев Р.А.</i> Действительно ли солнечная корона отсутствовала в период Маундеровского минимума?	55
<i>Гуляев Р.А., Гуляева Т.Л.</i> Возрастание мощности центральной корональной дыры к минимуму солнечной активности: реакция ионосферы.	59
<i>Дайбог Е.И., Логачев Ю.И.</i> Сравнительный анализ временных профилей потоков юпитерианских электронов МЭВ-ных энергий и галактических протонов.	63
<i>Демидов М.Л.</i> О неопределенности исходных данных в задачах прогноза космической погоды. Сопоставление магнитограмм различных обсерваторий.	66

<i>Деминов М.Г., Деминова Г.Ф.</i>	70
Выбор индекса солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы.	
<i>Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н.</i>	72
Свойства ионосферы на фазах спада и в минимумах последних солнечных циклов.	
<i>Devi M., Patgiri S., Barbara A.K., Gordiyenko G.I., Depueva A.H., Depuev V.H.</i>	74
Spatial features of geomagnetic storms manifestation according to ionosphere observations at different latitudes.	
<i>Егоров Я.И., Файнштейн В.Г., Мышьяков И.И., Анфиногентов С.А., Руденко Г.В.</i>	78
Исследование вариаций магнитного поля, сопровождающих эруптивное событие 7 июня 2011 года, с использованием нелинейной бессиловой экстраполяции поля.	
<i>Загайнова Ю.С., Файнштейн В.Г., Мышьяков И.И.</i>	82
Сравнение особенностей формирования корональных выбросов массы, имеющих разную скорость в поле зрения коронографов LASCO.	
<i>Зельдович М.А., Логачев Ю.И.</i>	86
Сверхтепловые ионы из корональных дыр на 1 а.е. в 23 и 24 солнечных циклах.	
<i>Ишков В.Н.</i>	90
Геоэффективность солнечных активных явлений текущего солнечного цикла: условия, особенности реализации и возможность прогноза.	
<i>Ишков В.Н.</i>	94
Сравнительный анализ сценария вспышечного энерговыделения в активных областях эпох повышенной и пониженной солнечной активности.	
<i>Карпачев А.Т., Чирик Н.В., Клименко В.В., Клименко М.В.</i>	98
Эмпирические модели электронной концентрации в максимуме высокоширотного F2 слоя ионосферы на основе спутниковых измерений для различных уровней солнечной активности.	
<i>Ковалев В.А.</i>	102
Режим с обострением, структуры, несингулярная эволюция.	
<i>Корсунова Л.П., Легенька А.Д.</i>	106
Изменения в ионосфере перед сильными коровыми землетрясениями в различных сейсмоактивных зонах.	
<i>Kostin V.M., Belyaev G.G., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P.</i>	110
Influence of cyclones on the plasma parameters of the upper ionosphere in the two-year period after the mounts Pinatubo and Hudson eruptions.	
<i>Котова Д.С., Оводенко В.Б.</i>	114
Метод коррекции параметров эмпирических моделей ионосферы по данным наклонного полного электронного содержания.	
<i>Кузнецов В.Д., Осин А.И.</i>	118
МГД ударные волны в бесстолкновительной плазме солнечного ветра.	
<i>Кузнецова Т.В.</i>	122
Особенности годовых распределений частоты появления больших геомагнитных возмущений в четных и нечетных циклах солнечной активности.	
<i>Куликова Н.В., Чепурова В.М.</i>	126
О возможных последствиях воздействия Солнца на комету 1P/Галлея 1986 года.	
<i>Ларкина В.И.</i>	131
Влияние солнечной активности на процессы возбуждения низкочастотных шумовых излучений на высотах внешней ионосферы.	

<i>Lundin B.V.</i>	135
Electron whistler wave emission in the Earth plasmasphere and an appropriate spectral matrix analysis depending on solar activity.	
<i>Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г.</i>	137
Форбуш–понижения и корональные выбросы массы: распределение по величине.	
<i>Meshalkina N.S., Fleishman G.D., Altyntsev A.T.</i>	141
The 10 July 2012 event: an example of narrowband gyrosynchrotron burst?	
<i>Мирошниченко Л.И.</i>	145
Экстремальные солнечные вспышки по архивным данным о протонных событиях.	
<i>Михайлов А.В, Перроне Л.</i>	151
Долговременные изменения полного потока солнечного EUV ($\lambda < 1050$ А) по данным ионосферных наблюдений за 5 циклов солнечной активности.	
<i>Михайлов А.В, Перроне Л.</i>	155
Долговременные изменения термосферных параметров: источник естественный или антропогенный?	
<i>Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И.</i>	159
Вариации атмосферных помех на Камчатке во время солнечных вспышек и геомагнитных возмущений.	
<i>Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Смирнов С.Э.</i>	163
Вариации квазистатического электрического поля, метеорологических величин и их спектров мощности в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г.	
<i>Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Смирнов С.Э.</i>	167
Эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферных волн в динамо-области ионосферы.	
<i>Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Смирнов С.Э.</i>	171
Эффекты солнечной и геомагнитной активностей в вариациях электрических, метеорологических величин и их спектров мощности в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г.	
<i>Молотков И.А.</i>	175
Анализ магнитного пересоединения и процессов слияния и сжатия магнитных островов в солнечном ветре.	
<i>Муртазов А.К.</i>	178
Процессы в околоземном пространстве и геоэкология.	
<i>Ожогина О.А.</i>	182
Наблюдение необычного светового образования в тени пятна NOAA 12109.	
<i>Петров В.Г.</i>	186
Индексы геомагнитной активности и их роль в исследовании солнечно-земных связей.	
<i>Подгорный А.И., Подгорный И.М.</i>	190
Генерация токового слоя в короне, аккумулирующего энергию для вспышки.	
<i>Подгорный И.М., Подгорный А.И.</i>	194
Протонная солнечная вспышка над активной областью AO12673 на обратной стороне Солнца.	
<i>Подгорный И.М., Подгорный А.И.</i>	198
Возбуждение и затухание спектральных линий многозарядных ионов и динамика температуры короны.	
<i>Рагульская М.В.</i>	202
Солнце и биосфера: 4 млрд лет сосуществования.	

<i>Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Докукин В.С., Канониди К.Х.</i>	206
Суббуревая активность в процессе геофизических экспериментов СУРА – МКС.	
<i>Ружин Ю.Я., Новиков В.А.</i>	210
Реакция глобальной сейсмичности на солнечные вспышки сентября 2017 г.	
<i>Сергеенко Н.П.</i>	214
Эффекты электрических полей в ионосфере в условиях гелиогеофизических возмущений по экспериментальным данным.	
<i>Сидорова Л.Н., Филиппов С.В.</i>	218
Влияние термосферных ветров на процессы генерации экваториальных плазменных «пузырей».	
<i>Симаков М.Б.</i>	222
Ледяные спутники планет-гигантов и экзопланеты: возможности для жизни.	
<i>Снытников В.Н.</i>	226
Астрокатализ. Формирование протопланетных дисков и планетных систем У Солнца и солнцеподобных звезд.	
<i>Solov'ev A.A., Kirichek E.A.</i>	230
Flare energy release in magnetic flux rope compressed by the convergent sunspots.	
<i>Сорокин В.М., Яценко А.К.</i>	234
Механизм генерации короткопериодных геомагнитных пульсаций рентгеновским излучением солнечных вспышек.	
<i>Сорокин В.М., Яценко А.К.</i>	238
Длиннопериодные колебания геомагнитного поля, сопровождающие импульсы ионизирующего излучения солнечных вспышек.	
<i>Текуцкая Е.В.</i>	242
ДНК и другие биополимеры под влиянием физических факторов.	
<i>Филиппов Б.П.</i>	246
Пересоединение корональных петель в нулевой точке над лимбом Солнца.	
<i>Фомичев В.В.</i>	250
Оценки магнитного поля в солнечной короне по радиоданным.	
<i>Харитонов А.Л.</i>	254
Некоторые результаты анализа солнечно-земных связей для изучения неравномерностей дифференциального вращения Земли.	
<i>Харитонов А.Л.</i>	258
Анализ динамических изменений некоторых физических параметров в Галактике и их связь с накоплением углеводородов на Земле.	
<i>Хегай В.В.</i>	262
О корреляции между сильными землетрясениями и уровнем солнечной активности в 21, 22 и 23 циклах.	
<i>Чернов Г.П., Фомичев В.В.</i>	266
Альтернативные модели зебра-структуры в солнечном радиоизлучении.	
<i>Черток И.М.</i>	270
Анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам.	
<i>Язев С.А.</i>	274
О природе комплексов активности на Солнце.	
<i>Якушин Л.М.</i>	278
Атмосфера Земли как форма проявления космо-земных связей.	

УНИКАЛЬНАЯ БАЗА ДАННЫХ ТРАНЗИЕНТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ И МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А., Белов¹ А.В., Гайдаш¹ С.П.,
Ерошенко¹ Е.А., Прямушкина³ И.И., Трефилова¹ Л.А.

¹ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

²КалмГУ, Элиста, Россия

³ГАПОУ БНК, Бугуруслан, Россия

abunin@izmiran.ru

A UNIQUE DATABASE OF TRANSIENT PHENOMENA IN COSMIC RAYS AND THE INTERPLANETARY ENVIRONMENT

Abunin^{1,2} A.A., Abunina¹ M.A., Belov¹ A.V., Gaidash¹ S.P., Eroshenko¹ E.A.,
Pryamushkina³ I.I., Trefilova¹ L.A.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²Kalmyk State University, Elista, Russia

³GAPOY BNK, Buguruslan, Russia

For a comprehensive study of Forbush effects and their relationship to solar, interplanetary and geomagnetic disturbances, IZMIRAN researchers created (and continuously replenishes) a unique database of transient phenomena in cosmic rays and the interplanetary environment. In it, variations in the density and anisotropy of cosmic rays are combined with solar, interplanetary and geomagnetic parameters. The database includes a large number of different characteristics for about 7500 Forbush effects, covering more than half a century of observations (1957-2017). In the work presented, some of the features of this tool are demonstrated.

Одной из актуальных фундаментальных и прикладных задач солнечно-земной физики является заблаговременное прогнозирование параметров космической погоды (КП) и оценка ее влияния на различные природные, технологические и биологические системы, находящиеся как на Земле или в околоземном пространстве, так и в любой точке солнечной системы [1]. Само состояние КП определяется, прежде всего, солнечной активностью. Именно Солнце отвечает за создание рекуррентных и спорадических возмущений межпланетной среды. Воздействию от таких возмущений наиболее подвержены объекты, находящиеся в околоземном космическом пространстве – там, где практически отсутствует (или отсутствует вовсе) атмосфера и ослаблено геомагнитное поле. Во время таких возмущений на космических объектах может наблюдаться ряд проблем, например, выход из строя радиоэлектронной аппаратуры КА из-за накопления поверхностного и объемного заряда; одиночные сбои в радиоэлектронике КА из-за поражения высокоэнергичными частицами солнечного и галактического происхождения [2]; нарушения в работе оптических, магнитных и других датчиков, вызывающие отказ в выполнении заданных функций; ухудшение и потеря связи (на любых частотах); существенное увеличение погрешности систем GPS и ГЛОНАСС; изменение баллистических характеристик орбит из-за нагрева

верхней атмосферы и повышения ее плотности и, как следствие, потеря высоты и нарушение ориентации, непредсказуемое сближение и возможность столкновения с другими КО и элементами космического мусора, возможность несанкционированного неуправляемого схода с орбиты; радиационное воздействие на космонавтов и т.д.

Более того, помимо космического сегмента, КП влияет и на объекты земного базирования, например, такие как ухудшение и потеря связи между наземными пунктами и управляемыми аппаратами космического комплекса [3]; поражение объектов наземной инфраструктуры при падении на Землю элементов космического мусора; появление наведенных токов в протяженных проводниках способных стать причиной аварий в электросетях, подводных кабелях, трубопроводах и в системах автоматики железных дорог [4]; радиационное воздействие на экипажи и пассажиров авиарейсов; сбои в системах связи и аппаратуры авионики и т.д.

Следует особо подчеркнуть, что тенденции усиления зависимости жизнедеятельности человека от современных космических технологий, а также миниатюризация компьютерной техники ведут только к росту рисков от воздействия космической погоды. Таким образом, очевидно, что влияние КП на нашу повседневную жизнь нельзя недооценивать. Это воздействие необходимо уметь качественно прогнозировать, а затем учитывать, используя ранее полученный опыт.

По большому счету, прогнозирование состояния КП сводится к прогнозированию солнечной и геомагнитной активности, а также потоков различных частиц (галактических и солнечных космических лучей (КЛ), релятивистских электронов и т.д.). Модель прогнозирования того или иного параметра можно построить используя разные подходы. Например, можно получить результат теоретически, путем решения сложных систем уравнений, описывающих солнечную активность, перенос и трансформацию соответствующего возмущения в межпланетном пространстве. Но такой путь является очень трудным и, зачастую, из-за сложности общей картины взаимодействий невыполнимым даже в самых простых случаях.

Другим, более простым путем является получение взаимосвязей между различными параметрами, характеризующими космическую погоду на основе статистического, сравнительного или регрессионного анализа. Примеры как раз таких исследований, на основе анализа большого количества событий, будут рассматриваться далее.

Для всестороннего изучения солнечных, межпланетных и геомагнитных возмущений сотрудниками ИЗМИРАН была создана и непрерывно пополняется уникальная база данных транзиентных явлений в КЛ и межпланетной среде (*FEID*) [5-8]. В ней вариации плотности и анизотропии ГКЛ объединены с солнечными, межпланетными и геомагнитными параметрами. Именно ГКЛ взяты за основу данного инструмента. Потоки этих ультраэнергичных частиц, принизывая межпланетное пространство, модулируются, интегрируя информацию о магнитных неоднородностях и местах, через которых проле-

тают. В базе данных КЛ представлены результатами глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов для жесткости 10 ГВ. Информация по солнечному ветру взята из базы данных *OMNI*, а данные по геомагнитной активности из *WDC Kyoto* и *GFZ Potsdam*.

На текущий момент *FEID* включает в себя около 7500 событий, охватывающих более чем полувековой период наблюдений (1957-2017 гг.), каждое из которых описывается более сотней параметров. Можно с уверенностью сказать, что это самая большая и полная база данных межпланетных возмущений в мире. На основе этой базы данных был разработан и выложен в сеть Интернет каталог с аналогичной информацией (<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>).

FEID не только содержит в себе информацию о межпланетных возмущениях, но и является удобным инструментом для ее обработки, позволяя выполнять различного рода анализ этих данных (статистический, сравнительный, регрессионный и т.д.). В научной среде можно найти множество публикаций и диссертаций, которые опираются на информацию о межпланетных возмущениях, взятую именно из этой базы данных. Далее приведены несколько примеров использования *FEID*.

В работе [8] анализировались события с внезапным и постепенным началами (всего 3455 событий). В ходе анализа было выявлено, что группа событий с внезапным началом отличается от группы с постепенным началом не только количественно, но и качественно. Полученные результаты говорят в пользу того, что в выделенных группах преобладают разные механизмы модуляции космических лучей. А точнее, события в первой группе в большей мере обусловлены выбросами солнечного вещества, в то время как значительная часть событий второй группы – высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр.

В работе [9] изучалась связь параметров возмущений с гелиодолготой солнечного источника. Было проанализировано 334 события из базы данных *FEID*, уверенно отождествленных с соответствующим солнечным источником. Все события были поделены на пять секторов. В ходе анализа было показано, что эффективность создания ФЭ и ГМБ у источников с различной гелиодолготой различна. Кроме того, было установлено, что, в зависимости от гелиодолготы источника возмущения межпланетной среды, поведение анизотропии ГКЛ существенно отличается. Таким образом, имея информацию только о КЛ и умея её правильно интерпретировать, можно судить о состоянии межпланетной среды.

Анализ большого количества событий, позволяет получать статистические зависимости между различными параметрами, характеризующими состояние космической погоды. Это, в свою очередь, позволяет с определенной долей вероятности оценивать влияние космической погоды на объекты космического и наземного базирования. Созданная сотрудниками ИЗМИРАН база данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде не является единственной разработкой данной группы уче-

ных. Существует еще ряд баз данных, которые охватывают большой временной интервал и содержат множество параметров: геомагнитных возмущений (1868-2018 гг.), солнечной активности (1975-2018 гг.), вариаций космических лучей (1957-2018 гг.), корональных выбросов масс (1996-2018 гг.), корональных дыр и т.д.

Используя представленные базы данных, получены статистические закономерности, которые входят в основу разработанных моделей для реализации краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов по каждому из направлений космической погоды. Непрерывное пополнение свежей информацией и своевременный перерасчет зависимостей между параметрами позволяют всегда держать базы и модели в актуальном состоянии. А сам результат такого анализа используется в ежедневной работе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН для обеспечения своих потребителей необходимой информацией уже 20 лет, начиная с 1998 года.

***Благодарности.** Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ №17-02-00508 и РНФ №15-12-20001. Мы также признательны всем сотрудникам сети станций КЛ <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>*

Литература

1. Gaidash S.P., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. Space Weather Forecasting at IZMIRAN // G&A. V.57. №7. P. 869-876. 2017.
2. Белов А. В., Вилорези Дж. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // ГиА. Т.44. №4. С. 502-510. 2004.
3. Зеленый Л. М., А. А. Петрукович. Арктика. Космическая погода // Природа. №9. С.31-39. 2015.
4. Eroshenko E., Belov A., Boteler D. et al. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // Adv. Sp. Res. V.46. №9. P. 1102-1110. 2010.
5. Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Modulation Effects in 1991-1992 Years // Proc. 25th ICRC. V.1. P. 437-440. 1997.
6. Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Global and local indices of cosmic ray activity // Proc. 26th ICRC. V. 6. P. 472-475. 1999.
7. Абунин А.А. Характеристики Форбуш-эффектов и их связь с солнечными, межпланетными и геомагнитными возмущениями: диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н.: 01.03.03 / Абунин Артем Анатольевич. Москва. 155 с. 2014.
8. Belov A., Abunin A., Eroshenko E. et al. Database on the Forbush-effects and interplanetary disturbances to study Earth-affecting solar transients // VarSITI. V.14. P. 8-10. 2017.
9. Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // ГиА. Т.52. №3. С. 313-320. 2012.
10. Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В. и др. Связь параметров форбуш-эффектов с гелиодолготой солнечных источников // ГиА. Т.53. №1. С. 13-22. 2013.

ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ НА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ НА ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТАХ

Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А., Белов¹ А.В., Гайдаш¹ С.П., Крякунова³
О.Н., Николаевский³ Н.Ф., Прямушкина⁴ И.И., Трефилова¹ Л.А.

¹ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

²КалмГУ, Элиста, Россия

³Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

⁴ГАПОУ БНК, Бугуруслан, Россия

abunin@izmiran.ru

IMPACT OF INTERPLANETARY ENVIRONMENT DISTURBANCES ON HIGH-ENERGY ELECTRONS AT GEOSTATIONARY ORBITS

Abunin^{1,2} A.A., Abunina¹ M.A., Belov¹ A.V., Gaidash¹ S.P., Kryakunova³ O.N.,
Nikolayevskiy³ N.F., Pryamushkina⁴ I.I., Trefilova¹ L.A.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²Kalmyk State University, Elista, Russia

³Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

⁴GAPOY BNK, Buguruslan, Russia

We study the behavior of high-energy magnetospheric electrons ($E > 2$ MeV) during various types of interplanetary disturbances. More than thirty years of observations of such electrons are analyzed (1986-2017). It is shown that coronal mass ejections and high speed streams from coronal holes have different impact on the behavior of high-energy magnetospheric electrons. In creating electronic increases, high-speed streams from coronal holes are more effective than coronal mass ejections.

Одной из наиболее актуальных задач солнечно-земной физики является заблаговременное прогнозирование поведения потока высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ в околоземном пространстве [1,2]. Прежде всего, это связано с тем, что эти релятивистские частицы могут вызывать сбои в работе космических аппаратов вплоть до их полной потери [3-5,9]. Особенно это касается аппаратов, которые расположены на геостационарных орбитах. Тем не менее, несмотря на множество проведенных исследований в этой области, на данный момент нет четкого понимания, каким образом происходит генерация этих частиц в околоземном пространстве во время межпланетных возмущений (см., например, [10]), но на практике определены условные пороги, при превышении которых начинают наблюдаться неполадки в работе космических аппаратов. Большинство таких неполадок наблюдается, когда суточный флюенс релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ превышает значение 10^9 частиц·см⁻²·ср⁻¹·сут⁻¹. Но не все межпланетные возмущения сопровождаются сильным возрастанием потока этих высокоэнергичных частиц. В данной работе представлен сравни-

тельный анализ того, как различные типы возмущений влияют на поведение потока электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах.

Существует два основных типа возмущений межпланетной среды: спорадические и рекуррентные. К первому относятся корональные выбросы солнечной плазмы, которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные возмущения ICMEs; ко второму – вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр [6,7]. В данном исследовании информация о межпланетных возмущениях бралась из сетевой открытой базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html> [8]. Представленная база данных охватывает более чем полувековой период (1957-2017 гг.) и содержит около 7500 событий. Следует подчеркнуть, что отбирались только изолированные и однозначно отождествленные со своим солнечным источником события. Одним из условий отбора являлось то, что за 72 часа до и после события не должно было быть зарегистрировано других значительных возмущений. Таким образом, было выделено 247 событий, которые были поделены на три группы: *АО* – возмущения от выбросов из активных областей (24 события); *КД* – возмущения, связанные с корональными дырами (174 события); *ВВ* – возмущения от волоконных выбросов вне активных областей (49 событий). Информация о потоке релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах была взята со спутников серии *GOES* (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/xray/>), а о солнечном ветре – из базы данных *OMNI* (<ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/>).

На рис. 1 представлены усредненные значения суточного флюенса электронов для выделенных групп. Нулевым днем обозначается день прихода возмущения к Земле (момент прихода ударной волны, момент внезапного начала геомагнитной бури и т.д.). Из рисунка видно, что возмущения, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (○), сопровождаются более высокими значениями потока электронов (группа *КД*). В момент прихода возмущения (нулевой и первый день) наблюдается резкий спад, затем резкое возрастание и далее, в течение нескольких дней, медленная релаксация к нормальным значениям потока электронов. В случае событий группы *АО* наблюдается также резкий спад в момент прихода возмущения, но далее наблюдается плавное возрастание потока частиц. Волоконные же события (группа *ВВ*) слабо влияют на поток электронов. Из рисунка также видно, что максимальные значения суточного флюенса электронов в возмущении во всех трех группах существенно различаются. Высокие значения флюенса рассматриваемых высокоэнергичных частиц типичны для возмущений, вызванных влиянием от корональных дыр и не типичны для возмущений от волоконных выбросов.

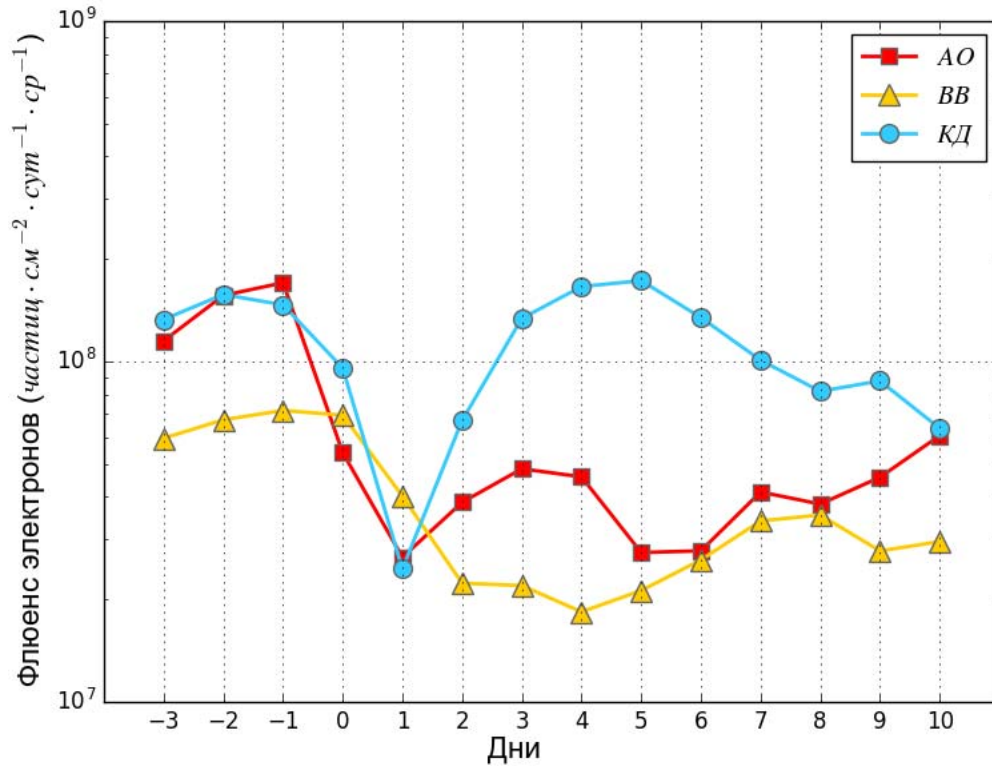


Рис. 1. Усредненные значения суточного флюенса электронов для событий из группы *АО* (□), *ВВ* (Δ) и *КД* (○). Нулевой день соответствует приходу возмущения к Земле.

Более того, если выделить только те возмущения, в которых суточный флюенс электронов превышал значение 10^9 частиц·см⁻²·ср⁻¹·сут⁻¹, то окажется, что из 18 событий по одному событию будут принадлежать группам *АО* и *ВВ*, а остальные группе *КД* (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Количество событий в выделенных группах с максимальным значением суточного флюенса электронов в событии более $>10^7$, $>10^8$, $>10^9$ частиц/см⁻²·ср⁻¹·сут⁻¹

	Максимальное значение суточного флюенса электронов в событии (частиц·см ⁻² ·ср ⁻¹ ·сут ⁻¹)		
	$>10^7$	$>10^8$	$>10^9$
Группа <i>АО</i>	22	9	1
Группа <i>КД</i>	151	110	16
Группа <i>ВВ</i>	35	17	1

Кроме того, если анализировать поведение электронов в каждом событии отдельно, то будет отчетливо видно следующее. При возмущениях от корональных выбросов плазмы будет наблюдаться сначала уменьшение потока релятивистских частиц, а затем восстановление до нормального уровня. В то время как во время возмущений от высокоскоростных потоков из корональных дыр будет наблюдаться сначала резкий спад потока электронов, а далее резкое возрастание потока электронов до высоких уровней (более 10^4

частиц·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹). Затем регистрируется медленный спад величины потока электронов.

Таким образом, на основе представленного выше анализа можно сделать вывод, что возмущения межпланетной среды, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр, более эффективны в создании больших значений потока высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах, чем возмущения от выбросов из активных областей и вне их. Это позволяет строить достаточно надежные модели для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования поведения электронов, используя в её основе информацию о рекуррентных источниках возмущения межпланетной среды. Подобная методика была разработана сотрудниками ИЗМИРАН, успешно апробирована и внедрена в работу Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН.

***Благодарности.** Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ №17-02-00508 и РФФ №15-12-20001. Мы также признательны всему коллективу, обеспечивающему работоспособность космических аппаратов серии GOES и всем сотрудникам сети станций космических лучей <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>*

Литература

1. Белов А.В., Крякунова О.Н., Абуни А.А. и др. Особенности поведения высокоэнергичных магнитосферных электронов в 1987-2007 гг. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 81. №2. С. 244-247. 2017.
2. Gaidash S.P., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. Space Weather Forecasting at IZMIRAN // G&A. V. 57. №7. P. 869-876. 2017.
3. Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging // Ann. Geophys. V. 20. I. 7. P. 953-956. 2002.
4. Wrenn G.L. Chronology of «killer» electrons: Solar cycles 22 and 23 // J. Atm. Sol.-Ter. Phys. V. 71. I. 10-11. P. 1210-1218. 2009.
5. Белов А.В., Вилорези Дж., Дорман Л.И. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // ГиА. Т. 44. № 4. С. 502-510. 2004.
6. Абуни А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // ГиА. Т. 52. №3. С. 313-320. 2012.
7. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А. и др. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 65. №3. С. 373-376. 2001.
8. Belov A., Abunin A., Eroshenko E. et al. Database on the Forbush-effects and interplanetary disturbances to study Earth-affecting solar transients // VarSITI. V.14. P. 8-10. 2017.
9. Webb D.F., Allen J.H. Spacecraft and ground anomalies related to the October–November 2003 solar activity // Space Weather. V.2. №S03008. 2004.
10. Thorne R.M. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions // Geophys. Res. Lett. V.37. L22107. 2010.

АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ОТ МОЩНЫХ ЭРУПТИВНЫХ ВСПЫШЕК СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Абунин^{1,2} А.А., Белов¹ А.В., Черток¹ И.М.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²КалмГУ, Элиста, Россия

abunin@izmiran.ru

ANALYSIS OF SPACE WEATHER DISTURBANCES FROM POWERFUL SOLAR EUPTIVE FLARES OF SEPTEMBER 2017

Abunin^{1,2} A.A., Belov¹ A.V., Chertok¹ I.M.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²Kalmyk State University, Elista, Russia

The magnetic flux of EUV arcades and dimmings associated with two solar eruptive flares of early September 2017 are determined. The estimated scale of space weather disturbances, caused by them, turned out to be close to observed Forbush decreases and geomagnetic storms. General circumstances of the solar eruptions and peculiarities of the geospace disturbances are discussed.

Мощный всплеск солнечной вспышечной активности, произошедший в начале сентября 2017 г. при приближении к минимуму 24-ого цикла, сопровождался значительными возмущениями космической погоды (КП). В статьях [1-3] проанализированы возрастания потока протонов у Земли, включая ground level enhancement (GLE72) от западной прилиम्бовой вспышки 10 сент. с рентгеновским баллом X8.2. В настоящей работе рассматривается другой тип возмущений КП – геомагнитные бури (ГМБ) и Форбуш-понижения (ФП). Как показал анализ, геоэффективными в этом смысле оказались две вспышки 2017-09-04T20:33 (балл M5.5) и 2017-09-06T12:02 (балл X9.3), которые сопровождались высокоскоростными корональными выбросами (Coronal Mass Ejections, CMEs) типа гало. Эти вспышки и вызванные ими ГМБ и ФП изучаются на основе методики ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций (РДГСЭ), предложенной в [4-6]. Методика предусматривает выделение на УФ гелиограммах структур, вовлеченных в процесс эрупции, т.е. темных диммингов (транзиентных понижений яркости) и светящихся постэруптивных аркад, определение их суммарного магнитного потока (Φ) на уровне фотосферы и самую раннюю оценку по нему ожидаемой интенсивности и временных параметров ГМБ и ФП. Эруптивные структуры выделяются в момент, близкий ко времени максимума вспышки в мягком рентгене по критериям, основанным на относительных вариациях яркости. В данном случае выделение аркад и диммингов и определение их магнитного потока производилось по фиксированным разностным изображениям УФ телескопа AIA в канале 193 Å и данным магнитографа HMI, установленных на борту обсерватории SDO. При оценках ожидае-

мых параметров ГМБ и ФП применялись эмпирические соотношения, учитывающие разработанный в [6] переход от первоначально использовавшихся данных обсерватории SOHO к получаемым в настоящее время данным SDO.

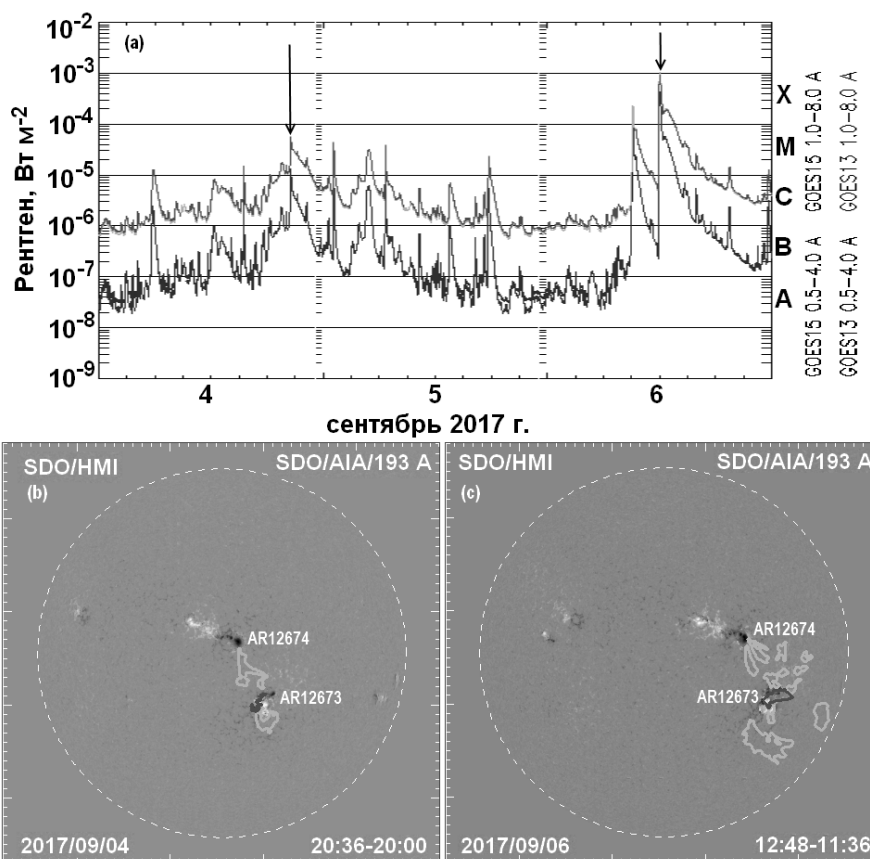


Рис. 1. (a) Временные профили мягкого рентгена по данным GOES. (b, c) Магнитограммы с выделенными УФ диммингами (светлый контур) и аркадами (темный контур) от эруптивных вспышек 4-ого (левый ряд) и 6-ого (правый ряд) сент. 2017 г. из AR12673.

На Рис. 1 стрелками указаны анализируемые эруптивные вспышки и соответствующие магнитограммы с выделенными площадками аркад и диммингов. Видно, что в обоих событиях аркаде соответствуют компактные структуры, локализованные над активной областью AR12673, а диммингам – протяженные образования, в том числе трансэкваториальные петли, простирающиеся к AR12674.

Для вспышки 4 сент. измеренный эруптивный магнитный поток составил $\Phi \approx 53.5$ mfu (здесь и далее магнитный поток выражен в единицах $1 \text{ mfu} = 10^{20}$ Мкс). При этом оценки указывают на возможность слабой/умеренной ГМБ с индексами $Dst \approx -87$ нТл и $Ap \approx 60$ (в единицах 2 нТл). Представленные на Рис. 2 наблюдательные данные свидетельствуют,

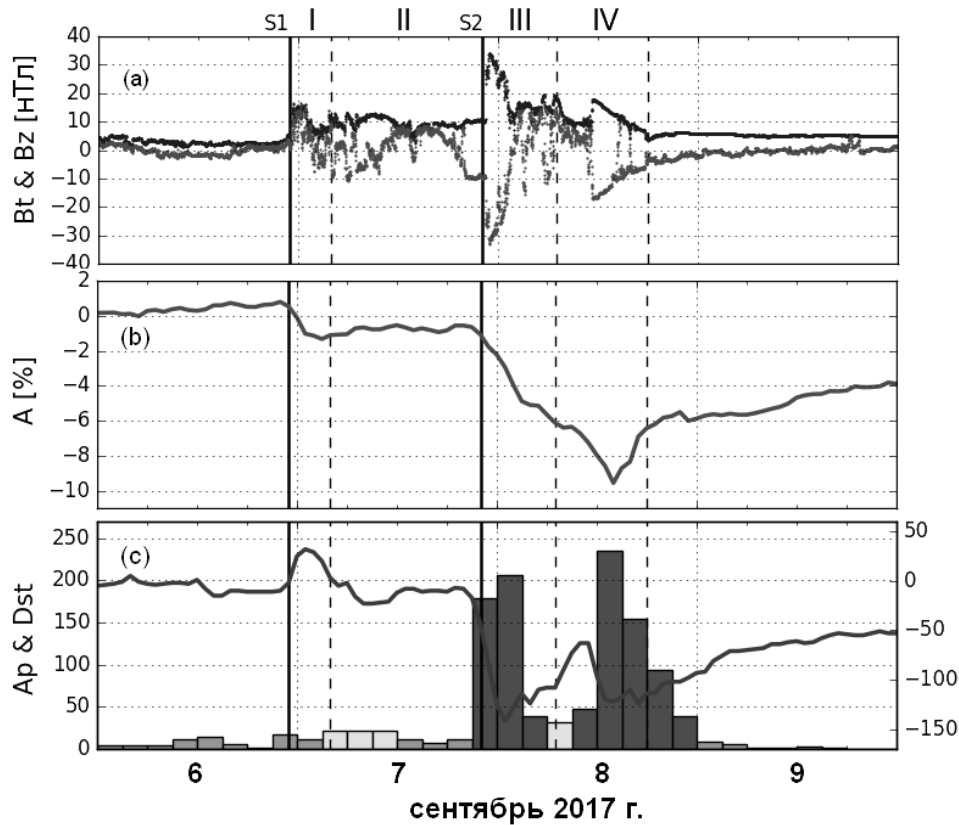


Рис. 2. (a) *In situ* DSCOVR данные о величине (B_t) и B_z -компоненте магнитного поля у Земли; амплитуда Форбуш-понижений (b) и геомагнитных индексов Dst и A_p (c), вызванных эрупциями 4 и 6 сент. 2017 г. Сплошные вертикальные линии соответствуют приходу к Земле ударных волн, связанных с первым и вторым ICMEs.

что межпланетный ICME от данной эрупции привёл утром 7 сент. только к механическому сжатию магнитосферы (положительному выбросу Dst) и последующим незначительному понижению Dst до -23 нТл и небольшому повышению $A_p \approx 18$. Очевидно, что причина отсутствия заметной ГМБ обусловлена тем, что B_z -компонента в этом первом ICME была положительной (северной). Поскольку в методике РДГСЭ ожидаемая интенсивность ГМБ оценивается при условии отрицательной (южной) B_z -компоненты, можно констатировать, что в данном случае возможный масштаб ГМБ оценён достаточно корректно. Об этом свидетельствует то, что расчётная амплитуда ФП, которая не зависит от знака B_z , оказалась близка к наблюдаемой и составила $A \approx 2\%$.

Вторая эрупция, произошедшая 6 сент., была более мощной и характеризовалась магнитным потоком $\Phi \approx 111$ mfu. Она вызвала более сильные комбинированные возмущения (ФП с $A \approx 9.3\%$ и ГМБ с $Dst \approx -144$ нТл, $A_p \approx 235$), чем ожидалось ($A \approx 4.4\%$, $Dst \approx -135$ нТл, $A_p \approx 125$). Решающую роль в этом сыграл тот факт, что ударная волна S2 перед вторым ICME от вспышки 6 сент. при приближении к Земле в конце суток 7 сент. догнала хвостовую часть первого ICME от вспышки 4 сент., провзаимодействовала с ней, а также с высокоскоростным коротирующим потоком солнечного ветра (CIR) и

гелиосферным токовым слоем, в результате чего сформировалась структура III с усиленным магнитным полем и к тому же отрицательной компонентой $B_z \approx -24$ нТл. Другая область IV со значительной отрицательной компонентой $B_z \approx -18$ нТл имела место в основном теле второго ICME, который пришел к Земле без каких-либо взаимодействий и сохранил признаки магнитного облака.

Что касается временных параметров возмущений КП, то в обоих событиях ГМБ и ФП начались и достигли пиков существенно быстрее, чем ожидалось. Транзитные времена и первого, и второго ICMEs оказались на 11-15 часов меньше расчётных. Это явилось следствием другой важной особенности анализируемых эрупций: и в короне, и в солнечном ветре оба CMEs/ICMEs распространялись в высокоскоростном потоке, исходящем из расположенной несколько восточнее AR12673 протяжённой корональной дыры SH823, и поэтому не испытывали сильного торможения.

Итак, оценки по магнитному потоку аркад и диммингов позволили в целом достаточно верно определить масштаб возмущений КП в событиях начала сент. 2017 г. Это является ещё одним свидетельством того, что методика РДГСЭ может быть успешно использована на практике, в том числе, в комбинации с другими уточняющими методами прогнозирования ожидаемых параметров ГМБ и ФП.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 17-02-00308, 17-02-00508) и РНФ (грант 15-12-20001).

Литература

1. Chertok I.M. Powerful solar flares of 2017 September: correspondence between parameters of microwave bursts and proton fluxes near Earth // Research Notes of the AAS. V. 2. Id. 20. 2018.
2. Kurt V., Belov A., Kudela K., Yushkov B. Some characteristics of GLE on 2017 September 10 // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. V. 48. P. 329-338. 2018.
3. Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // Геомагн. и аэронавигация. Т. 58. № 4. 2018.
4. Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions – sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // Solar Phys. V. 282. P. 175-199. 2013.
5. Chertok I.M., Abunina M.A., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V. Relationship between the magnetic flux of solar eruptions and the Ap index of geomagnetic storms // Solar Phys. V. 290. P. 627-633. 2015.
6. Chertok I.M., Grechnev V.V., Abunin A.A. An early diagnostics of the geoeffectiveness of solar eruptions from photospheric magnetic flux observations: the transition from SOHO to SDO // Solar Phys. V. 292. Id. 62. 2017.

РЕЗОНАНСНОЕ УНЧ ПОГЛОЩЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Бадин В.И.

ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия

badin@izmiran.ru

RESONANT ULF ABSORPTION FOR DIFFERENT DIRECTIONS OF THE INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD

Badin V.I.

IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia

Minimum frequencies of the resonant ultra-low-frequency (ULF) absorption are determined by Doppler radar data over a long period of low geomagnetic activity. These frequencies are shown to be slightly higher for IMF $B_z < 0$, than for $B_z > 0$, but these frequencies can be significantly lower for IMF $B_y < 0$, than for $B_y > 0$. It is possible that minimum frequencies of the resonant ULF absorption are of a prognostic value for strong magnetic storms.

Наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний высокоширотных электрических полей посредством доплеровских измерений скорости дрейфа ионосферной плазмы радаром когерентного рассеяния позволили обнаружить эффект резонансного поглощения УНЧ волн магнитосферным МГД резонатором [1]. Поглощение энергии фоновых УНЧ колебаний происходит за счет возбуждения собственных колебаний магнитных силовых линий, т.е. резонансных стоячих альфвеновских волн. Обработка измерений включает усреднение данных вдоль каждого луча радара, вычисление быстрого преобразования Фурье усредненных данных и последующий вариационный анализ спектральной мощности сигнала. Анализ позволяет не только обнаружить эффект резонансного ультранизкочастотного поглощения (РУНЧП) на качественном уровне точности, но и провести количественную оценку минимальной частоты резонансного поглощения, которая представляет собой нижнюю частотную границу резонансного континуума магнитных силовых линий.

В данной работе использованы доплеровские измерения норвежского радара когерентного рассеяния STARE [2]. Обработка доплеровских данных проекта STARE обнаружила как вполне типичные (около 5 мГц), так и сравнительно низкие (ниже 3 мГц) значения минимальной частоты РУНЧП. Частота 5 мГц хорошо согласуется с орбитальными [3] и наземными [4] магнитометрическими оценками нижней частотной границы резонансного континуума магнитных силовых линий. Частоты ниже 3 мГц, возможно, не заслуживают наименования «аномальные», но все же требуют специального исследования, нацеленного на выяснение физического механизма, который обеспечивает значительное понижение резонансной частоты.

Собственные частоты магнитогидродинамического (МГД) резонатора зависят в первую очередь от напряженности магнитного поля и длины магнитных силовых линий, но зависят также от плотности плазмы в магнитосфере, которая изучена недостаточно. Наиболее низкие собственные частоты, скорее всего, соответствуют наиболее длинным магнитным силовым линиям, примыкающим к магнитопаузе. Эту область магнитосферы называют плазменной мантией; она соседствует с магнитослоем, т.е. с потоком горячего солнечного ветра, термализованного после прохождения ударной волны. Собственные частоты магнитных силовых линий в плазменной мантии могут в значительной мере контролироваться параметрами солнечного ветра в магнитослое. В частности, при стабильных параметрах солнечного ветра можно ожидать, что минимальная частота РУНЧП будет оставаться практически неизменной.

Таблица. Параметры солнечного ветра и магнитной активности, и минимальная частота РУНЧП.

Дата	B_x	B_y	B_z	P_{sw} , нПа min/max	K_p	Dst , нТл min/max	AE , нТл min/max	F_{min} , мГц
22.11.03	> 0	> 0*	< 0	2.21/3.27	5-	-72/-43	354/1296	3.4±0.7
28.11.03	> 0	< 0	> 0	0.70/1.08	2-	-11/-6	62/221	2.7±0.7
05.12.03	> 0*	< 0*	< 0	4.55/5.38	5-	-45/-35	583/1286	3.8±0.6
11.12.03	< 0	> 0	> 0	2.03/2.21	4+	-22/-20	255/764	3.4±1.0
21.12.03	> 0	< 0	< 0*	3.28/3.86	4	-25/-6	239/535	3.9±0.1
31.12.03	< 0	> 0	< 0	2.95/4.66	5-	-13/-6	230/978	3.8±1.5
01.01.04	< 0	> 0	> 0*	3.11/3.63	4-	-32/-26	116/548	3.0±0.3
06.01.04	< 0	> 0*	< 0*	1.29/1.81	2	-17/-14	118/299	5.6±1.6
09.01.04	< 0	> 0	< 0*	2.73/7.32	4+	-28/-18	463/1058	3.4±0.3
14.01.04	> 0	< 0	< 0	1.22/1.38	2+	-24/-15	272/444	4.2±0.5
19.01.04	> 0	< 0	< 0	2.45/3.10	4+	-35/-16	398/1017	3.1±0.1
21.01.04	> 0	< 0	< 0	2.06/2.21	2+	-25/-17	178/520	2.3±0.6
04.02.04	< 0	> 0	< 0	0.85/0.99	3-	-23/-22	74/604	3.5±0.7

Низким значениям минимальной частоты РУНЧП предшествовал длительный период сравнительно низкой геомагнитной активности между двумя сильными магнитными бурями. Направления межпланетного магнитного

поля (ММП), динамическое давление солнечного ветра, индексы магнитной активности и значения минимальной частоты РУНЧП $Fmin$ для этого периода приведены в таблице. Составляющие ММП даны в GSM координатах. Использованы радарные наблюдения в вечернем секторе местного времени. Приведенные вариации каждого значения $Fmin$ не дают статистически достоверной оценки погрешности, но указывают разброс значений минимальной частоты РУНЧП между восемью лучами радара.

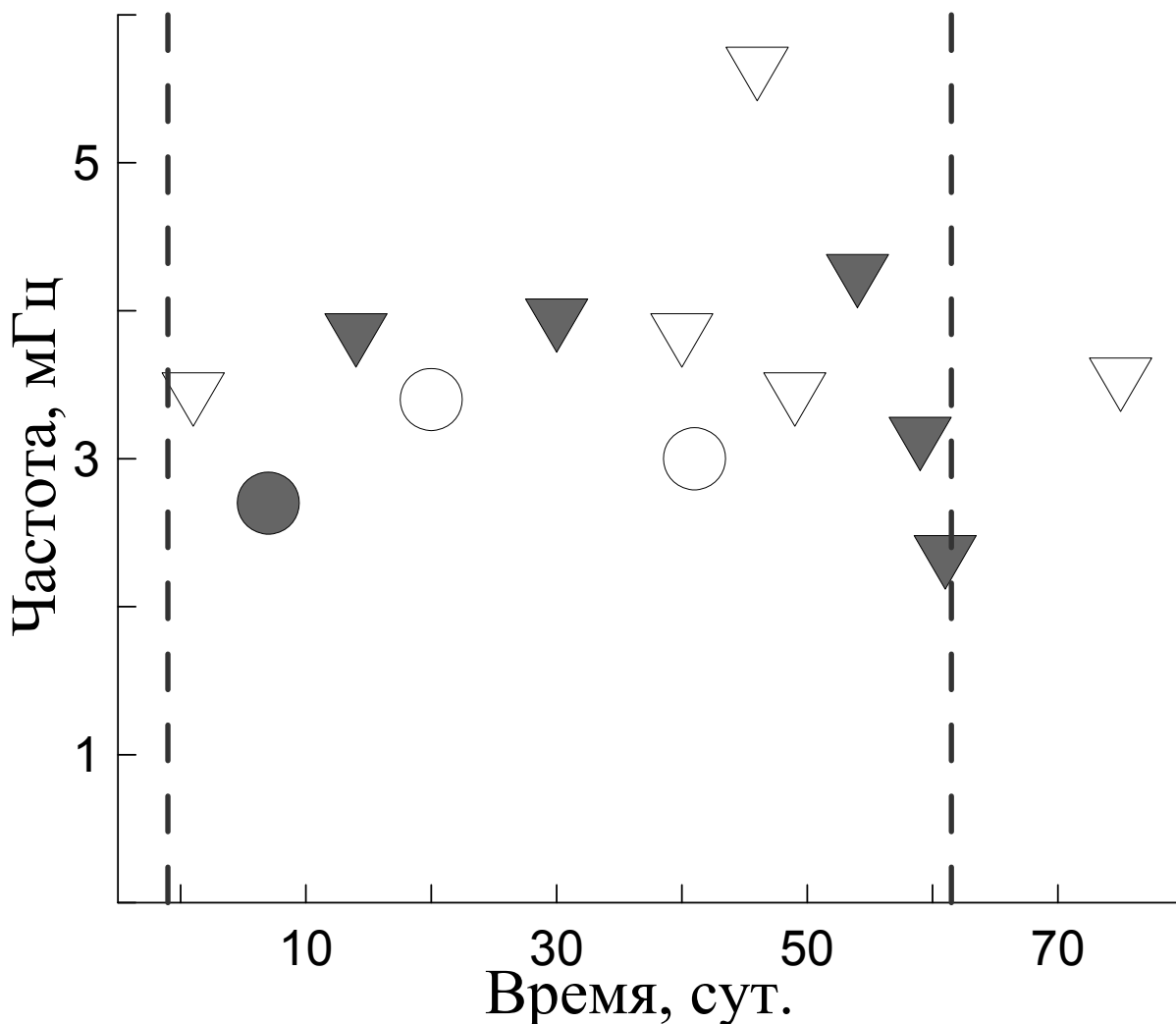


Рис. 1. Минимальная частота РУНЧП как функция времени. Кружки соответствуют положительным значениям Vz ММП, треугольники — отрицательным Vz ; светлые значки соответствуют положительным значениям Vy ММП, темные — отрицательным Vy . Вертикальные штриховые прямые показывают начало сильных магнитных бурь.

Частота $Fmin$ как функция времени для анализируемого двухмесячного периода показана на рис. 1. Значения данной частоты при отрицательных Vz ММП (треугольники) несколько выше, чем при положительных (кружки). Это не противоречит результатам спутниковых наблюдений [5], которые показывают, что при отрицательных Vz магнитопауза приближается к Земле в

полуденном секторе. Глобальная резонансная поверхность минимальной частоты оказывается ближе к Земле, и $Fmin$ повышается.

При отрицательных B_y ММП минимальная частота РУНЧП может значительно понижаться (приблизительно вдвое), и такое понижение (при отрицательных B_z) непосредственно предшествует внезапному началу сильной магнитной бури. Возможное объяснение этого эффекта состоит в захвате энергичных ионов магнитослоя геомагнитным полем. При таком захвате напряженность магнитного поля уменьшается благодаря диамагнетизму плазмы, длина магнитных силовых линий увеличивается за счет дополнительного искривления этих линий, а плотность плазмы возрастает за счет захвата новых частиц. Все три фактора приводят к понижению частоты $Fmin$. Если пренебречь зависимостью от длины силовой линии и от плотности плазмы, то минимальная частота РУНЧП пропорциональна модулю магнитной индукции \mathbf{B} в горячей магнитосферной плазме. Магнитная индукция, в свою очередь, пропорциональна геомагнитному полю \mathbf{H} и магнитной проницаемости плазмы, т.е. $\mathbf{B}=(1-\beta/2)\mathbf{H}$, где β представляет собой отношение поперечного газокинетического давления плазмы к магнитному давлению [6]. Для плазмы, удерживаемой магнитным полем, β не превышает единицы. Следовательно, понижение $Fmin$ приблизительно вдвое — признак того, что горячая плазма уже не удерживается геомагнитным полем, а это, в свою очередь, может быть признаком начала магнитной бури.

Работа частично поддержана проектом РФФИ 17-05-00427.

Литература

1. Бадин В.И. Резонансное УНЧ-поглощение в условиях магнитной бури // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 1. С. 79–87. DOI: 10.12737/21428. 2017.
2. Greenwald R.A., Weiss W., Nielsen E., Thomson N.R. STARE: a new radar auroral backscatter experiment in northern Scandinavia // Radio Sci. V. 13 N. 6. P. 1021–1039. 1978.
3. Anderson B.J., Engebretson M.J., Zanetti L.J. Distortion effects in spacecraft observations of MHD toroidal standing waves: theory and observations // J. Geophys. Res. V. 94. N. A10. P. 13425–13445. 1989.
4. Lanzerotti L.J., Shono A., Fukunishi H., MacLennan C.G. Long-period hydromagnetic waves at very high geomagnetic latitudes // J. Geophys. Res. V. 104. N. A12. P. 28423–28435. 1999.
5. Roelof E.C., Sibeck D.G. Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field B_z and solar wind dynamic pressure // J. Geophys. Res. V. 98. N. A12. P. 21421–21450. 1993.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М. Атомиздат, 283 с. 1964.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМОГЕОФИЗИЧЕСКИХ АГЕНТОВ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Белишева Н.К.

НИЦ МБП КНЦ РАН, г. Апатиты Мурманской обл., Россия
natalybelisheva@mail.ru

PECULIARITIES OF THE IMPACT OF COSMOGEOPHYSICAL AGENTS ON THE HUMAN ORGANISM

Belisheva N.K.

RSHAA KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia

The peculiarities of the effect of cosmogeophysical agents on the human body have been analyzed from the standpoint of the cooperative effect on the biological targets of physical factors of various nature and the laws of irritation of the nerve cell. Accounting for these features can shed light on the mechanisms of the influence of geophysical agents of electromagnetic nature on the human body.

В данном сообщении под космогеофизическими агентами понимаются отдельные составляющие комплексных и взаимообусловленных явлений, ассоциированных с солнечной активностью (СА), проявляющихся в физических событиях, происходящих в межпланетной среде (МПС) и на поверхности Земли, и косвенным или прямым образом, способных воздействовать на функциональное состояние биосистем. К таким агентам можно отнести все компоненты СА, опосредующие солнечно-земные связи (СЗС), а также сопутствующие агенты космического происхождения (например, галактические космические лучи (ГКЛ)).

СА приводит к нарушению динамического равновесия в магнито-плазменных оболочках Земли и к развитию магнитосферно-ионосферных возмущений, следствием которых являются пространственно-временные изменения электродинамических параметров ионосферы. Эти изменения, в свою очередь, порождают широкий спектр вариаций во всем электромагнитном комплексе на Земле. В локальном масштабе, вариации естественных ЭМП могут быть одной из действующих причин, вызывающих изменение функционального состояния организма человека.

Космогеофизические события, сопряженные с СА, проявляются также и в вариациях космических лучей (КЛ), которые существенным образом модулируют свойства атмосферы и определяют фоновые колебания уровня радиации у поверхности Земли [1,2]. Из всей известной совокупности наземных геофизических агентов, ассоциированных с СА, особое внимание многочисленных исследователей СЗС сосредоточено на выявлении эффектов геомагнитной активности (ГМА) [3,4,5,6]. Однако ясное представление о роли вариаций геомагнитного поля (ГМП) в модуляции функционального состояния организма человека, получено в беспрецедентном эксперименте

«Телекоммуникационный гелиомедицинский мониторинг «Гелиомед» 2003-2010 гг.» [6,7,8].

Вместе с тем, предполагаемой высокой биоэффективностью должны обладать и другие агенты: очень низкочастотный шум (ОНЧ), генерируемый потоками частиц в ионосфере; геомагнитные пульсации (ГП), порождаемые взаимодействием СВ с магнитосферой Земли; инфразвук, сопровождающий в высоких широтах значительные геомагнитные возмущения. ГП характеризуются квазипериодической структурой с диапазоном частот от тысячных долей герца до нескольких герц. Верхняя частота ГП определяется гирочастотой протонов в магнитосфере порядка 3-5 Гц на земной поверхности, что соответствует частотному диапазону дельта- и тета-ритмов мозга человека. К дневным пульсациям в высоких широтах относятся также широкополосные иррегулярные пульсации диапазона Pc5 ($f \sim 1.5-5.0$ мГц) с амплитудой порядка 15-60 нТл, *ipcl* [9]. Косвенным свидетельством возможного воздействия пульсаций на мозг человека служат результаты исследований, в которых показано влияние ГМА, в том числе в диапазоне короткопериодных колебаний на мозг человека [10] и его ритмы [11].

Особенностью воздействия космофизических агентов на организм человека является одновременное и последовательное воздействие физических агентов различной природы (например, электромагнитной и корпускулярной компонент геокосмических агентов). При этом совокупном воздействии основные биологические мишени для различных агентов могут существенно различаться, что в целом, может выражаться в аддитивных эффектах совместного воздействия, в результате которых могут суммироваться негативные последствия, вызываемые раздельным влиянием каждого фактора; в синергизме положительном, в результате которого возникает сенсбилизация или потенцирование – повышение чувствительности к совместному токсическому воздействию; в синергизме отрицательном, в результате которого возникает десенсбилизация, или снижение чувствительности (повышение порога чувствительности); в антагонизме, когда при совместном негативном воздействии факторов происходит вычитание эффектов, или частичная протекция от раздельного воздействия; в коалитивном эффекте, в результате которого может возникнуть качественно новый эффект, не возникающий при раздельном воздействии. Отсюда вытекает важная фундаментальная задача, связанная с выяснением механизмов раздельного и комбинированного воздействия космогеофизических агентов.

Некоторую ясность в оценке возможных последствий совокупного воздействия на организм геофизических агентов различной природы могут внести целевые эксперименты. Так, первичные эффекты нейтронной компоненты вторичных КЛ реализуются на физико-химическом уровне, в соответствии с классическими закономерностями воздействия редко- и плотно ионизирующих источников излучения малой интенсивности. Поэтому для доказательства биоэффективности КЛ необходимы эксперименты на молекулярном и клеточном уровнях, специфические изменения в состоянии кото-

рых, могут свидетельствовать об эффектах радиационной природы, исключая иное воздействие [12,13].

Доказательства биоэффективности вариаций ГМП и ЭМП должно опираться на особенности структурно-функциональной организации живых систем, в которых эндогенные ЭМП играют ключевую роль. Известно, что жизнедеятельность любой клетки сопровождается определенными электрическими явлениями, особенно выраженными в мышечной и нервной тканях. В нервной системе электрические реакции являются основным проявлением процесса возбуждения, создаваемого быстрым (в течение 1—3 мс) изменением мембранного потенциала – *потенциала действия* (ПД), которое достигает 90-120 мВ. ПД является необходимым компонентом для распространения возбуждения по нервному волокну. Законы раздражения нервной клетки необходимо учитывать при выявлении реакций отклика биологических систем на воздействие геофизических агентов. Раздражение нервной клетки, вследствие которого возникает ПД, подчиняется законам «всё или ничего», «сила–время» и аккомодации. Закон «всё или ничего» проявляется в том, что при достижении пороговой силы раздражающего стимула дальнейшее увеличение его интенсивности или продолжительности раздражения не изменяет характеристик ПД. Закон «силы–времени» свидетельствует о соотношении силы и длительности действия раздражителя, при котором эффект раздражителя на нервную клетку зависит как от силы раздражителя, так и от времени, в течение которого он действует: чем больше сила тока, тем меньше времени он должен действовать, чтобы возник процесс возбуждения, и наоборот. Закон «аккомодации» проявляется в том, что раздражающее действие тока зависит не только от амплитуды электрического сигнала, но и от скорости его нарастания во времени: чем быстрее это нарастание, тем сильнее выражено раздражающее действие тока. При действии медленно нарастающей силы раздражителя генерации ПД не происходит, так как возбудимая клетка «приспосабливается» к действию этого раздражителя.

При анализе биоэффективности космогеофизических агентов, необходимо не только выявлять возможные мишени их воздействия, но также учитывать законы реагирования этих мишеней и кооперативные эффекты совместного воздействия физических агентов различной природы.

Литература

1. Мирошниченко Л.И. Вариации космических лучей в биосфере. Сб. "Электромагнитные поля в биосфере". Под ред. д-ф.-м.н. Н.В. Красногорской. М.: Наука. 1984. Т.1. С.33-39
2. Stozhkov Y.I. The role of cosmic rays in the atmospheric processes // J.Phys.G: Part. Phys. 2003. V.29. P.913-923.
3. Palmer S. J., M. J. Rycroft, M. Cermack. Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. Surv. Geophys. (2006) 27:557–595 DOI 10.1007/s10712-006-9010-7

4. Persinger MA. Geopsychology and geopsychopathology: Mental processes and disorders associated with geochemical & geophysical factors. *Experientia* 1987.43:92-104.
5. Stoupel E. et al. Twenty years study of solar, geomagnetic, cosmic ray activity links with monthly deaths number (n-850304). *J. Biomedical Science and Engineering*, 2011, 4, 426-434 JBiSE doi:10.4236/jbise.2011.46054 Published Online June 2011
6. Рагульская М. В., Обридко В. Н., Чибисов С. М. Биотропное воздействие космической погоды: мифы, реальность и новые направления исследования. Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле. Труды Международной конференции ИКИ РАН, Москва, Россия, 4–8 июня 2012 г. Под ред. А. И. Григорьева, Л. М. Зелёного В двух томах. Том 2. С.581-604
7. Obridko V., Ragul'skaya M., Rudenchik E., Khabarova O., Hramova E. Solar activity 23-24 cycles and structure of biomedical monitoring data, *Tekhnologii zhivikh sistem (Technologies of live systems, ISSN 2070-0997)*, 2014, 11(3), 12-22, DOI: 10.13140/2.1.2980.4167.
8. Ragul'skaya M., Rudenchik E., Chibisov S., Gromozova E. // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, June 2015, Volume 159, Issue 2, pp. 269-272 (<http://link.springer.com/article/10.1007/s10517-015-2939-0>).
9. Клейменова Н.Г., Большакова О.В., Троицкая В.А., Фриис-Кристенсен Е. Два типа длиннопериодных геомагнитных пульсаций вблизи экваториальной границы дневного полярного каспа // *Геомагнетизм и аэрномия*. 1985.Т. 25. № 1. С. 163–165.
10. Белишева Н.К. и др. Качественная и количественная оценка воздействия вариаций геомагнитного поля на функциональное состояние мозга человека // *Биофизика*. - 1995. - Вып.5. - С.1005-1012.
11. Сороко С.И., Бекшаев С.С., Белишева Н.К., Пряничников С.В. Амплитудно-частотные и пространственно-временные перестройки биоэлектрической активности мозга человека при сильных возмущениях геомагнитного поля // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, №4, 2013 – С.111-122.
12. Belisheva N.K. V. M. Kuzhevskii, E. V. Vashenyuk, and Corresponding Member of the RAS V. K. Zhironov. Correlation between the Fusion Dynamics of Cells Growing in vitro and Variations of Neutron Intensity near the Earth's Surface. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2005. V. 402. P. 254–257.
13. Belisheva N.K., Lammer H., Biernat H.K., Vashenyuk V.E. The effects of cosmic rays on biological systems – an investigation during GLE events // *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 8, 7–17, 2012 www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012
14. Белишева Н.К. Кооперативное воздействие вариаций геомагнитного поля и космических лучей на состояние сердечно-сосудистой системы человека на Севере. Коллективная монография «Проблемы адаптации человека к экологическим и социальным условиям Севера». Отв. Ред. Е.Р.Бойко. – Сыктывкар – С. Петербург: Политехника-сервис. 2009. С.48-57. – 264 с. (Коми научный центр УрО РАН).

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 23-24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МИРОВОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, Троцк, Россия

abelov@izmiran.ru

COSMIC RAY VARIATIONS IN 23-24 SOLAR ACTIVITY CYCLES BASED ON THE DATA OF WORLD-WIDE NETWORK OF COSMIC RAY STATIONS

Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

From data of the world network of neutron monitors and stratospheric measurements long-period variations of cosmic rays with a rigidity of 10 GV are obtained and studied. It is shown that, after the weakening of the solar magnetic field, the solar modulation of cosmic rays also decreased substantially. In the 24th cycle, it is 2-3 times less than in the 22nd cycle. A semi-empirical cosmic ray modulation model based on a set of solar indices, on the whole, successfully copes with the description of long-period variations of cosmic rays in the period of large changes on the Sun.

В последние два десятилетия мы наблюдаем значительные изменения солнечной активности, заставляющие вспомнить давние времена маундеровского минимума. При переходе от 22-го цикла к 23-му активность резко снизилась, а в 24-м цикле снижение продолжается. Во времена комплексных наблюдений Солнца ничего подобного не наблюдалось. Особенно впечатляет ослабление солнечного магнитного поля [1–3], которое, естественно, распространилось и на гелиомагнитосферу, и на солнечный ветер. Поскольку наблюдаемые на Земле и у Земли космические лучи (КЛ) – это заряженные частицы (протоны и ядра) и их поведение практически полностью определяется магнитным полем, на них такие изменения не могли не сказаться.

В предлагаемой работе изучаются долговременные вариации галактических космических лучей, полученные на основе наблюдений мировой сети наземных детекторов, выделены и сравниваются особенности поведения КЛ с жёсткостью 10 ГВ в 23-м и 24-м циклах солнечной активности.

Обсуждаемые ниже долговременные вариации КЛ с жёсткостью 10 ГВ получены по среднемесячным данным наземных нейтронных мониторов [4] и по стратосферным наблюдениям [5].

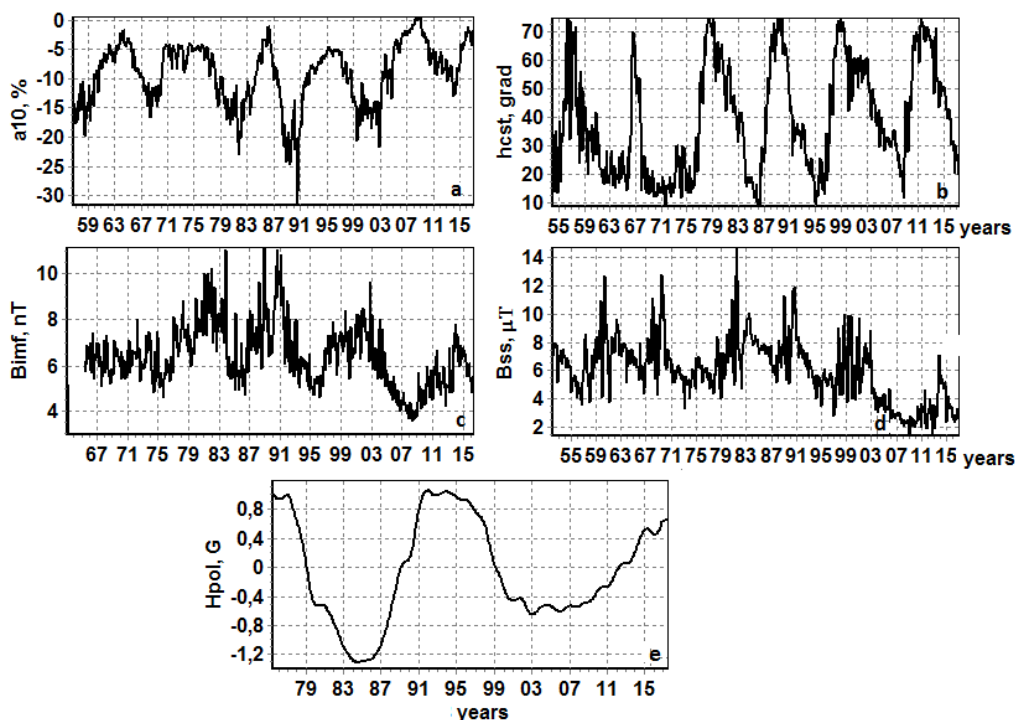


Рис. 1. Поведение вариации плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ (а); наклона гелиосферного токового слоя (b) [6]; магнитной индукции межпланетного магнитного поля у Земли (с) [7]; среднего магнитного поля Солнца (d) [8]; полярного поля Солнца (e) [6].

На Рис. 1 приведены основные характеристики солнечного магнитного поля и связанного с ним межпланетного магнитного поля, имеющие определяющее значение для модуляции КЛ. Хорошо видно, что магнитное поле B_{ss} , усреднённое по поверхности источника солнечного ветра (Рис. 1d), убывает в последние 20 лет. В минимуме активности между 23 и 24 циклами оно опустилось до небывало низких величин, которые, по меньшей мере, вдвое ниже, чем в других минимумах. Похожее, но не столь ярко выраженное, поведение демонстрирует и межпланетное магнитное поле (Рис 1c). Полярное поле Солнца (Рис. 1e) в последних двух циклах имеет меньшую, чем ранее, и уменьшающуюся со временем амплитуду. На первый взгляд, меньше всего изменения коснулись наклона гелиосферного токового слоя (ГТС) (Рис. 1b). Но они есть: в последнем максимуме наклон дольше, чем ранее, держится у высоких значений (около 70°), а в последних минимумах активности ГТС не такой плоский, как в похожие периоды в прошлом.

Уровень ГКЛ в последние 20 лет растёт. Квазиодиннадцатилетний цикл сохранился, но амплитуда его явно уменьшилась. Интенсивность ГКЛ в последнем минимуме (2009-2010 гг.) достигла небывало высоких значений [9,10]. Пока мы не дошли до следующего минимума, но давно прошли фазу максимума 24-го цикла и можно сравнивать максимальную модуляцию этого цикла с предыдущими значениями. Определённо можно сказать, что модуляция в последнем максимуме (2013-2015 гг.) заметно меньше, чем во всех известных нам циклах (Рис 1a). Если в 22-м цикле самая большая модуляция пришлась на 1991 г. и составила -21.0% , то в 23-м цикле она была -16.5%

(2000 г.), а в 24-м – только -9.5 % (2014 г.). Аналогичная картина при сравнении самых низких среднемесячных значений в трёх последних циклах: -31.7 % (июнь 1991 г.), -21.7 % (ноябрь 2003 г.) и -13.1 % (декабрь 2014 г.). Таким образом, циклическая вариация КЛ, связанная с циклом солнечной активности, в последние десятилетия явно ослабевает. Однако можно отметить, что это не относится к более короткопериодной (квазидвухлетней [10]) цикличности, которая на фоне уменьшающейся долгопериодной вариации КЛ становится даже заметнее.

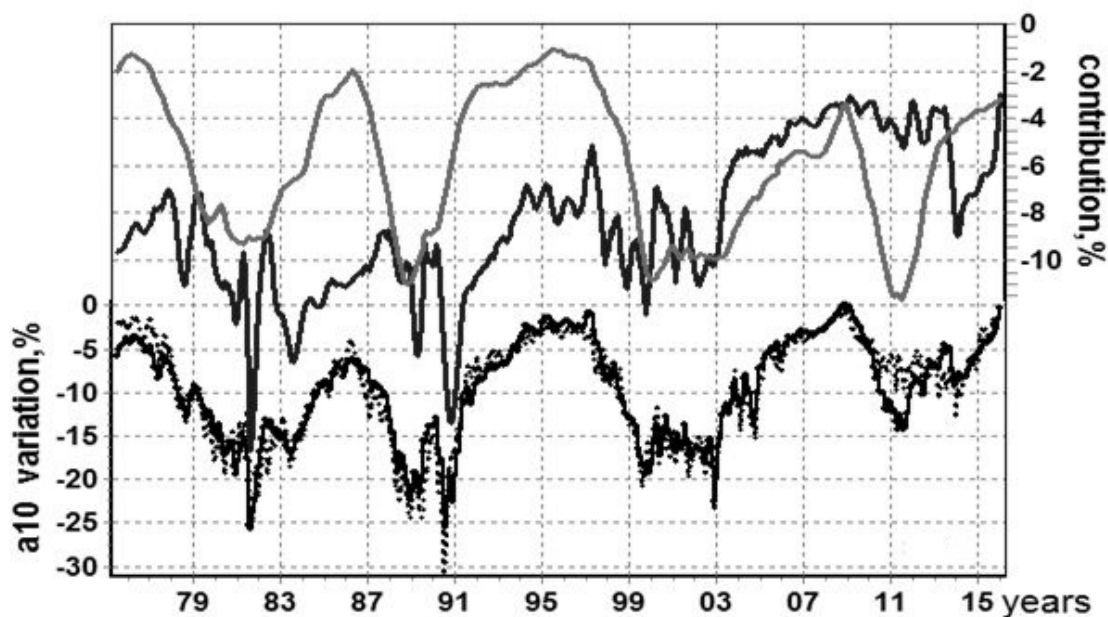


Рис. 2. Среднемесячные значения вариации плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ (пунктир в нижней части рисунка) и результат их моделирования (сплошная кривая). В верхней части рисунка вклад в модель от изменений наклона ГТС (более гладкая и более светлая кривая) и от изменений среднего магнитного поля Солнца (более тёмная и изрезанная кривая).

Рис. 2 демонстрирует результаты моделирования долгопериодных вариаций галактических КЛ с помощью полуэмпирической модели [11], основанной на характеристиках магнитного поля Солнца (наклона гелиосферного токового слоя, среднего магнитного поля и полярного поля). Кроме этого модель включает площадь низкоширотных корональных дыр, и СМЕ индекс [11], отражающий влияние на КЛ выбросов солнечного вещества. Подобная модель применялась нами ранее, и показала свою адекватность. Однако изменения Солнца в последний период – это новое серьёзное испытание для модели. Рис. 2 показывает, что она, в целом, его выдерживает. Можно видеть, что трудности возникают на фазе роста последнего цикла (2011-2012 гг.), в остальное время согласие вполне удовлетворительное. Как и следовало ожидать, среднее магнитное поле Солнца в 23-м и, особенно, в 24-м циклах даёт значительно меньший вклад в модель, чем в более ранние годы. В это же время существенно уменьшаются циклические изменения вклада от наклона ГТС.

Рис. 1-2 показывают вариации КЛ только до 2016 г., но анализ последних данных наземных детекторов показывает, что рост интенсивности ГКЛ продолжается. Сейчас он уже близок к рекордно высокому уровню 2009 г. и, вполне вероятно, скоро его превзойдёт.

Работа выполнена при частичной поддержке Президиума РАН (Программы ФИ N23 и N7), РФФИ (грант N17-02-00508). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ N85 "Российская национальная сеть станций космических лучей" (Сеть СКЛ). Мы также признательны всем сотрудникам сети станций космических лучей <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

Литература

1. Livingston W., Penn M.J., Svalgaard L. Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux // *Astrophys.J. Lett.* 2012. 757:L8
2. Sun Xudong, Hoeksema J. Todd, Liu Yang, Zhao Junwei On Polar Magnetic Field Reversal and Surface Flux Transport During Solar Cycle 24 // *Astroph. J.*, 798, 2, id. 114, 8 pp. (2015)
3. Ishkov V.N. The Sun near of the solar cycle 24 maximum: the geoeffective flare phenomena, the evolution and the development forecast // *The J. Physics: Conference Series (JPCS)*. 2013. V. 409. 01216
4. Belov A.V., Gushchina R.T., Sirotina I.V. The spectrum of cosmic rays variations during 19–22 solar cycles // *Proc. 23-rd ICRC. Calgary. V. 3. P. 605–609. 1993.*
5. Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А., Свиржевская А.К., Квашнин А.Н., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Клочкова Т.И. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007) // *Препр. М.: Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН. 55 с. 2007*
6. <http://wso.stanford.edu/>
7. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omni> web
8. Obridko V.N. and Shelting B.D. Solar physics, structure of the heliospheric current sheet as considered over a long time interval (1915-1996)// *Solar physics. V.184; 187-200. 1999.*
9. M.S. Kalinin, G.A. Bazilevskaya, M.B. Krainev, A.K. Svirzhevskaya, N.S. Svirzhevskii, and S.A. Starodubtsev // *Modulation of galactic cosmic rays in solar cycles 22–24: analysis and physical interpretation. Geomagnetism and Aeronomy, 2017, 57, 5, 549–558.*
10. Гущина Р.Т., Белов А.В., Янке В.Г., Спектр долговременных вариаций космических лучей в минимуме солнечной активности 2009 г. *Известия РАН. сер. физ., 2013, том 77, № 5, с. 577–580.*
11. Белов А. В., Гущина Р. Т., Индекс долговременного влияния спорадической солнечной активности на модуляцию космических лучей, *Геомагнетизм и аэронаука, т. 58, 1, с. 3–11, 2018.*

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА ФОТОСФЕРЕ И В КОРОНЕ В ОБЛАСТЯХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Биленко И.А.

МГУ ГАИШ, г. Москва, Россия

bilenko@sai.msu.ru

PHOTOSPHERIC AND CORONAL MAGNETIC FIELDS IN CORONAL HOLE REGIONS

Bilenko I.A.

MSU SAI, Moscow, Russia

Coronal hole evolution in HeI, EUV and X-ray, and associated magnetic field changes are investigated. The peculiarities of the photospheric magnetic field fine structure at different phases of coronal hole evolution are analyzed. The differences in the magnetic fields in different coronal hole parts and stages are revealed. The results indicate that coronal holes at different coronal heights and time scales are dominated by different scale magnetic fields.

В настоящее время исследованию корональных дыр (КД) уделяется особое внимание ввиду их значительной роли в генерации солнечного ветра, формировании космической погоды и их влияния на геомагнитную активность [2, 6, 8]. Под КД понимаются области в короне с пониженной плотностью и температурой, которые на изображениях в EUV и рентгеновском диапазонах видны как зоны с пониженной яркостью. КД являются трассерами циклических изменений глобального распределения крупномасштабных магнитных полей [3, 4, 7, 9] и, в тоже время, ряд КД эволюционно связаны с процессами в активных областях (АО). КД располагаются в областях униполярных магнитных полей. В КД, регистрируемых в линии HeI, размеры магнитных элементов фотосферной сетки в 2-4 раза больше, чем в невозмущенных областях, и в 2-3 раза выше магнитный поток, и эти различия увеличиваются к максимуму цикла. Внутри КД наблюдается значительный дисбаланс магнитных полей доминирующей и противоположной полярностей. [1, 2, 5].

На основе ежедневных данных космических обсерваторий SOHO и Yohkoh, и наземных наблюдений на Китт Пик и WSO анализируются КД в линии He10830 Å, в EUV и рентгеновском диапазонах и соответствующие наблюдаемые фотосферные и расчетные корональные магнитные поля.

Проведенное исследование показало, что КД более стабильны в линиях 195 Å, 284 Å и в рентгеновском диапазоне, т.е. в более высоких слоях атмосферы Солнца. Положение и эволюционные изменения КД в циклах солнечной активности, в этих линиях, регулируются распределением и динамикой наблюдаемых и рассчитанных крупномасштабных магнитных полей. Одной КД, регистрируемой в этих линиях, может соответствовать как одна, так и несколько КД, в линиях HeI и 171 Å, соответствующих нижним слоям атмо-

сферы Солнца: хромосфере и переходной области. Сопоставление изменений формы и размеров КД в различных диапазонах, т.е. на разных высотах, показывает, что в линии HeI площади меньше или, иногда, равны площади в линии 284 Å и рентгеновском диапазоне. В линии HeI форма и площадь КД значительно изменяется в процессе ее эволюции, оставаясь все время в пределах униполярной области одной и той же полярности и не выходя за границы КД в высоких слоях атмосферы, хотя часто наблюдаются униполярные области той же полярности в непосредственной близости от КД. Динамика КД в нижних слоях атмосферы на малых временных масштабах определяется локальными магнитными полями.

В качестве примера на Рис. 1 показана эволюция КД, наблюдавшихся 22-31 мая 2000 г. В линии HeI 22-27 мая наблюдались две отдельные КД, расположенные в областях фотосферных магнитных полей отрицательной полярности. Одна располагалась целиком в северном полушарии, а вторая частично пересекала экватор и находилась как в южном, так и в северном полушарии. 24 мая КД, находившаяся в северном полушарии, распалась на две небольшие КД, которые 25 мая опять объединились в одну КД. В линии 171 Å наблюдались лишь отдельные фрагменты этих КД. До 28 мая в линиях HeI эти две КД эволюционировали независимо. 28 мая они объединились в одну протяженную трансэкваториальную КД, и эта структура просуществовала до 30 мая. 31 мая она опять распалась на две независимые КД. В то же время в EUV 195 Å, 284 Å и в рентгеновском диапазоне эти КД наблюдались как единая трансэкваториальная, практически не изменяющаяся за время прохождения по диску Солнца, структура (Рис. 1а3-г5). Это соответствует динамике крупномасштабного магнитного поля. Обе КД располагались на одной униполярной области крупномасштабного фотосферного и коронального магнитного поля отрицательной полярности (Рис. 1а6-г6). На Рис. 1а1-г1 стрелками указаны анализируемые области фотосферных магнитных полей, соответствующие КД в северном полушарии (1), КД в южном полушарии (2) и зоне между этими КД, где формировалась временная структура объединенной КД, 28-30 мая, в HeI(3). Следует отметить, что КД 1 примыкала к отрицательным магнитным полям соседней АО, а КД 2 отделялась от близлежащих АО зонами с доминированием положительной полярности. Хотя КД 2 и не соприкасалась с магнитными полями АО, значения магнитных полей в ней были выше, чем в КД 1. Объединение КД не привело к перераспределению локальных магнитных полей внутри единой КД. Локальные магнитные поля внутри КД, находящиеся в разных частях объединенной структуры, вели себя независимо. Магнитные поля в зоне 1 оставались, в среднем, меньше и по значениям, и по размерам магнитной сетки. В зоне 1 24 мая магнитные поля отрицательной полярности были ~ 30-150 Гс, а положительной – 20-70 Гс.

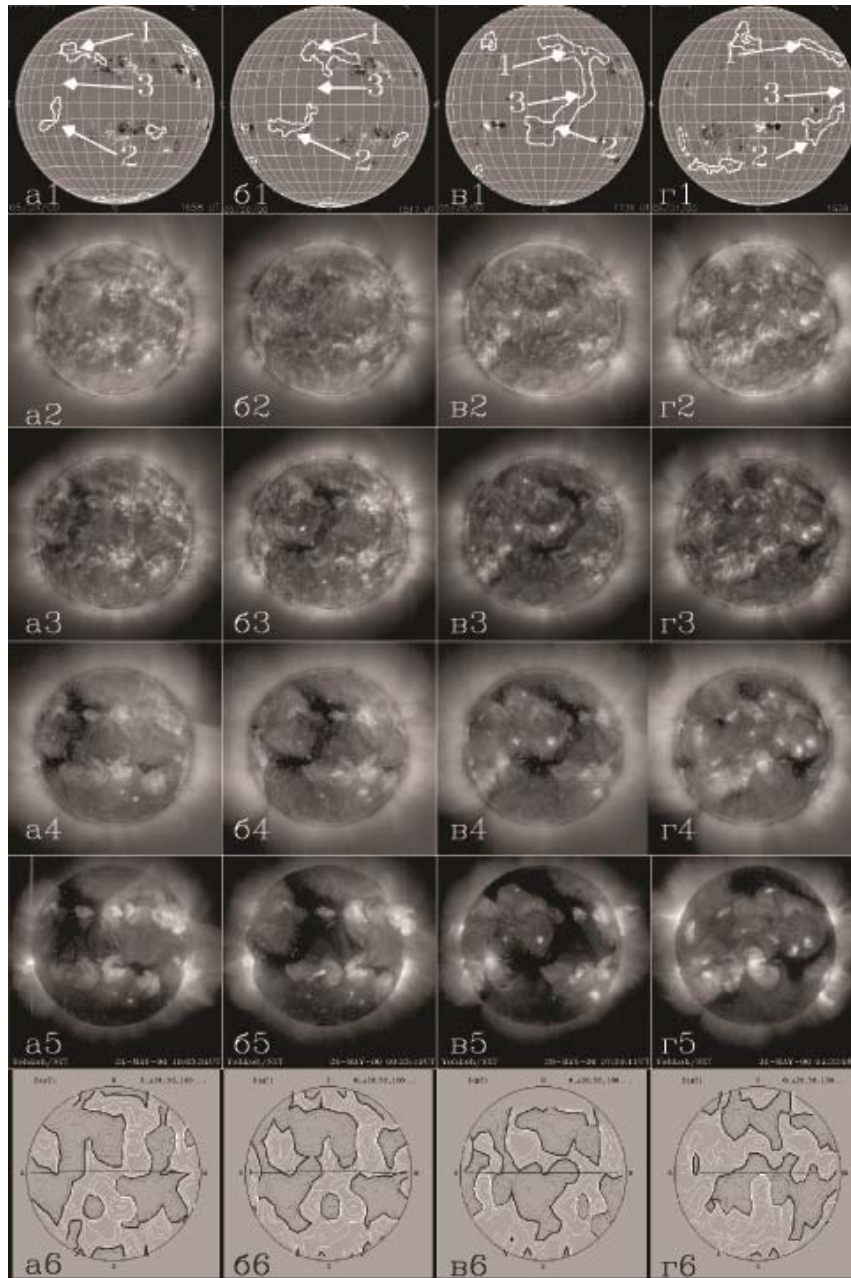


Рис. 1. Эволюция КД 24 (а1-а6), 26 (б1-б6), 28 (с1-с6) и 31 (д1-д6) мая 2000 г. (а1-г1) Магнитограммы полного диска Солнца, совмещенные с КД в линии HeI 10830 Å. (а2-г4). Наблюдения SOHO/EIT: (а2-г2)– 171 Å, (а3-г3) – 195 Å и (а4-г4) – 284 Å. (а5-г5) Наблюдения на Yohkoh/SXT в рентгеновском диапазоне (а6-г6). Распределение крупномасштабных магнитных полей.

На протяжении 25-27 мая, магнитные поля отрицательной полярности росли, достигнув значений порядка 330 Гс, а положительной – оставались примерно на одном уровне, и их площадь сокращалась. В области КД 2 максимальные значения магнитных полей отрицательной полярности изменялись от, примерно, 230 Гс 24 мая до 560 Гс 27 мая. Элементы сетки доминирующей полярности резко увеличивались в размерах и формировали униполярные цепочки с повышенными значениями магнитного поля. В зоне 3 не наблюдалось значительной асимметрии положительных и отрицательных

магнитных полей. 28 мая, в период объединения КД, максимальные значения магнитных полей отрицательной полярности несколько уменьшились и в КД 1, и в КД 2 (180 Гс и 370 Гс, соответственно), а в зоне 3 вырос дисбаланс положительных и отрицательных магнитных полей. 29 мая величина магнитных полей несколько возрастает в зонах 1 и 2, но начинают уменьшаться размеры элементов сетки доминирующей полярности, и униполярные цепочки в КД 2 разрушаются. 31 мая структура распадается на две отдельные КД в северном и южном полушариях. Распад мог быть вызван всплыванием новой биполярной магнитной области в зоне 3.

Результаты свидетельствуют, что распределение, структура и динамика КД на разных высотах в атмосфере Солнца, на разных временных интервалах определяется магнитными полями разных масштабов.

We are grateful to the Yohkoh team for supplying the SXT data. Courtesy of SOHO/EIT consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA. NSO/Kitt Peak data used here were produced cooperatively by NSF/NOAO, NASA/GSFC, and NOAA/SEL. Wilcox Solar Observatory data used in this study were obtained via the web site <http://wso.stanford.edu> at 2018:03:101:13:34 PST courtesy of J.T. Hoeksema. The Wilcox Solar Observatory is currently supported by NASA.

Литература

1. Bilenko I.A., Coronal hole evolution during 1996-1999 // *Solar Phys.* V. 199. P. 23-35. 2001.
2. Bilenko I.A. Identification of the sources of the high-speed and low-speed streams of the solar wind // *IJGA.* V. 6. GI1009. 2005.
3. Bilenko I.A. Tavastsherna K.S. Coronal hole and solar global magnetic field evolution in 1976-2012 // *Solar Phys.* V. 291. P. 2329-2352. 2016.
4. Bilenko I.A. Tavastsherna K.S. Coronal holes as tracers of the Sun's global magnetic field in cycles 21-23 of solar activity // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 57. No. 7, P. 803-813. 2017.
5. Harvey K.L., Sheeley N.R. Jr., Harvey J.W. Magnetic measurements of coronal holes during 1975-1980 // *Solar Phys.* V. 79. P. 149-160. 1982.
6. Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F. и др. Coronal holes as sources of solar wind // *Solar Phys.* V. 46. P. 303-322. 1976.
7. Obridko V.N., Shelting B.D. Coronal holes as indicators of large-scale magnetic fields in the corona // *Solar Phys.* V. 124. P. 73-80. 1989.
8. Obridko V.N., Shelting B.D., Livshits I.M. Relationship between the parameters of coronal holes and high-speed solar wind streams over an activity cycle // *Solar Phys.* V. 270. P. 297-310. 2011.
9. Stix M. Coronal holes and the large-scale solar magnetic field // *Astron. Astrophys.* V. 59. P. 73-78. 1977.

МАГНИТОСФЕРА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПО РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Богод В.М., Кальтман Т.И.

*SAO РАН, Санкт-Петербургский Филиал, г. Санкт-Петербург, Россия
vbog_spb@mail.ru*

THE MAGNETOSPHERE OF SOLAR ACTIVE REGION BY RADIO OBSERVATIONS IN A WIDE WAVELENGTH RANGE

Bogod V.M., Kaltman T.I.

SAO RAS, St.-Petersburg Branch, Saint-Petersburg, Russia

The concept of the magnetosphere of the active region (AR), developed with the help of wide-range radio astronomy tools, allows estimating the values of coronal magnetic fields for various objects presented in the AR, the radiation of which is manifested on radio waves from a single position. Due to the expansion of the wave range and the introduction of new radio telescopes and modern modeling capabilities, it becomes possible to analyze the physical properties of plasma structures of the magnetosphere of AR and to give detailed estimates of the coronal magnetic fields at the levels of the transition zone of the chromosphere-corona and the lower corona. New results of observations in comparison with model estimates are presented.

Наблюдения на крупных радиотелескопах VLA и РАТАН-600 обнаружили сложную многокомпонентную структуру атмосферы в АО [1, 2] (названную магнитосферой АО), в которой наряду с яркими поляризованными источниками над пятнами и источниками над линиями раздела магнитных полярностей присутствовали радиоисточники в области флоккул и широкие малоконтрастные образования типа Гало. Для этих объектов были сделаны оценки магнитных полей и определены основные механизмы излучения [3], среди которых присутствовали тепловые и длительно действующие нетепловые источники генерации. Магнитосфера и процессы в ней охватывают широкий диапазон высот в АО: от уровня фотосферы до корональных высот. Для детального исследования структуры магнитосферы нужны комбинации высоких параметров антенных систем, включающие: (i) высокое пространственное разрешение (для выделения деталей АО); (ii) высокую чувствительность по потоку излучения (для регистрации слабоконтрастных деталей в интенсивности и поляризации); (iii) мгновенный анализ спектра в широком многооктавном диапазоне частот (для определения механизмов излучения); (iv) широкое и мгновенное заполнение UV- плоскости пространственных частот (для одновременного выделения деталей разных пространственных размеров). Такими характеристиками частично могут обладать крупные антенные системы типа РАТАН-600, EVLA (в конфигурации D [1]), ALMA (в режиме АКА [4]).

Магнитное поле играет доминирующую роль во всех процессах магнитосферы и его анализ и измерение на различных высотах хромосферы и ко-

роны является сложной задачей и доступно чувствительным радиоастрономическим методам в сочетании с модельными реконструкциями.

Структура магнитосферы типовой АО. Магнитографические наблюдения АО Солнца явно демонстрируют острова сильных магнитных полей (пятен), определяющие отдельные, более или менее изолированные АО, а, следовательно, долго живущие (зачастую много суток) локальные токи в фотосфере или непосредственно под фотосферой. Магнитосфера АО на уровне фотосферы состоит из структуры сильных магнитных пятен, окруженных более слабыми полями флоккул на фоне мелкомасштабной структуры хромосферной сетки, получившей в радиодиапазоне название “радиогрануляция” [3]. Слабые и сильные магнитные поля с разными пространственными размерами простираются вверх до уровней нижней короны, где они могут быть измерены с помощью точных методов радиоастрономии, базирующихся на спектрально-поляризационных наблюдениях на крупных радиотелескопах.

Радио источники над сильными магнитными полями пятен. Высотная структура АО таит в себе еще много неясного и является трудной наблюдательной задачей для методов оптической астрономии, ввиду высокой температуры плазмы над пятном. В связи с этим, в последние годы получили распространение различные модельные методы реконструкции фотосферного магнитного поля на корональные высоты. С другой стороны, в радиоастрономии уже используются наблюдения в широком диапазоне волн, начиная от субмиллиметрового диапазона, в котором излучение вне вспышек является тепловым, до метрового диапазона волн, где радиоизлучение носит полностью нетепловой характер. В диапазоне сантиметровых и дециметровых волн излучение различных деталей АО может быть объяснено циклотронным на нижних (2-3) гармониках гирочастоты (над пятнами), свободно-свободным излучением тепловой плазмы (над флоккулами, волокнами, корональными дырами) и нетепловым излучением [3] (межпятенное излучение Гало и микровсплески в вершинах арочных структур). Возможные методы высотных измерений магнитного поля базируются на астрофизических интерпретациях, связанных со всеми перечисленными механизмами излучения.

Измерения в микроволновом диапазоне показали, что:

- Корональные магнитные поля в целом, до высот около 100 тыс. км удовлетворительно следуют потенциальным реконструкциям полей на фотосфере. Исключения составляют реконструкции, не всегда соответствующие наблюдениям.
- Магнитные поля в короне над пятнами обычно достигают значений 70-80% от фотосферных полей.
- В межпятенной зоне часто регистрируются (наряду с тепловыми) источники длительного нетеплового излучения, такие как: (i) “пекулярные” источники, связанные с дельта-конфигурациями магнитных полей групп пятен; (ii) повышенное радиоизлучение над нейтральными линиями магнитных полей; (iii) микровсплески в дециметровом диапазоне, коррелирую-

щие с генерацией шумовых бурь на метровых волнах; (iv) регистрируемая в спектрах всей магнитосферы в целом нетепловая добавка, величина которой меняется в разных областях.

Высотная структура корональных магнитных полей над пятнами исследовалась на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне с применением стереоскопических методов по спектральным измерениям поляризованного излучения радио источников над пятнами в течение 2-3 дней, регистрируемого под разными углами из-за вращения солнечного диска [4].

В миллиметровом диапазоне волн уже первые измерения на новом инструменте ALMA показывают сложную высотную структуру над пятном в хромосфере АО 12470 [5]. На РАТАН-600 на коротких волнах сантиметрового диапазона для этой АО (рис.1) обнаружено, что наряду с существованием ярких радиоисточников, над пятнами присутствует холодное излучение с температурой ниже температуры окружающей плазмы. В результате комбинирования наблюдений на РАТАН-600 и ALMA получена более полная информация о зависимости интенсивности солнечного пятна от длины волны. При этом информация о температурах на высотах нижней и средней хромосферы доступна из данных ALMA, а на высотах верхней переходной области и нижней короны – из данных РАТАН-600. Сопоставление данных, полученные на двух инструментах, указывает на значительную неоднородность плазмы не только в картинной плоскости, но и по высоте, что требует адекватных модельных объяснений (см. рис.1).

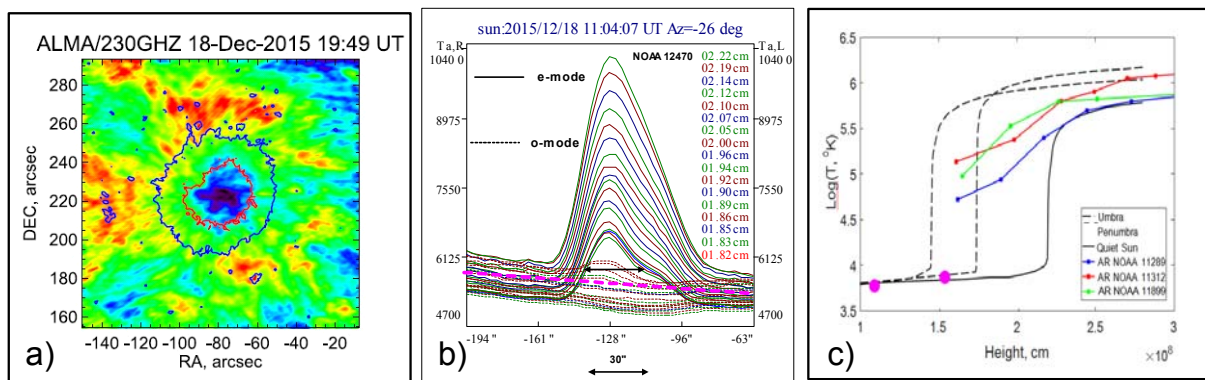


Рис.1. а) Карта АО 12470, полученная на ALMA с разрешением 4.9×2.2 arcsec. на волне 3 мм [5] б) Многоволновые сканы РАТАН-600 для АО 12470 для е-моды (сплошные) и о-моды (пунктиром). в) Сопоставление зависимостей температуры от высоты, полученным по данным ALMA и РАТАН-600 с принятыми моделями из работ [6, 7].

Знания о высотном распределении температуры и плотности в атмосфере пятна крайне важны для понимания процесса переноса энергии от солнечной фотосферы вверх в корону в условиях сильных магнитных полей. Предполагается, что в атмосфере пятна имеет место нагрев, связанный с

сильным магнитным полем, но механизм этого нагрева и его величина крайне мало изучены.

Хромосфера и переходная область в корону. Высотная структура переходной области над пятнами по спектрально-поляризационным наблюдениям на РАТАН-600 была также исследована [8]. Оказалось, что распределение температуры в переходной области носит плавный характер, значительно отличающийся от моделей переходной области с резким ростом температур, которые получили широкое распространение при моделировании характеристик микроволнового излучения активных областей на Солнце.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-02-00045).

Литература

1. Lang K.R., Willson R.F., Kile J.N., Lemen J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov-Maximov B.E., Tsvetkov S.V. Magnetospheres of solar active regions inferred from spectral-polarization observations with high spatial resolution; // *Astrophysical Journal*, Dec.10, 419, pp. 398-417. 1993.
2. Bogod V.M., RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle. I. New opportunities and tasks, // *Astrophysical Bulletin*, V. 66, I. 2, 190-204, 2011.
3. Bogod V.M., Kal'tman, T.I., Peterova, N.G., Yasnov L.V. Study of the magnetospheres of active regions on the Sun by radio astronomy techniques//*Cosmic Research*, т.55, Т1, с.1, 2017.
4. Bogod, V.M., Yasnov, L.V. Determination of the Structure of the Coronal Magnetic Field Using Microwave Polarization Measurements // *Solar Physics*, Vol. 291, Issue 11, pp.3317, 2016.
5. Loukitcheva M.A. et al., Solar ALMA Observations: Constraining the Chromosphere above Sunspots //*The Astrophysical Journal*, V. 850, I. 1, article id. 35, 13. 2017
6. Stupishin A.G. et al. Modeling of Solar Atmosphere Parameters Above Sunspots Using RATAN-600 Microwave Observations, *Solar Physics*, V. 293, I. 1, 13, 15, 2018.
7. Fontenla et al. Calculation of Solar Irradiances. I. Synthesis of the Solar Spectrum, // *Astrophys.J.*, 518, 480, 1999.
8. Korzhavin A.N., Opeikina L.V., Peterova N.G. Transition region above sunspots inferred from microwave observations, //*Astrophysical Bulletin*, v. 65, Issue 1, pp.60-74, 2010.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМА СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ ПУТЕМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОРОНЕ

Подгорный² А.И., Борисенко^{1,2} А.В.

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Россия

²Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва, Россия
sunw77@mail.ru

USING OF THE SUPERCOMPUTER FOR STUDY OF SOLAR FLARE MECHANISM VIA CORONAL MHD SIMULATION

Podgorny² A.I., Borisenko^{1,2} A.V.

¹Crimean astrophysical observatory RAS, Nauchny, Russia

²Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

Comparison of observations with results of MHD simulation above the active region NOAA 10365 performed in reduced time scale unequivocally is showed, that the flare takes place in corona as a result of release of energy, which is accumulated in the magnetic field of the current sheet. Basing on the mechanism of flare energy release in a current sheet I.M. Podgorny proposed electrodynamic model of the solar flare which explains main manifestations of a flare. For more detail study of the current sheet magnetic field configuration it is necessary to perform MHD simulation in real time scale. The calculation must be accelerated in 100 times. For this purpose, the supercomputer on the base of CUDA NVIDIA technology with the GPU Tesla M2050 has been installed. Software has been adjusted and tested for it.

Солнечные вспышки являются самыми мощными взрывными проявлениями солнечной активности, оказывающими существенное влияние на Землю и околоземное космическое пространство. Первоисточник магнитной энергии солнечных вспышек находится в короне. Об этом свидетельствуют наблюдения в короне в рентгеновском и ультрафиолетовом излучении, появление двух лент в H_{α} и линиях излучения хромосферы и переходного слоя, свидетельствующее о нагреве нижних слоев солнечной атмосферы в результате распространения ускоренных электронов вдоль магнитных линий к подножьям арок от источника в короне. Кроме того, результаты сравнения МГД моделирования с современными наблюдательными данными независимо подтверждают появление вспышки в короне.

Во время вспышки в активной области (АО) остаются практически неизменными магнитный поток, распределения нормальной компоненты магнитного поля и компоненты поля вдоль луча зрения [1]. Вспышки появляются, прежде всего, в тех АО, где полярности магнитного поля сильно переплетены (как правило, в сложных группах пятен) (признак, используемый для прогноза вспышек), в этом случае в магнитном поле короны могут появляться особые линии X-типа, в которых под воздействием возмущений образуются токовые слои (ТС).

Для выяснения механизма вспышки проводилось МГД-моделирование над реальной АО (NOAA 10365), когда все условия берутся из наблюдений, и никаких предположений о механизме вспышки при постановке условий не делалось. Целью такого моделирования является установить механизм вспышки. Предложенный подход отличался от распространенного метода, когда с самого начала выдвигалась гипотеза о механизме вспышки, которая затем проверялась.

Решение системы МГД уравнений проводилось в солнечной короне расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда (Рис. 1).

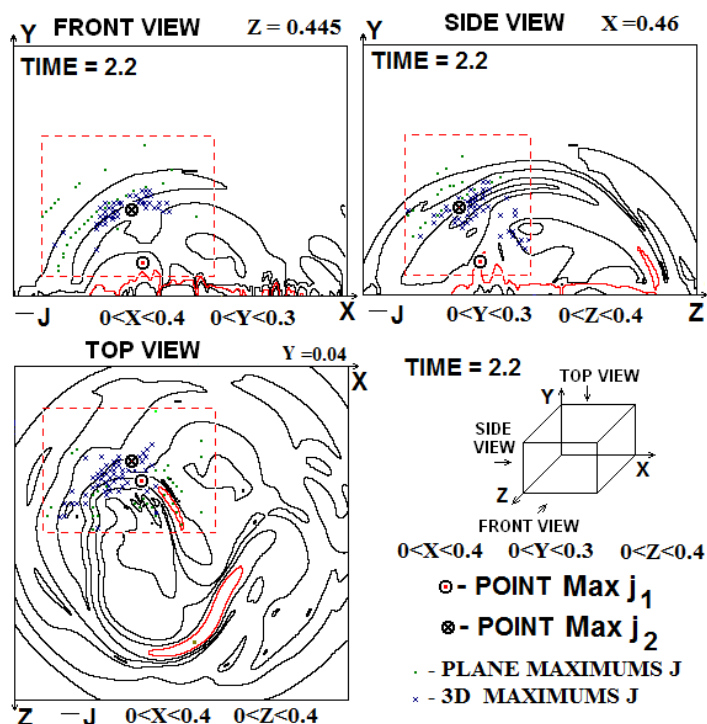


Рис. 1. Линии постоянной плотности тока и плоские максимумы плотности тока, отмеченные точками, в плоскостях, проходящих через точку Max j_1 : вид спереди $z=0.445$, вид сверху $y=0.04$, вид сбоку $x=0.46$. Проекции максимумов плотности тока в пространстве на эти плоскости отмечены крестиками. Отмечены выбранные точки Max j_1 и Max j_2 .

Подробно условия моделирования в короне над АО описаны в [2]. Для повышения скорости расчета специально разработана устойчивая при больших временных шагах конечно-разностная схема [3]. Схема является абсолютно неявной, противоточной и консервативной относительно магнитного потока. Схема решается методом итераций. Разработанные численные методы на Фортране реализованы в программе ПЕРЕСВЕТ (Подгорный А.И.).

На основе механизма освобождения энергии в токовом слое (ТС) с использованием результатов численного моделирования и наблюдений предложена электродинамическая модель солнечной вспышки (Рис. 2), объясняющая ее основные наблюдаемые проявления [4]. Только механизм вспышки, согласно которому происходит освобождение магнитной энергии токового слоя, может объяснить медленное накопление энергии перед вспышкой, а затем ее быстрое освобождение во время вспышки.

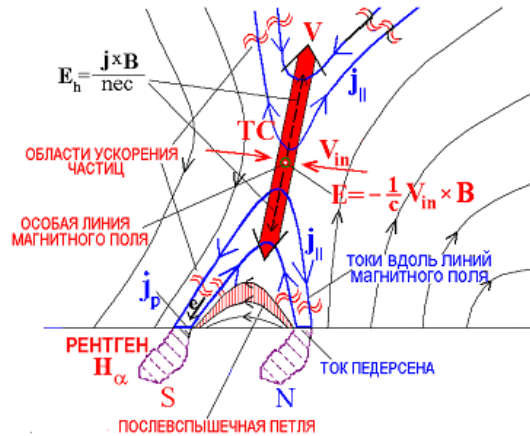


Рис. 2. Электродинамическая модель солнечной вспышки (Подгорный И.М.).

Несмотря на применение специально разработанных методов, МГД-моделирование в короне над АО выполняется настолько медленно, что на обычном компьютере для АО 10365 расчет удалось провести только в сильно сокращенном масштабе времени (магнитное поле в задаваемых на границе условиях менялось в 10^4 раз быстрее, чем на фотосфере Солнца). Такое быстрое изменение магнитного поля на фотосфере приводит к неустойчивости вблизи фотосферной границы и к возмущениям в короне с большим током, которые могут маскировать появление токовых слоев. Однако, существование токового слоя отчетливо фиксируется в окрестности особой линии магнитного поля. Об этом свидетельствует совпадение положения токового слоя, найденного при помощи специально разработанной системы поиска (точка максимума плотности тока $\text{Max } j_1$ на Рис. 1) с положением источника теплового рентгеновского излучения для вспышки, произошедшей 27 мая 2003 г в 02:53.

Моделирование в реальном масштабе времени в течение первых нескольких минут эволюции показало отсутствие неустойчивости на границе, которая приводит к генерации паразитных токов. Моделирование необходимо провести так, чтобы в отсутствии возмущений на фотосферной границе иметь возможность удобно и точно определять положение токового слоя, точнее получать конфигурацию магнитного поля как вблизи токового слоя, так и, особенно, в значительной области, содержащей токовый слой и прилегающей к фотосферной границе. Также моделирование в реальном масштабе времени необходимо, чтобы точно рассчитать энергию вспышки, накопленную в магнитном поле токового слоя. Моделирование вспышечной ситуации в короне в реальном масштабе времени на обычном персональном компьютере (процессор 1,6 ГГц) должно занять несколько лет; для того чтобы его осуществить в обозримое время (~ 10 суток) необходим суперкомпьютер который в ~ 100 раз ускорит вычисления.

Для МГД моделирования вспышечной ситуации собран суперкомпьютер, который осуществляет параллельные вычисления при помощи многопроцессорной графической платы GPU Tesla M2050 (Рис. 3) на базе техноло-

гии CUDA NVIDIA. Настроено программное обеспечение, позволяющее использовать удобный для распараллеливания PGI Fortran компилятор (Борисенко А.В.). Тестовые вычисления для решения уравнения Пуассона, в которых распараллелены итерации, проводимые тем же способом, что и при переходе на следующий временной шаг при численном решении МГД уравнений (когда значение в центральной точке шаблона сетки разностной схемы на текущей итерации определяется по значениям в соседних точках на предыдущей итерации), показали ускорение расчета в 115 раз. **Подготовлена методика для осуществления следующего этапа исследования вспышечной ситуации в солнечной короне.**

Авторы благодарны И.М. Подгорному за полезные обсуждения.

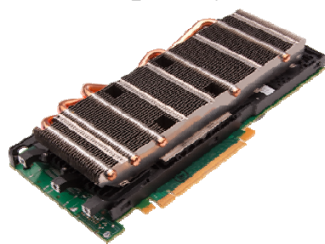


Рис. 3. Nvidia Tesla M2050 - вычислительный GPU (double precision support) процессор.

Литература

1. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Динамика магнитного поля активных областей в предвспышечном состоянии и во время солнечных вспышек // Астрон. журн. Т. 92. С. 669-680. 2015.
2. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Образование нескольких токовых слоев над активной областью АО 10365 перед серией вспышек // Астрон. журн. Т. 85. С. 739-749. 2008.
3. Подгорный А.И., Подгорный И.М. МГД моделирование явлений в солнечной короне с использованием абсолютно неявной схемы // Журн. вычисл. мат. и матем. физ. Т. 44. С. 1873-1897. 2004.
4. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки. 2. Модель вспышки и моделирование с использованием магнитных карт активных областей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. С. 176-189. 2012.

ВЛИЯНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ НА БИОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Бочкарев Н.Г.

ГАИШ МГУ, Москва, Россия

boch@sai.msu.ru

IMPACT OF THE INTERSTELLAR MEDIUM ON PROCESSES ON THE EARTH

Bochkarev N.G.

Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

The paper discusses possible impacts of the interstellar matter (ISM) on processes on the Earth, first of all those, which may affect the Earth biosphere. ISM parameters, determining the penetration of galactic cosmic rays, interstellar atoms, and ions into the Solar system and their impact on Earth varies considerably as the Sun moves through different ISM regions. In some cases the impact may provoke severe environment changes substantial for the life on Earth.

Положение и движение Солнца в Галактике. Солнечная система (СС) движется сквозь межзвездную (МЗ) среду (МЗС) вокруг центра Галактики по орбите, напоминающей круговую, но искаженную гравитационными полями спиральных рукавов ([5]. При этом СС то немного (на 70 пк) поднимается над плоскостью Галактики, то настолько же уходит под нее.

В настоящее время Солнце находится в области МЗС, называемой Местной МЗС (ММЗС), недалеко от края сверхоболочки [1], образованной звездной ассоциацией Скорпиона-Центавра, совокупное действие звездных ветров и взрывов сверхновых в которой выметло большую часть МЗ газа на расстоянии 170 пк вокруг ассоциации. Внутри выметенного газа остаются обрывки газовых структур (облачков, волокон, уплотнений), которые были там до того, как сформировалась Местная сверхоболочка. Горячий газ звездных ветров и взрывов сверхновых обтекает их, не успевая разрушить. Солнце находится вблизи горячего газа, но в теплом разреженном газе.

Взаимодействие солнечного ветра и МЗС. Солнце движется сквозь МЗС со скоростью около 20 км/с. Это соответствует тому, что СС обдувается МЗ ветром. С другой стороны, Солнце порождает свои корпускулярные потоки – солнечный ветер. Заряженные частицы обоих ветров, сталкиваясь, образуют двухслойную ударную волну, с одной стороны от которой находится МЗ газ, а с другой – затормозившийся ударной волной солнечный ветер. Эта область называется гелиопаузой, а ограниченное ей пространство – гелиосферой.

Нейтральные атомы МЗС движутся по-другому. Они, почти не чувствуя ударной волны, пролетают сквозь нее и наблюдаются в основном по рассеянному ими излучению Солнца в спектральных линиях водорода $L\alpha$ 1216 Å, $L\beta$ 1025 Å и нейтрального гелия He I 584 Å. Анализ фона неба в этих линиях позволил определить параметры МЗС в ближайших окрестностях гелиосферы.

Оказалось, что МЗ газ в ближайших окрестностях Солнца, но вне гелиосферы, имеет температуру 8000°К, плотность – несколько десятых долей частицы в кубическом сантиметре, степень ионизации примерно 50%. Т.о., СС расположена в теплой области НІ, но очень близко к границе с горячим газом.

Нейтральные атомы МЗС, проникшие внутрь гелиосферы, ионизируются ультрафиолетовым излучением Солнца и реакциями перезарядки с ионами солнечного ветра. Став заряженными, такие частицы увлекаются назад солнечным ветром, образуя поток т.н. «захваченных ионов». Когда эти ионы приближаются к внутреннему краю двухслойной ударной волны, они ускоряются на фронте ударной волны и образуют т.н. аномальную компоненту КЛ. В отличие от преимущественно релятивистских частиц галактических КЛ, аномальные КЛ являются субрелятивистскими. Они сильнее взаимодействуют с атомами и молекулами, в частности с веществом верхних слоев планетных атмосфер (если достигают их).

Статистические данные о распределении МЗ облаков по размерам и плотности показывают, что Солнце за 4.5 млрд. лет путешествия в Галактике около 130 раз (т.е. 7-8 раз за галактический год) проходило сквозь МЗ облака с концентрацией $n > 100$ частиц в кубическом сантиметре и примерно 16 раз – сквозь облака с $n > 1000 \text{ см}^{-3}$ [7; 9].

Влияние КЛ на содержание озона в атмосфере Земли. В настоящее время радиус гелиосферы составляет примерно 100 а.е. Когда СС погружается в МЗ облако, размер гелиосферы убывает до 1-2 а.е. Такое сжатие практически не изменяет параметры проникающих в нее галактических КЛ. В тоже время энергия аномальных КЛ, ускоряющихся на внешней границе гелиосферы, возрастает в сотни раз. В результате верхняя атмосфера Земли, по крайней мере, в полярных районах, облучается аномальными КЛ в сотни раз сильнее, что приводит в современной азотно-кислородной атмосфере Земли к образованию окислов азота, разрушающих молекулы озона, что приводит к значительному ослаблению озонового слоя. Характерное время, за которое содержание озона достигает нового стационарного состояния, составляет несколько лет (Pavlov e5).

В работе [7] рассчитаны модельные распределения озона по поверхности Земного шара при современном размере гелиосферы и для случая, когда гелиосфера сильно обжата окружающим МЗ газом с концентрацией 100 см^{-3} . Оказалось, что в приполярных районах количество озона уменьшается в 2-4 раза; в экваториальных районах – примерно на 40%.

Смены полярности магнитного поля Земли и магнитные экскурсы, когда дипольная компонента магнитного поля на время 1–10 тысяч лет сильно ослабевает, приближаясь к нулю, хорошо документированы и происходят в среднем раз в 200 тыс. лет, хотя были эпизоды постоянной полярности длительностью десятки миллионов лет.

Характерное время пребывания СС внутри гигантского молекулярного облака порядка 1 млн. лет. За это время смена полярности магнитного поля

Земли обычно успевают произойти несколько раз. И каждый раз озоновая защита биосферы ослабевает на тысячи лет одновременно на всей поверхности Земли, включая экваториальные области. Это, естественно, **ослабляет биосферу и, вероятно, может приводить к массовому вымиранию видов.**

Вариации потока галактических КЛ. Галактические КЛ низких энергий распределены в Галактике неравномерно. Это следует хотя бы из того, что среди источников гамма-излучения значительную часть составляют молекулярные облака. В них выше плотность КЛ, которые, взаимодействуя с МЗ веществом, рождают гамма-кванты. Молекулярные облака расположены преимущественно в спиральных рукавах Галактики. Поэтому в рукавах повышено содержания КЛ низких энергий. При движении в Галактике СС попадает в области с различной плотностью КЛ.

Сопоставление таких явлений на Земле, как эпохи похолоданий и потеплений, великих оледенений, массовых вымираний видов с моментами прохождения Солнцем спиральных рукавов, а также с вариациями потока галактических КЛ, заставляет предположить, что климат нашей планеты зависит от этих явлений [8].

Роль эволюции Галактики. Время, прошедшее с образования Солнечной системы (4.6 млрд. лет), составляет заметную долю возраста нашей Галактики (около 13 млрд. лет). Поэтому физические условия в межзвездной среде, которая окружает Солнечную систему и сквозь которую она движется, могли испытать значительные изменения.

По мере старения Галактики убывает количество межзвездного вещества и увеличивается доля тяжелых элементов в нем, изменяются доли объема, которые заполняют различные структуры МЗС. Но перечисленным процессам, приводящим к исчерпанию запасов МЗ вещества галактики и как следствие снижения всевозможных проявлений активности, то есть к "старению" галактик, противостоит приток в галактики межгалактического водорода, играющего роль топлива. Это "омолаживает" галактики, поддерживает их звездообразование и другие активные процессы [10].

Наша Галактика, как и большинство других окружающих нас галактик, миновала бурную юность еще до того как сформировалась Солнечная система – колыбель биосферы Земли. За последние 5 млрд. лет Галактика не испытывала сильных мерджингов и не будет испытывать их еще несколько миллиардов лет. Но затем нашей Галактике предстоит пережить "вторую молодость". Поглощение Магеллановых облаков Галактикой завершится через 4 млрд. лет. Столкновение с галактикой МЗ1 (туманность Андромеды) произойдет через 5 млрд. лет.

Другие агенты влияния МЗС на биосферу. Межзвездная пыль также может оказывать влияние на биосферу за счет различных процессов. Во-первых, при достаточной плотности пыли она может вызывать поглощение солнечного света на пути до планеты. Этот механизм впервые был предложен Ф.Хойлом в его фантастическом произведении "Черное облако" и количественно рассмотрен в [6]. Кроме того, при достаточной запыленности

верхней атмосферы планеты поглощение пылью электромагнитного излучения приводит к нагреву этих слоев, что также может сказываться на климате планеты. Для биосфер планет с очень малым количеством питательных веществ существенным фактором, пополняющим питательные ресурсы биосферы, могут оказаться органические молекулы, замороженные в пылинки и приносимые вместе с ними на поверхность планеты. Гипотезу о роли такого влияния на современную биосферу Марса высказал Павлов и др., [2;7].

Несколько других факторов, влияющих на биосферу, перечислены, в частности, в следующих работах [3;4] некоторых других.

Напомним, что в процессе эволюции Солнца изменяются параметры солнечного ветра и солнечных КЛ. Эти факторы влияли, в частности, на размер гелиосферы и, соответственно, на проникновение внутрь Солнечной системы галактических КЛ.

Литература

1. Бочкарев Н.Г. (1990) Местная межзвездная среда. Москва, "Наука", 192 сс.
2. Павлов А.К., Воробьева Е.А., Чепцов В.С, Цурков Д.А. Берденникова А.В. (2017). Возможная «обитаемость» марсианского реголита и обнаружения «биомаркеров» древней жизни. В кн. Жизнь и Вселенная???
3. Павлов А.К., Остряков, В.М., Васильев Г.И. (2011). Плотные межзвездные облака и ионизация атмосферы и грунта Марса. *Астрономический вестник*, т. 45, вып. 1, стр. 1-4.
4. Atri D., Melot A. (2014) Cosmic rays and Terrestrial Life: a Brief Review. *Astroparticle Physics*, V. 53, pp. 186-190.
5. Gies D.R. and Helsel J.W. (2005) Ice-age Epochs and the Sun's Path through the Galaxy. *Astrophys. J.*, V. 626, pp. 844-848.
6. Pavlov A.A., Toon O.B., Pavlov A.K., Bally J., and Pollard D. (2005b). Passing through a Giant Molecular Cloud – "Snowball" Glaciations produced by interstellar dust. *Geophysical Research Letters*, V. 32, ID L03705.
7. Pavlov A.A., Toon O.B., Pavlov A.K., Bally J., and Pollard D. (2005a) Catastrophic ozone loss during passage of the Solar system through an interstellar cloud. *Geophysical Research Letters*, V. 32, id. L01815, 4 pp.
8. Shaviv N.J. (2003) Spiral Structure of the Milky Way, Cosmic Rays, and Ice Age Epochs on Earth. *New Astronomy*, V. 8, pp. 39-77.
9. Talbot R. J., Newman M. J. (1977) Encounters between stars and dense interstellar clouds, *Astrophys. J. Suppl.*, V. 34, pp. 295-308.
10. Сильченко, О.К. Происхождение и эволюция галактик, 2017, «Век 2» 224 с.

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА НА СУБЛИМАЦИОННУЮ АКТИВНОСТЬ ПРИМИТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ

Бусарев В.В.

ГАИШ МГУ, Москва, Россия

busarev@sai.msu.ru

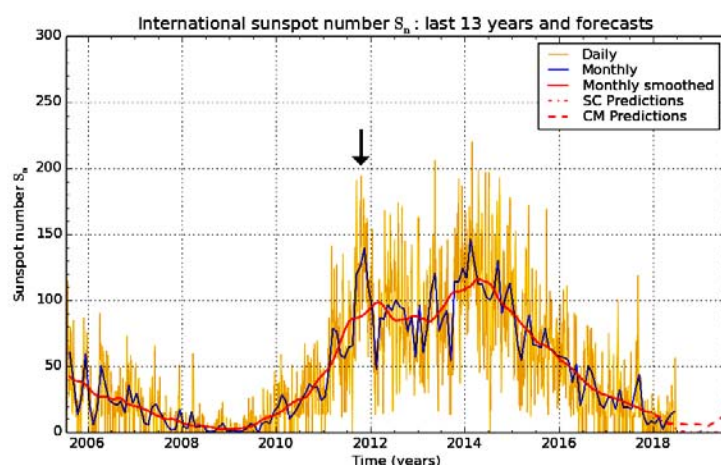
DETECTION OF THE INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON THE SUBLIMATION ACTIVITY OF PRIMITIVE ASTEROIDS

Busarev V.V.

SAI MSU, Moscow, Russia

We have probably found the influence of solar activity on the size (or density) of the sublimation coma of active asteroids. The magnitude of the maxima of light scattering at 0.5-0.6 μm in the reflectance spectra of 145 Adeona, 704 Interamnia, and 779 Nina was highest in September 2012. At the same time, reflectance spectra of these asteroids obtained during their next perihelion passage in 2016-2017 (at low solar activity), with rapid variability of the spectra themselves, most often did not contain such maxima.

Как известно, интегральным параметром, характеризующим солнечную активность, является общее количество солнечных пятен. Согласно последней информации Мирового Центра Данных об индексе солнечных пятен S_n (SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels, <http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>), за последние 13 лет он менялся так, как показано на рисунке 1. Соответственно, солнечная активность находилась вблизи максимума с конца 2012 г. до начала 2015 г., испытывая некоторые колебания, а потом постепенно в среднем снижалась к настоящему моменту времени.



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2018 July 2

Рис. 1. Изменения международного индекса S_n солнечных пятен за последние 13 лет (<http://sidc.oma.be/silso/dayssnplot>).

Следует обратить внимание на заметный дополнительный всплеск S_n в самом начале этого периода, примерно с сентября по декабрь 2012 г., обозначенный черной вертикальной стрелкой (Рис. 1). Именно в сентябре 2012 года нами была обнаружена одновременная кометная активность четырех примитивных астероидов (с низкотемпературной минералогией) Главного пояса, находившихся вблизи перигелия.

На рисунке 2 (а–в) представлены усредненные и нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения 3 из этих астероидов – 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины, полученные на пике Терскол в сентябре 2012 г. [1, 2]. Активность этих астероидов нами подтверждена при их следующем прохождении перигелия в 2016 – 2018 гг. [3].

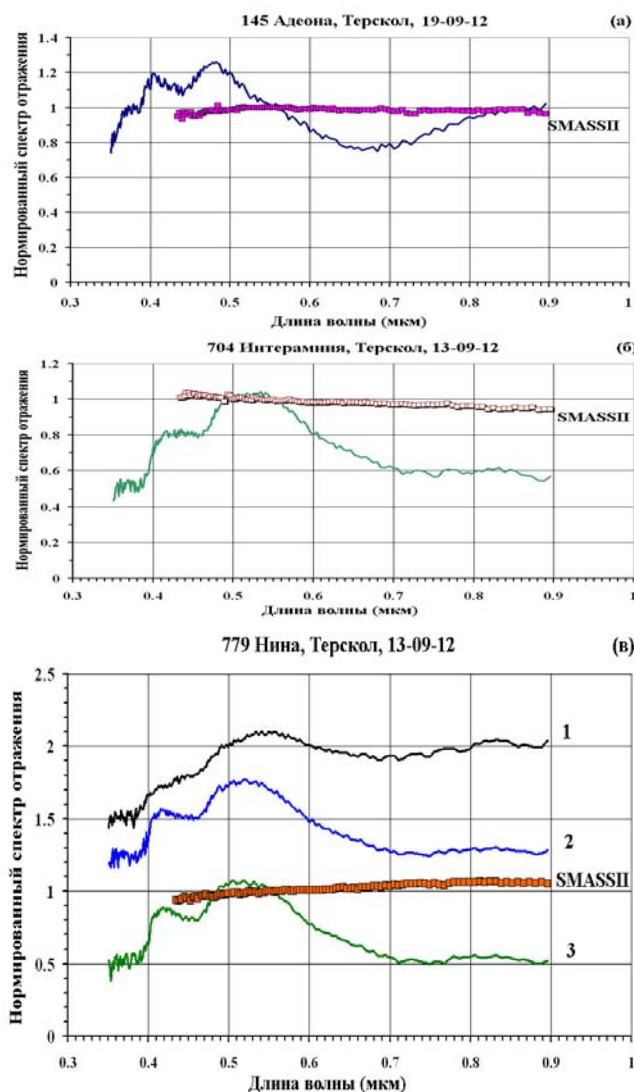


Рис. 2 (а, б, в). Усредненные и нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения примитивных астероидов Главного пояса 145 Адеоны (а), 704 Интерамнии (б) и 779 Нины (в), полученные в сентябре 2012 г. Для сравнения приведены данные об этих астероидах, полученные вдали от перигелия другими авторами SMASSII [4-6]. Спектры отражения Нины 1–3 получены на интервале времени, соответствующем примерно половине периода вращения этого астероида ($T_{вр.} = 11.186^h$ [7]).

На представленных спектрах отражения астероидов (рис. 2) обращает на себя внимание необычный максимум у 0.5-0.6 мкм, указывающий на наличие комы из частиц микронного размера, рассеивающей отраженный от астероидов солнечный свет [2]. Для сравнения на рисунке 2 (а, б, в) приведены спектры отражения (SMASSII), полученные другими авторами при нахождении этих астероидов вдали от перигелия [4-6]. Необычным является также сходство формы спектров отражения этих астероидов, которые, вообще говоря, должны иметь спектральные различия, так как принадлежат разным (хотя и близким) таксономическим классам [1, 2]. Это возможно в том случае, если состав вещества частиц комы у рассматриваемых астероидов примерно одинаков. Кометная активность этих астероидов, по нашему мнению, в основном объясняется сублимацией замерзших летучих соединений (преимущественно водяного льда). Вероятно, основным фактором, вызывающим сублимационную активность этих тел, являются колебания подсолнечной температуры, достигающие десятков, а иногда и сотен градусов, связанные с изменениями гелиоцентрического расстояния по причине значительной эллиптичности орбиты [1, 2].

Нам, вероятно, также удалось обнаружить влияние солнечной активности на размеры (или плотность) сублимационной комы активных астероидов. Величина максимумов у 0.5-0.6 мкм на спектрах отражения 145 Адеоны, 704 Интерамнии и 779 Нины была наибольшей в сентябре 2012 г. (рис. 2).

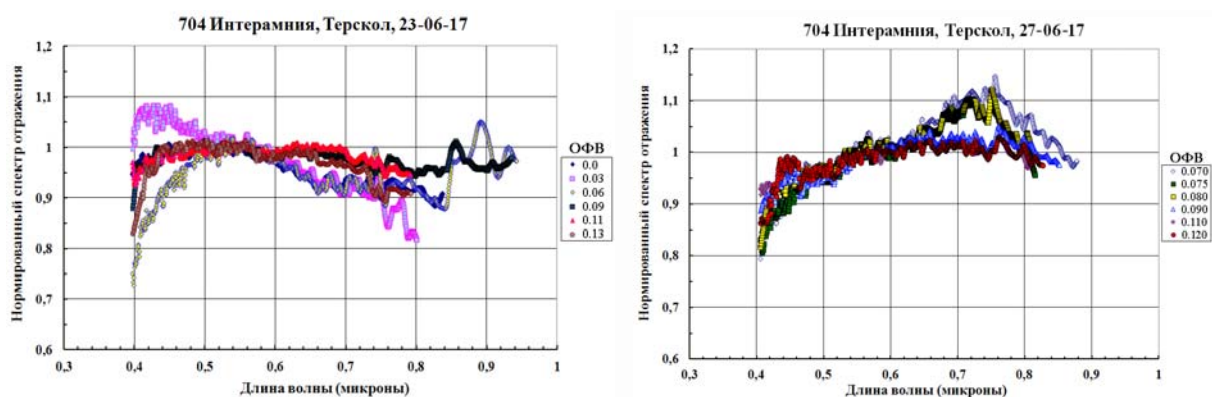


Рис. 3 (а, б). Нормированные спектры отражения (на 0,55 мкм) 704 Интерамнии при очень близких значениях ОФВ за 4 месяца до прохождения перигелия. (а) 23 июня 2017 г.: средний градиент спектров отражения – отрицательный; (б) 27 июня 2017 г.: средний градиент спектров отражения – положительный.

В то же время спектры отражения этих астероидов, полученные при их следующем прохождении перигелия в 2016-2017 гг. (при пониженной солнечной активности), при быстрой переменности самих спектров таких максимумов в чаще всего не содержали [3]. В качестве примера на рисунке 3 (а, б) показаны спектры отражения 704 Интерамнии, полученные при совпадающих относительных фазах вращения (ОФВ) за 4 месяца до прохождения астероидом перигелия.

Весьма вероятно, что бóльшая интенсивность потоков заряженных частиц солнечного ветра (главным образом протонов) с повышением солнечной активности вызывает рост плотности газо-пылевой комы. Это может происходить вследствие разрыхления и/или распыления льда и, соответственно, – увеличении площади сублимирующей поверхности. Очевидно, что при освобождении большего объема пылевого материала повышается также уровень рассеиваемого в коме отраженного от поверхности астероида света. Другим (или дополнительным) механизмом увеличения протяженности комы активного астероида при более высокой солнечной активности могут быть более сильные электростатические эффекты, заставляющие частицы левитировать на большей высоте. Но при очень слабом гравитационном поле астероида такие частицы должны его быстро покидать.

Таким образом, активность астероидов примитивных типов имеет комплексный и многоплановый характер. Наряду с сублимацией летучих соединений и выбросом пыли, на это явление, вероятно, влияет солнечная активность с широким спектром радиационных, ионизационных, электростатических и электромагнитных эффектов, которые нуждаются в специальных исследованиях.

Литература

1. Busarev V. V., Barabanov S. I., Rusakov V. S., Puzin V. B., Kravtsov V. V. Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples // *Icarus*. V. 262. 2015. P. 44-57.
2. Бусарев В. В., Барабанов С. И., Пузин В. Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов (145) Адеоны, (704) Интерамнии, (779) Нины и (1474) Бейры // *Астрон. вест.* Т. 50. С. 300-312. 2016.
3. Бусарев В. В. и др. Подтверждения наличия сублимационного процесса у примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и его вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы // *Астрон. вестн.* 2018 (в печати).
4. Bus S., Binzel R.P. 145 Adeona CCD Spectrum // EAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 145_01_TAB. NASA Planetary Data System. 2003a.
5. Bus S., Binzel R.P. 704 Interamnia CCD Spectrum // EAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 704_01_TAB. NASA Planetary Data System. 2003b.
6. Bus S., Binzel R.P. 779 Nina CCD Spectrum // EAR-A-I0028-4-SBN0001/SMASSII-V1.0: 779_01_TAB. NASA Planetary Data System. 2003c.
7. Harris A. W., Warner B. D., Pravec P. Asteroid Lightcurve Derived Data V13.0. EAR-A-5-DDR-DERIVED-LIGHTCURVE-V13.0. NASA Planetary Data System. 2012.

АСИММЕТРИЯ В ПОЯВЛЕНИИ И РАЗВИТИИ НОВОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Григорьев В.М., Ермакова Л.В.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

lermak@iszf.irk.ru

ASYMMETRY OF MAGNETIC FIELD DURING THE APPEARANCE OF ACTIVE REGIONS

Grigor'ev V.M., Ermakova L.V.

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

We present preliminary results of studying the magnetic flux asymmetry at early phase of appearance of active regions. Mainly, magnetic field of following polarity emerges in the photosphere first.

Активные области преимущественно являются биполярными. Магнитное поле их генерируется механизмом солнечного динамо в тонком слое тахоклина в основании конвективной зоны. Биполярность активной области появляется, когда вершина поднимающейся Ω -образной трубки магнитного потока пересекает фотосферу. Наблюдаемое распределение концентраций магнитного поля говорит о том, что трубка всплывает не как твердая система, а как когерентная магнитная структура от хорошо организованного тороидального магнитного потока в солнечных недрах.

Активные области при своем появлении и развитии показывают ряд асимметрий, касающихся лидирующей и последующей полярностей. Ось, связывающая противоположные полярности, направлена почти в восточно-западном направлении, но лидирующая часть наклонена к экватору. Это хорошо известные законы Хейла и Джоя. Магнитное поле лидирующей полярности стремится концентрироваться в компактную область и в дальнейшем формироваться в большое солнечное пятно, тогда как поле последующей полярности остается более фрагментарным. Лидирующая полярность [1] вводит в 3-10 раз больше спирального потока, чем последующая. Это может означать, что лидирующая часть имеет большую скрученность еще до всплытия или есть разница в скорости всплытия оснований.

Мы рассматриваем асимметрию, связанную со временем появления магнитных потоков лидирующей и последующей полярностей на самой ранней стадии развития активной области ещё до образования пор. Наблюдательных данных об асимметрии появления магнитного поля биполярных областей очень мало и они противоречивы. Первое упоминание об этом сделано в работе [2], где показано, что последующая часть флоккула развивается прежде лидирующей. В то же время формирование первых пятен происходит преимущественно в лидирующей полярности [3]. В работе [4] была

впервые обнаружена структура поперечного магнитного поля, вытянутого в направлении, связывающем холмы продольного поля, где позже сформировались пятна. Развитие активной области происходило от последующей части к лидирующей. Природа асимметрии появления и развития магнитных потоков лидирующей и последующей полярности еще не ясна, хотя имеются модели, удовлетворительно описывающие некоторые детали процесса [5-7]. Изучение времени формирования пятен и особенностей появления и развития полярностей является критически важным для выбора модели всплытия магнитного поля.

Целью нашей работы является систематизация наблюдательных признаков в появлении магнитного поля активной области, в частности, исследование асимметрии нового магнитного поля на самой ранней стадии его появления. Ниже показаны яркие примеры асимметрии в появлении магнитного поля активных областей – Рис. 1, 2, а также Таблица 1. В таблице отобраны активные области, которые формировались в относительно спокойных областях Солнца в отсутствие заметной магнитной активности. На Рис. 1 видно, что скорость роста потока лидирующей полярности первоначально была намного ниже по сравнению с последующей и только спустя два часа сравнялась с ней. Отметим, что в период 18 – 20 UT в этой активной области существовала асимметрия доплеровских скоростей, знак которой соответствует направлению движения вещества из ведущего конца всплывающей трубки магнитного поля к последующему [8].

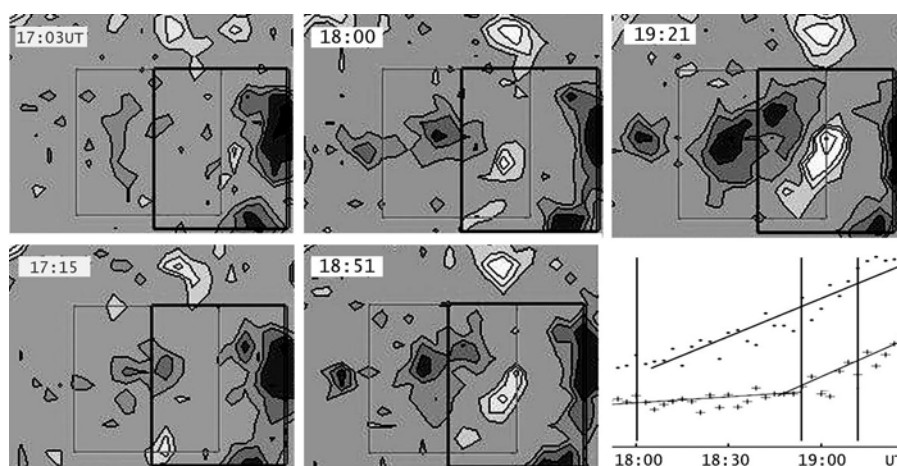


Рис. 1. Магнитограммы SOHO/MDI для активной области NOAA 8782. Серый прямоугольный контур ограничивает область, для которой вычислялся поток последующей полярности, чёрный – лидирующей. В правом нижнем углу – график изменения магнитных потоков, лидирующая полярность – крестики, последующая – точки.

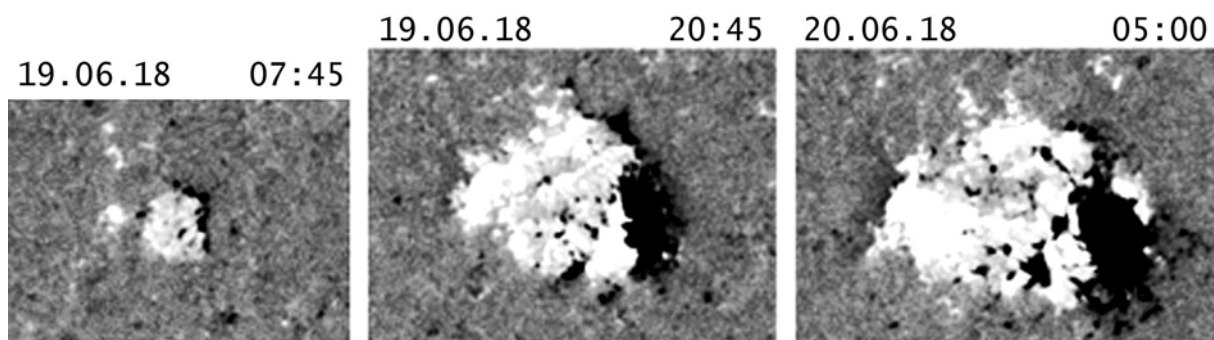


Рис. 2. Магнитограммы SDO/HMI для активной области NOAA 12715. Координаты на первый момент времени – N08E40.

Таблица 1. Список активных областей: время появления нового магнитного поля (f – последующая полярность, l – лидирующая), первых пор и разность между ними ΔT .

Акт. обл. NOAA	Дата регистр. акт. обл.	Появление пор	Появление магн. поля	Полярность	ΔT
10132	2002.09.23	09.21/17:36	09.21/14:27	f	03:09
10559	2004.02.15	02.13/17:36	02.13/06:23	f	11:33
10601	2004.09.07	09.06/11:27	09.06/03:15	l	08:12
10770	2005.05.30	05.29/06:24	05.28/11:11	f	28:47
10939	2007.01.21	01.20/01:17	01.20/01:25	f и l	
10964	2007.07.13	07.12/14:24	07.12/09:24	f	05:00
11416	2012.02.09	02.08/13:34	02.08/08:00	f	13:34
11158	2011.02.12	02.10/21:20	02.10/00:40	f	20:40
11157	2011.02.09	02.08/01:30	02.07/00:04	f	22:34
11156	2011.02.09	02.08/03:50	02.07/17:50	f	24:00
11167	2011.03.04	03.02/18:20	03.02/02:10	f	16:10
11130	2010.11.29	11.27/15:10	11.27/06:28	f	8:42
11066	2010.05.03	05.02/22:44	05.01/12:06	f	34:38
11072	2010.05.21	05.20/15:44	05.19/03:17	f	36:27
11132	2010.12.04	12.03/21:54	12.03/17:40	f	04:14
11148	2011.01.17	01.16/19:10	01.16/13:22	f и l	
11241	2011.06.24	06.22/08:10	06.22/08:10	f и l	
11240	2011.06.22	06.20/13:14	06.20/08:00	f	05:14
11242	2011.06.29	06.27/22:10	06.27/19:40	f	02:30
11294	2011.09.13	09.10/12:50	09.09/22:10	f	14:40
11311	2011.10.05	10.03/14:24	10.03/12:55	f	01:29
11321	2011.10.16	10.15/17:24	10.15/01:12	f	16:12
11327	2011.10.21	10.19/02:14	10.18/21:24	f и l	
11167	2011.03.03	03.02/11:20	03.02/00:00	f и l	11:20
11214	2011.05.14	05.13/15:30	05.13/13:40	f	01:50
11416	2012.02.08	02.08/16:24	02.08/04:45	f	09:19
11645	2013.01.04	01.02/19:45	01.02/12:45	f	07:00

Среднее $\Delta T=13.3$ час.

Результаты показывают, что преимущественно первым появляется магнитное поле последующей полярности. В среднем появление нового поля на полсуток предшествует формированию пор и мелких пятен. В модели [7]

рассмотрена комбинация направленного вверх потока, переносящего магнитное поле в форме тора через конвективную зону к фотосфере, и потока вдоль системы магнитного поля, направленного от лидирующей части к последующей. Получено согласие с основными закономерностями образования активных областей и пятен, в частности, с тем, что развитие магнитного поля активной области начинается с последующей полярности. Наши результаты, с учётом результатов [8], согласуются с этой моделью.

Мы благодарны командам SOHO и SDO за возможность доступа к базам данных по сети Интернет. Мы благодарим Козловскую В.В. за техническую помощь при выполнении работы. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Литература

1. Tian L., Alexander D. Asymmetry of Helicity Injection Flux in Emerging Active Regions // *Astrophys. J.* V. 695. P. 1012-1023. 2009.
2. Bumba V., Howard R. A Study of the Development of Active Regions on the Sun // *Astrophys. J.* V.141. P. 1492-1501. 1965.
3. McIntosh P. S. The birth and evolution of sunspots – Observations. // *The physics of sunspots. Proceedings of the Conference. Sacramento Peak Observatory.* P. 7-63. 1981.
4. Bappu M. K.V., Grigorjev V. M., Stepanov V. E. On the Development of Magnetic Fields in Active Regions // *Solar Phys.* V. 4. P. 409-421. 1968.
5. Fan Y., Fisher G.H., DeLuca E.E. The origin of morphological asymmetries in bipolar active regions // *Astrophys. J.* V. 405. P. 390-401. 1993.
6. Fan Y. The three-dimensional evolution of buoyant magnetic flux tubes in a model solar convective envelope // *Astrophys. J.* V. 676. P. 680-697. 2008.
7. Rempel M., Cheung M.C.M. Numerical Simulations of Active Region Scale Flux Emergence: From Spot Formation to Decay // *Astrophys. J.* V.785. P. 90-109. 2014.
8. Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Динамика лучевых скоростей в фотосфере при возникновении активных областей // *Астрон. Журн.* Т. 88. № 2. С.184-195. 2011.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА ОТСУТСТВОВАЛА В ПЕРИОД МАУНДЕРОВСКОГО МИНИМУМА?

Гуляев Р.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

rgulyaev@izmiran.ru

WHETHER OR NOT THE SOLAR CORONA WAS ABSENT DURING THE MAUNDER MINIMUM?

Gulyaev R.A.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

According to John Eddy, the solar corona was probably absent during the Maunder minimum. Already at the present time there occur very long periods without sunspot similar to Maunder pattern. But modern observations of total solar eclipses always show quite usual solar corona in spite of absence of spots in the Sun.

В 1976 г. Джон Эдди (Высокогорная обсерватория в Боулдере, США), изучив отчеты о наблюдениях солнечных затмений, содержащиеся в старых журналах и архивах обсерваторий, обнаружил, что в период Маундеровского минимума (1645–1715 гг.) солнечная корона выглядела совсем не так, как в наши дни. Луну окружало узкое тусклое кольцо красноватого цвета. На этом основании Эдди высказал предположение, что, вероятно, во время Маундеровского минимума настоящая солнечная корона полностью отсутствовала, а тусклое кольцо относилось к внутренним слоям *F*-короны, т.е. к свечению межпланетной пыли [1, 2].

Попробуем сопоставить картину, описанную Эдди, с результатами позднейших наблюдений короны, проведенных в условиях, до некоторой степени сходных с условиями в минимуме Маундера. Внешним атрибутом Маундеровского минимума было отсутствие пятен на Солнце. Но уже после окончания Маундеровского минимума существовали весьма длительные периоды полного отсутствия солнечных пятен. Обратимся к статистическим данным SILSO Бельгийской королевской обсерватории в Брюсселе [3]. Согласно этим данным, с 1849 г. до наших дней было 29 непрерывных «беспятенных» периодов длительностью 30 и более дней. Самый длительный период – 92 дня – наблюдался с 8 апреля по 8 июля 1913 г. Всего же в том году было 311 дней без пятен.

Сейчас нас интересуют те длительные беспятенные периоды, во время которых произошли полные солнечные затмения. Выявлено 5 таких периодов, перечисленных в Таблице 1.

Таблица 1. Полные солнечные затмения в годы с наибольшим числом беспятенных дней.

Год	Общее число дней без пятен на Солнце	Дата затмения	Ссылка
1878	279	29 июля	Ганский [4]
1901	287	18 мая	Young [5]
1954	240	30 июня	Всехсвятский и Никольский [6]
2008	265	1 августа	Гуляев [7]
2009	262	22 июля	Pasachoff et al. [8]

Рассмотрим подробнее перечисленные в таблице случаи.

29 июля 1878 г. В этом году было 3 длительных беспятенных промежутка с суммарной продолжительностью 129 дней. В один из таких промежутков попадает затмение Солнца. Всего же в этом году было 279 дней без пятен.

18 мая 1901 г. Затмение пришлось на конец 69-дневного непрерывного интервала без пятен. Всего в течение года без пятен было 287 дней.

30 июня 1954 г. Суммарное за год количество дней без пятен – 240. Непосредственно перед затмением пятен не было 28 дней подряд.

1 августа 2008 г. 2008 год – четвертый по числу беспятенных дней после 1913, 1901 и 1878 гг. Всего было 265 дней без пятен. Пятна полностью отсутствовали 12 дней подряд до затмения и 20 дней после затмения.

22 июля 2009 г. Без пятен было 262 дня. Пятен не было 12 дней подряд до затмения, а через 9 дней начался длительный (32 дня) непрерывный беспятенный период.

Ниже приведены снимки короны, полученные во время двух из перечисленных затмений. На всех снимках видим изображения «полноценной» короны, характерные для эпохи минимума солнечной активности. Ни разу не наблюдалась корона, хотя бы отдалённо напоминающая картину, описанную Дж.Эдди. Таким образом, констатируем, что описания «маундеровской» короны, данные в статьях [1, 2], не подтверждаются современными наблюдениями.

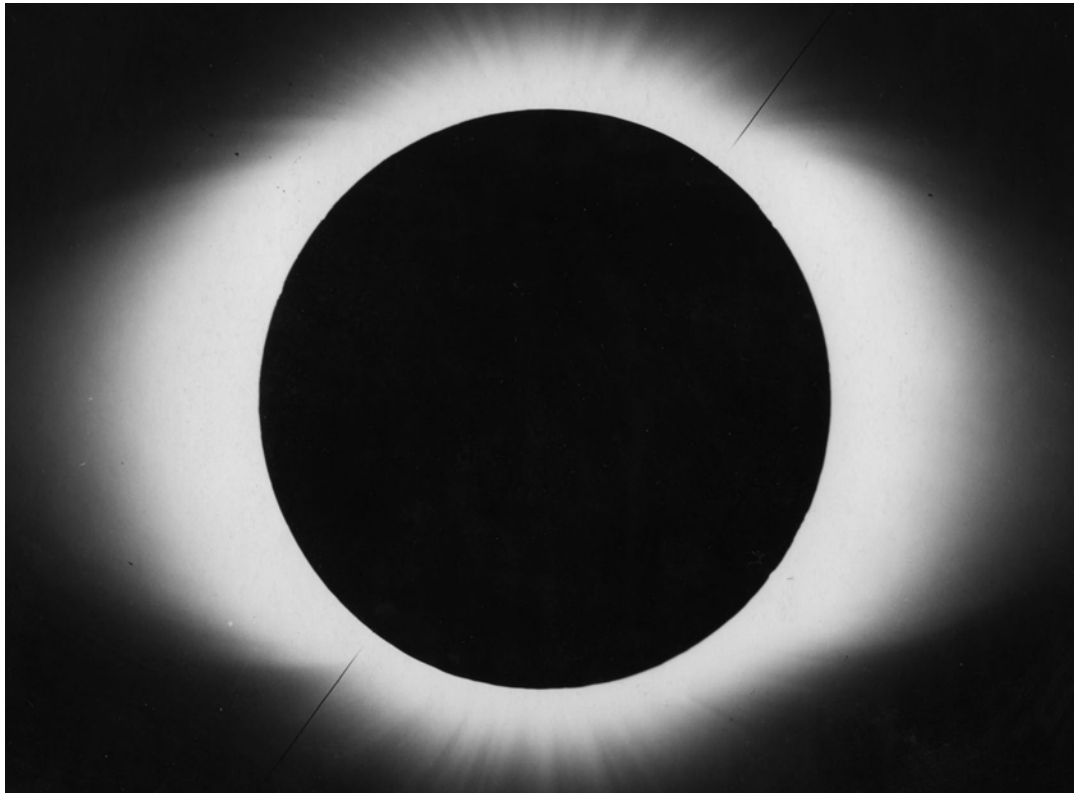


Рис. 1. Солнечная корона 30 июня 1954 г. Фото экспедиции Киевского университета [6].

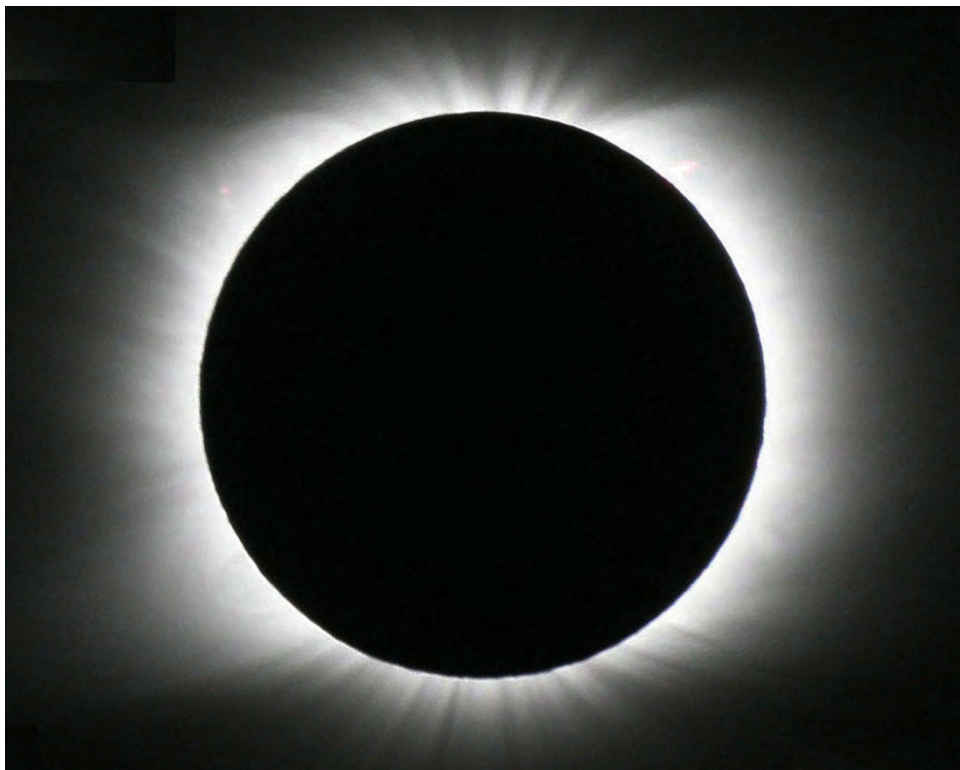


Рис.2. Солнечная корона 1 августа 2008 г. Фото автора [7].

Литература

1. Eddy J.A. The Maunder Minimum // *Science*. V.192. P. 1189-1202. 1976.
2. Eddy J.A. The case of the missing sunspots // *Scientific American*. V. 236. No. 5. P. 80-88, 92. 1977.
3. Sunspot Index and Long-term Solar Observations. URL: <http://sidc.oma.be/silso/datafiles>.
4. Hansky A. Die totale Sonnenfinsternis am 8. August 1896. Über die Corona und den Zusammenhang zwischen ihrer Gestaltung und anderen Erscheinungsformen der Sonnentätigkeit // *Изв. Императ. Акад. наук*. Т. 6. С. 251-270. 1897.
5. Joung R.K. Polarization of the light of the solar corona // *Lick Observ. Bull.* V. 6. No. 205. P. 166-181. 1911.
6. Всехсвятский С.К., Никольский Г.М. Структура солнечной короны 30 июня 1954 года // *Астрон. журн.* Т. 32. № 4. С. 354–358. 1955.
7. Гуляев Р.А. Наблюдения солнечных затмений в ИЗМИРАНе. // URL: <http://www.izmiran.ru/projects/eclipses/>
8. Pasachoff J.M., Rušin V., Saniga M., Druckmüllerova H., Babcock B.A. Structure and dynamics of the 2009 July 22 eclipse white-light corona // *Astrophys. J.* V. 742:29. P. 1-13. 2011.

ВОЗРАСТАНИЕ МОЩНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ К МИНИМУМУ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: РЕАКЦИЯ ИОНОСФЕРЫ

Гуляев Р.А., Гуляева Т.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

rgulyaev@izmiran.ru

GROWING POWER OF CENTRAL CORONAL HOLE TOWARDS THE SOLAR MINIMUM: THE IONOSPHERE RESPONSE

Gulyaev R.A., Gulyaeva T.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

We present results of analysis of the Coronal Hole's Pch index developed with SOHO EIT 284 Å observations by Luo et al. [1]. The long-term trend of growing Pch towards the minimum of the solar cycle is observed from 03.2011 to 06.2018 as opposite to the trend of decreasing solar activity with the H line emission Lyman-α and the ionospheric global noon total electron TECgn index. The increase of Pch index is suggested to serve by precursor of geo-storm as testified by delayed response of the solar wind, interplanetary magnetic field, magnetosphere and ionosphere for St Patric's day storm 17 March, 2015.

Основным источником формирования F -области ионосферы служит излучение Солнца в УФ части спектра (в диапазоне от 5 до 400 нм) и рентгеновской области спектра (0.1 – 0.8 нм). Краткосрочные колебания параметров ионосферы определяются интегральным воздействием солнечных, межпланетных и геомагнитных индексов. Среди них важным источником возмущений являются корональные дыры (СН), наблюдаемые в УФ и мягком рентгене на солнечном диске как участки с пониженной яркостью и температурой по сравнению с фоном. Открытые силовые линии магнитного поля в корональных дырах генерируют высокоскоростные потоки солнечного ветра.

В данной работе проанализирован индекс мощности корональной дыры Pch в окрестности видимого центра диска Солнца в границах $[10^\circ\text{E}, 10^\circ\text{W}]$, $[30^\circ\text{N}, 30^\circ\text{S}]$, используемый для прогноза скорости солнечного ветра (V_{sw}) с заблаговременностью в 3 дня [1]. На рис. 1 показаны изображения диска Солнца в моменты усиления мощности корональной дыры 12 и 15 марта 2015 г. перед самой мощной космической бурей в день Святого Патрика (St Patrick's day, 17.03.2015) [2]. Выделена площадь на сфере, используемая для оценки Pch индекса.

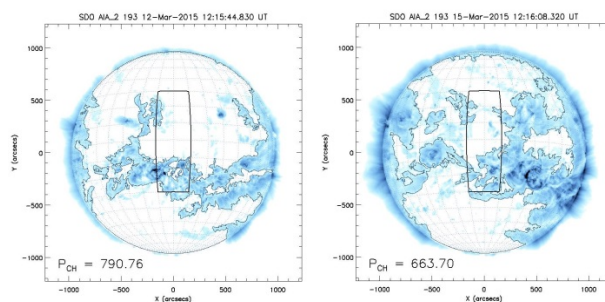


Рис. 1. Примеры изображения Солнца по измерениям *SDO/AIA* (в линии $Fe\ XII\ 193\ \text{\AA}$) с указанием очертания КД для оценки индекса *Pch* 12 и 15 марта 2015 г.

В [3] показано, что интенсивность корональных дыр возрастает к минимуму 24-го цикла (SC24) солнечной активности, в отличие от других индексов солнечной и ионосферной активности, убывающих от максимума к минимуму солнечного цикла. Это иллюстрируется на рис. 2, где приведены суточные и месячные индексы с июня 2015 г. по декабрь 2017 г.: (1) глобальный полуденный индекс *TECgn* полного электронного содержания в ионосфере (верхняя кривая), (2) эмиссия в линии водорода Лyman- α на волне 121.6 нм (средняя кривая), (3) *Pch*- индекс корональной дыры (нижняя кривая).

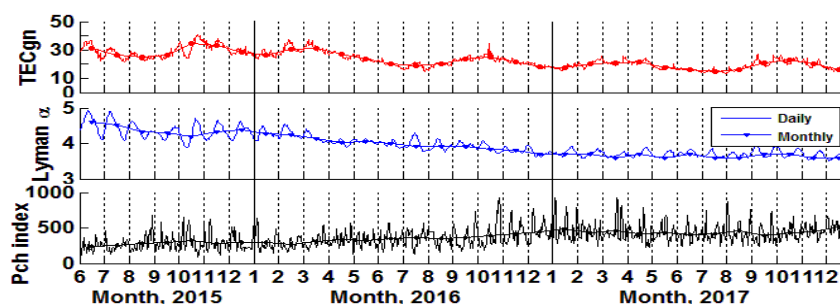


Рис. 2. Изменения ионосферных и солнечных параметров на спаде SC24: (1) ионосферный *TECgn* индекс; (2) излучение водорода в линии $L\alpha$, (3) *Pch*- индекс.

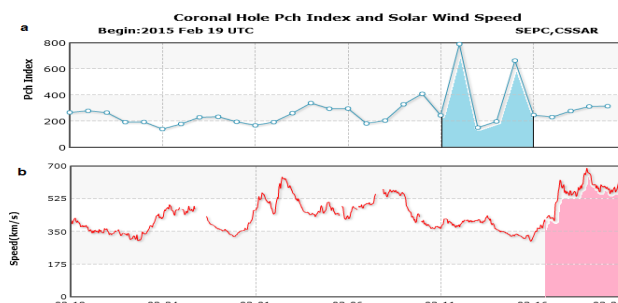


Рис. 3. (а) Двухфазный рост ежедневного индекса *Pch* 12 и 15 марта 2015 г. (см. карты на Рис. 1) как признак начала бури на Солнце; (б) прогноз ускорения солнечного ветра перед бурей 17 марта 2015 г. в день Святого Патрика.

Индекс Pch ежедневно оценивается по изображению Солнца SDO/AIA (в линии $Fe\ XII\ 193\text{\AA}$) для прогноза скорости солнечного ветра V_{sw} в Центре космической погоды (<http://eng.sepc.ac.cn/CHI.php>). Пример соответствующего прогноза ускорения солнечного ветра на основе всплесков индекса Pch показан на рис. 3 для интенсивной бури в день Святого Патрика 17 марта 2015 г.

Более подробно вариации параметров на Солнце, в межпланетном магнитном поле ММП, солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере с 11 по 20 марта 2015 г. накануне, во время и после бури в день Святого Патрика приведены на рис. 4. На фоне постепенного уменьшения солнечной активности на спаде 24-го солнечного цикла в линии $Lyman\ \alpha$ (рис.4i), наблюдаются два пика мощности корональной дыры Pch 12 и 15 марта (рис.4e), сопровождающиеся последующим повышением плотности Np (рис.4d) и температуры Tr (рис.4c) плазмы, напряженности B ММП (рис.4a) и скорости солнечного ветра V_{sw} (рис.4e) с запаздыванием на 4 - 5 дней, а также появлением устойчивой отрицательной компоненты Bz ММП 17 марта (рис.4b).

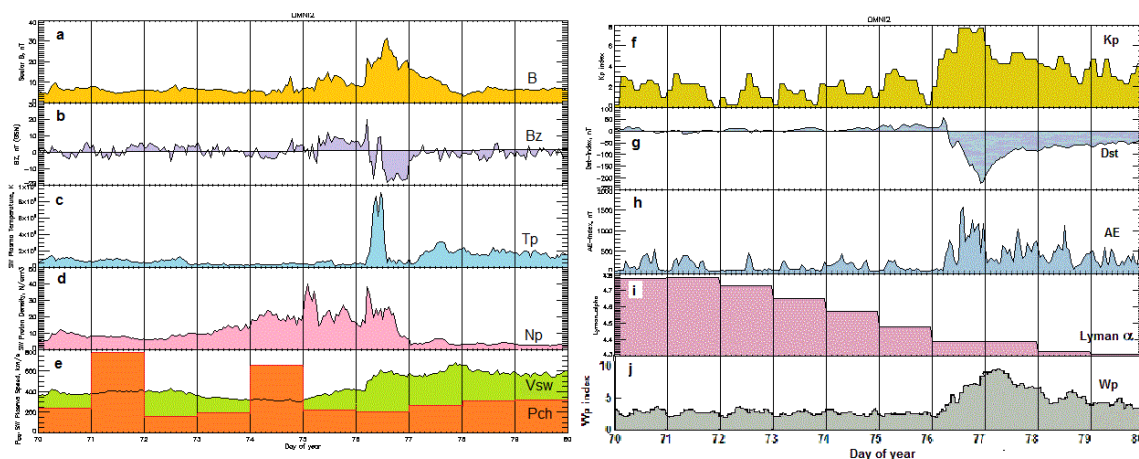


Рис. 4. Изменения параметров космической погоды с 11 по 20 марта 2015 г., включая бурю в день Святого Патрика 17.03.2015 г. (a) Напряженность B ММП; (b) Bz - компонента ММП; (c) Температура плазмы Tr ; (d) Плотность плазмы Np ; (e) Индекс мощности корональной дыры Pch , и скорость солнечного ветра V_{sw} ; (f) геомагнитный индекс Kp ; (g) экваториальный Dst индекс; (h) индекс авроральной электроструи AE ; (i) эмиссия в линии водорода $Lyman\ \alpha$; (j) планетарный индекс ионосферной погоды Wp на основе глобальных карт GIM-TEC [4].

Геомагнитная буря проявилась последовательно в геомагнитных индексах с запаздыванием на 5 - 6 дней после первого всплеска Pch 12 марта (Рис.4e). Наблюдается усиление авроральной электроструи до $AE = 1570\text{ нТ}$ (Рис.4h) 17 марта в 14:00 UT. Максимум Kp -индекса на средних широтах также наблюдается 17 марта в 12 – 17 UT ($Kp = 7.7$, Рис.4f). Развитие бури кольцевого тока в экваториальном поясе достигло минимума $Dst = -228\text{ нТ}$ 18 марта в 00:00 UT (Рис.4g). Отметим последовательное развитие геомагнитной бури от высоких широт к средним и экваториальным широтам, ти-

пичное для околоземной плазмы [5]. Пик ионосферной глобальной бури отмечен в планетарном индексе $Wp = 9.5$ i.u. (index units) 18 марта в 08:00 UT с запаздыванием по отношению к пику геомагнитных индексов от 8 до 18 часов (Рис.4 j).

Таким образом, кратковременные изменения Pch -индекса корональных дыр указывают на возможность его использования с заблаговременностью от 3 до 5 дней в качестве предвестника бурь космической погоды, ожидаемых в солнечном ветре, межпланетном магнитном поле ММП, магнитосфере и ионосфере Земли. Более детальный статистический анализ индекса Pch по отношению к геомагнитным и ионосферным возмущениям позволит оценить его геоэффективность для прогноза геомагнитных и ионосферных бурь.

Авторы благодарят Центр SERC (Пекин) за индекс Pch , предоставленный в <http://eng.sepc.ac.cn/CHI.php>. Данные OMNI предоставлены Центром SPDF, GSFC, NASA, https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html. Глобальные ионосферные карты GIM-TEC предоставлены Лабораторией JPL в ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/iono_daily/. Ионосферный Wp -индекс предоставлен ИЗМИРАН в <http://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/>.

Литература

1. Luo B., Zhong Q., Liu S., Gong J. A new forecasting index for solar wind velocity based on EIT 284 Å observations. // Solar Phys. V. 250, P. 159-170, <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9198-4>. 2008.
2. Wu C-C, Liou K., Lepping R.P., Huttling L., Plunkett S., Howard R.A., Socker D. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick’s day event (17 March 2015)”. // Earth, Planets, Space, V.68, 151-162, doi://10.1186/s40623-016-0525-y.
3. Gulyaeva T.L., Gulyaev R.A. Coherent changes of solar and ionospheric activity during long-lived coronal mega-hole from Carrington rotation CR2165 to CR2188. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 179, 165-173, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.007>. 2018.
4. Gulyaeva T.L., Stanislawska I. Derivation of a planetary ionospheric storm index. // Annales Geophysicae, V.26, N.9, P. 2645-2648, www.ann-geophys.net/26/2645/2008/, 2008.
5. Loewe C.A., Prölss G.W. (1997) Classification and mean behavior of magnetic storms. // J. Geophys. Res. Space Phys., 102, A7, 14,209-14,213.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОТОКОВ ЮПИТЕРИАНСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ МЭВ-НЫХ ЭНЕРГИЙ И ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ

Дайбог Е.И., Логачев Ю.И.
НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TIME PROFILES OF THE FLUXES OF JOVIAN ELECTRONS OF MeV ENERGIES AND GALACTIC PROTONS

Daibog E.I., Logachev Yu.I.
SINP MSU, Moscow, Russia

In the extremely quiet CA minimum of 2007-2008, the observed fluxes of Jovian electrons of MeV energies and galactic protons underwent 27-day variations associated with the rotation of the Sun. At the beginning of the observation period, the fluxes of electrons and protons were correlated, then their profiles began to "diverse" and, after the optimal magnetic connection of the Earth with Jupiter, an anticorrelation was observed, which was maintained for 7 rotations of the Sun until the end of the period of registration of J-electrons. The explanation of this effect is found when taking into account the time evolution of the structure of the solar wind velocities and associated magnetic traps, and also, mainly, the influence of the mutual arrangement in the interplanetary space of the Earth and Jupiter.

В минимуме солнечной активности 2007-2008 гг. имело место экстремально длительное стабильное состояние структур скоростей солнечного ветра (SW), сохранявшееся более года в течение 14 оборотов Солнца. По данным высокоширотного нейтронного монитора (НМ, Апатиты), регистрировавшего галактические протоны с энергией >500 МэВ, и интегрального канала $E_p > 50$ МэВ прибора EPHIN, SOHO изучались 27-дневные вариации потоков галактических протонов, которые хорошо совпадали между собой. Периоды их 27-дневных вариаций оказались совпадающими с периодами долгоживущих структур солнечного ветра, 27.1 суток.

Этот период совпал со временем, когда наблюдались также периодические возрастания потоков юпитерианских электронов ($J_e > 1$ MeV). И галактические протоны, и Ю-электроны испытывали квази-27-дневные вариации, связанные с вращением Солнца. При этом наблюдался неожиданный эффект: в начале цикла этих вариаций потоки Ю-электронов и галактических протонов коррелировали, затем на каждом обороте Солнца происходил небольшой сдвиг фазы корреляции, так что к середине цикла (к 7 обороту Солнца после начала периода появления Ю-электронов) наблюдалась уже полная антикорреляция потоков Ю-электронов и галактических протонов (рис.1). В течение всего этого времени вариации потока галактических протонов высокой и низкой энергии ($J_p > 50$ и > 500 МэВ) антикоррелировали с вариациями скоростей солнечного ветра.

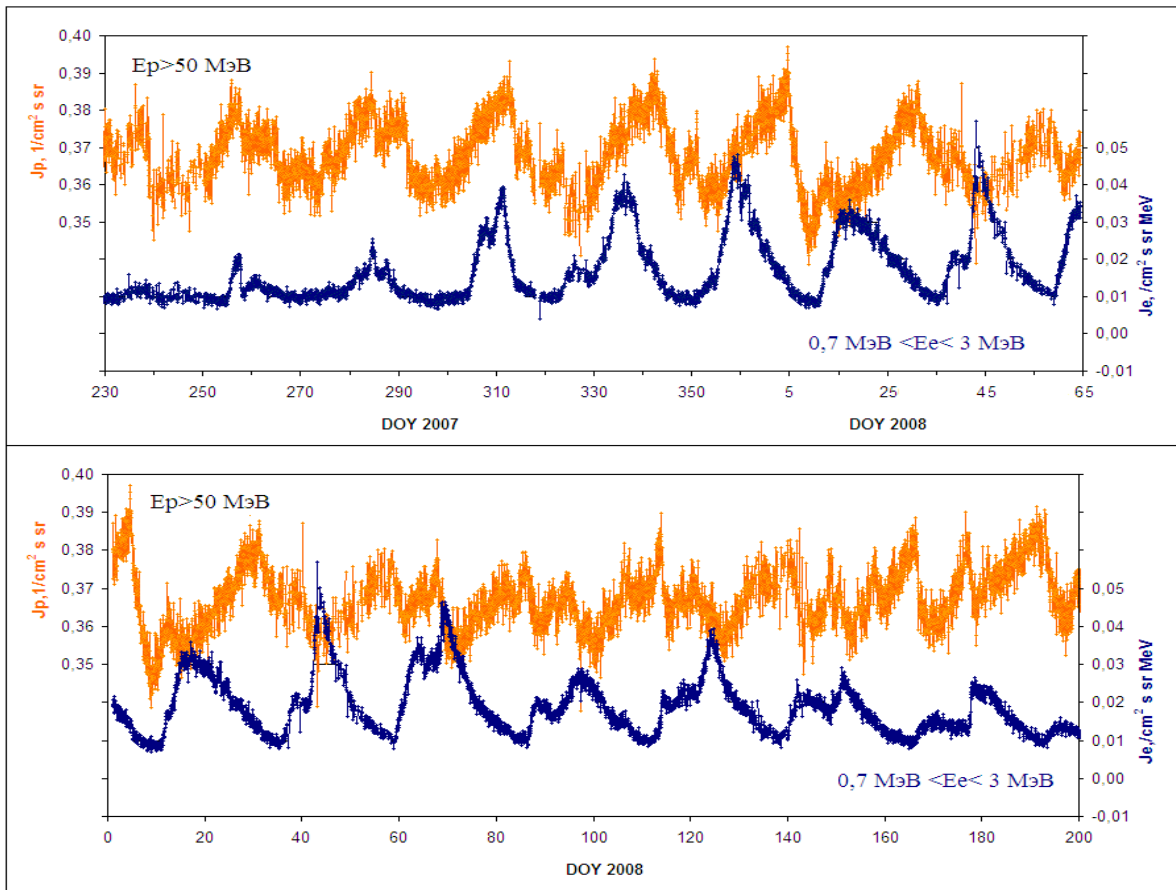


Рис. 1. Верхняя панель – потоки ГКЛ и Ю-электронов до оптимальной связи Земли с Юпитером 15 февраля 2008 года ($V_{sw} = 450$ км/с). Нижняя панель – после оптимальной связи Земли с Юпитером. Реальная скорость солнечного ветра изменялась от 300 до 600 км/с, и принятое положение оптимальной магнитной силовой линии является приближенным.

Такое различие в поведении потоков Ю-электронов и галактических протонов говорит о различной природе наблюдаемых 27-дневных вариаций. Если для галактических протонов объяснение состоит в модуляции потоков заряженных частиц межпланетным магнитным полем, связанным с периодическими вариациями потоков солнечного ветра (см. [1, 2] и ссылки там), то для вариаций потоков Ю-электронов дополнительно нужно учитывать взаимное расположение источника электронов (магнитосфера Юпитера) и процесс распространения электронов в пространстве Юпитер-Земля [3-6].

Объяснение наблюдаемого эффекта найдено в предположении существования магнитной ловушки, заполняющейся электронами при прохождении её мимо Юпитера, и последующей регистрации электронов околоземным космическим аппаратом (рис. 2). Одновременность заполнения ловушки Ю-электронами и их регистрации до оптимальной связи Земли с Юпитером и более поздняя их регистрация (только при подходе ловушки с Ю-электронами к Земле) после оптимальной связи позволила объяснить как разницу в периодах вариаций на первых оборотах Солнца [6], так и разницу

в поведении 27-дневной вариации между галактическими протонами и юпитерианскими электронами.

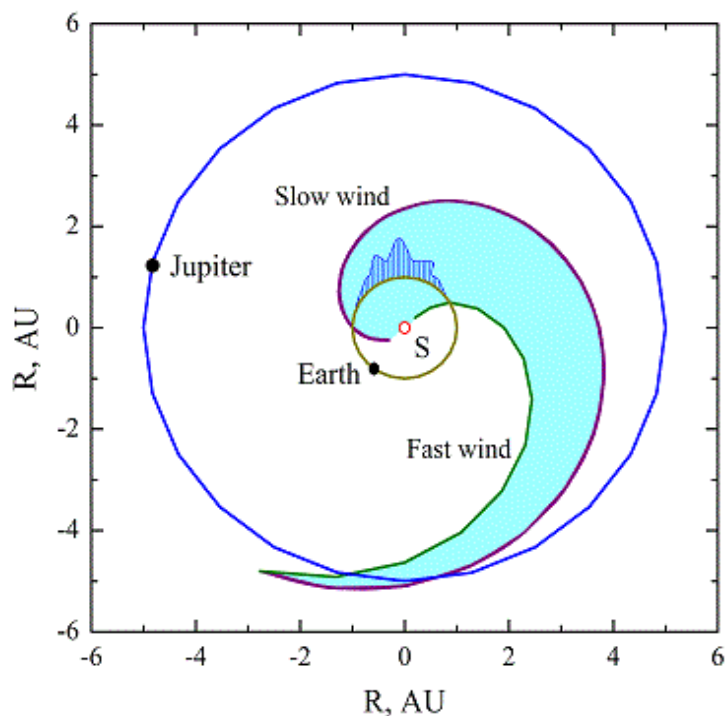


Рис. 2. Модельное представления структуры магнитной ловушки, образованной раз- носкоростными потоками солнечного ветра

Литература

1. Richardson, I. G., Wibberenz, G. and Cane, H. V.: 1996, 'The Relationship Between Recurring Cosmic Ray Depressions and Corotating Solar Wind Streams at ≤ 1 AU: IMP 8 and Helios 1 and 2 Anticoincidence Guard Rate Observations, *J. Geophys. Res.* 101, 13 483.
2. Richardson, I. G., 2018, 'Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere', *Living Rev. Sol. Phys.* (2018) 15:1 <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>.
3. Daibog E., Kecskemety K., Lazutin L., Logachev Yu., *Journal of Physics: Conference Series* **675**, DOI: [10.1088/1742-6596/675/3/032024](https://doi.org/10.1088/1742-6596/675/3/032024) (2016).
4. Дайбог Е. И., Кечкемети К., Лазутин Л. Л., Логачев Ю. И., *Известия РАН. Серия физическая* 81, 155 (2017). *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 81, 136 (2017).
5. Daibog E. I., Kecskemety K., and Logachev Yu. I., *Jovian Electrons and the Solar Wind during the Minimum of the 23rd–24th Solar Activity Cycle Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2013, Vol. 77, No. 5, pp. 554–556. [Изв 2012].
6. Daibog E. I., Kecskemety K., Lazutin L. L., Logachev Yu. I., and Surova G. M. A 27-Day Period in the Flux of Jovian Electrons at the Earth's Orbit *Astronomy Reports*, 2017, Vol. 61, No. 12, pp. 1073–1081.

О НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ. СОПОСТАВЛЕНИЕ МАГНИТОГРАММ РАЗЛИЧНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

Демидов М.Л.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

demid@iszf.irk.ru

ON UNCERTAINTY OF INITIAL DATA IN THE PROBLEM OF COSMIC WEATHER FORECAST. COMPARISON OF MAGNETOGRAMS FROM DIFFERENT OBSERVATORIES

Demidov M.L.

ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

An important criterion of the scientific experiment is its re-production at different facilities and (or) by different groups of researchers. With reference to the experimental solar physics, this low can be attributed to the comparison of observations of magnetic fields at different observatories. This problem - the cross-calibration of magnetograms obtained with different instruments - has become particularly important recently in the framework of space weather problems, since it turned out that the results of calculations of the geo-effective parameters of the interplanetary space depend to a large extent on the fact, data of which observatories are used in modeling. The present work is devoted to a discussion of this problem using the example of comparison of the full-disk solar magnetograms from several observatories.

Всестороннему мониторингу Солнца, как составной части космической погоды, в развитых странах мира уделяется значительное внимание. Важным элементом такого солнечного мониторинга (получившего в СССР название «служба Солнца») является регистрация напряженностей магнитного поля по всему диску Солнца (полно-дисковые магнитограммы). Такие магнитограммы являются исходным материалом для расчетов синоптических карт [1] (распределений магнитного поля по всей поверхности Солнца для того или иного кэррингтоновского оборота), которые, в свою очередь, в рамках тех или иных модельных предположений, используются для расчетов параметров магнитного поля в короне и в межпланетной среде, включая орбиту Земли [2,3].

При этом оказалось, что результаты расчетов параметров межпланетной среды на орбите Земли (напряженность и ориентация магнитного поля, скорость и плотность солнечного ветра, и т.д.) могут значительно отличаться в зависимости от того, какие данные о солнечных магнитных полях используются. Это поставило вопрос о надежности измерений солнечных магнитограмм, о поиске причин (инструментальных, методических, физических) таких расхождений [4,5].

Одним из возможных решений проблемы того, данные какой обсерватории являются предпочтительней (более надежными), могло бы быть сопоставление модельных расчетов параметров гелиосферы на земной орбите с

экспериментально наблюдаемыми. Такие попытки, действительно, многократно предпринимались [2,3], и, в некоторых случаях, позволили отбраковать те или иные наблюдения. Но в общем случае, однако, такой подход оказался не очень утешительным - «истинных» измерений магнитограмм, абсолютно точно воспроизводящих экспериментальные космические данные, установить не удалось.

Поэтому дальнейший анализ данных наблюдений различных инструментов, поиск причин, приводящих к различию измеренных напряженностей, является по-прежнему актуальной задачей.

Поскольку исходным материалом для задач прогноза параметров межпланетной среды являются полно-дисковые магнитограммы, то именно их анализ представляется актуальным (поиск причин различий в зависимости от инструмента, пространственного разрешения, используемой спектральной линии, методических аспектов).

В настоящее время в мире насчитывается несколько независимых источников полно-дисковых магнитограмм. Основные сведения о некоторых из них представлены в Таблице. Важным отличием является не отраженный в таблице (но, по мнению автора, являющийся принципиально важным) используемый способ контроля нулевого уровня. Ввиду того, что полномасштабный анализ одновременных магнитограмм всех имеющихся баз данных и их представление в данном докладе является чрезмерно емкой задачей, выходящей за рамки целей данного доклада, ограничусь основными выводами, которые удалось достичь в результате недавних исследований, выполненных с использованием наблюдений на телескопах СТОП ССО, SDO/HMI, SMAT HSOS.

Сопоставление квази-одновременных магнитограмм СТОП ССО и SDO/HMI (приведенных посредством соответствующего пространственного усреднения к разрешению СТОП) показывает весьма хорошее соответствие (коэффициент корреляции не бывает ниже 0.80) при значительном систематическом различии (коэффициент регрессии порядка 2), что вполне объяснимо использованием различных спектральных линий. В то же время анализ данных SMAT HSOS показал, что они отягощены существенными проблемами, и, как результат, значительно отличаются как от данных СТОП ССО, так и от SDO/HMI.

Очевидное возможное предположение, что это может быть обусловлено использованием в HSOS спектральной линии, отличной от СТОП и SDO/HMI, не находит экспериментального подтверждения. А именно, на Рис. 1 показаны результаты сопоставления магнитограмм, выполненных на СТОП ССО в широко используемой в практике магнитографических измерений линии FeI 525.02 нм и в «китайской» линии FeI 532.4 нм. Видно, что при очевидном значительном систематическом различии (коэффициент регрессии 2.02), коэффициент корреляции весьма высок (0.89). Следует отметить, что аналогичный результат получается и при использовании наблюдений на СТОП и в другие дни.

Таблица. Основные сведения о некоторых инструментах, на которых производятся измерения полно-дисковых солнечных магнитограмм

Обсерватория	Спектральный прибор	Рабочая линия	Угловое разрешение (секунды дуги)	Размерность (пикселей на диск)
WSO	Спектрограф Литтрова	FeI 525.02	90×180	21×11
SOLIS	Спектрограф Литтрова	FeI 630.15, FeI 630.25	1×1	2K×2K
GONG	Интерферометр	NiI 676.8	8×8	256×256
SOHO/MDI	Интерферометр	NiI 676.8	2×2	1024×1024
SDO/HMI	Интерферометр	FeI 617.3	0.5×0.5	4K×4K
SMAT HSOS	Перестраиваемый ИПФ	FeI 532.4	2×2	992×1004
СТОП ССО	Спектрограф Литтрова	FeI 525.02	91×91	21×21

После многочисленных наблюдательных экспериментов удалось выяснить [5], что основным источником проблем SMAT HSOS является отсутствие надлежащего контроля за положением нулевого уровня (появление ложного сигнала, с магнитным полем никак не связанного) со сложной пространственной структурой.

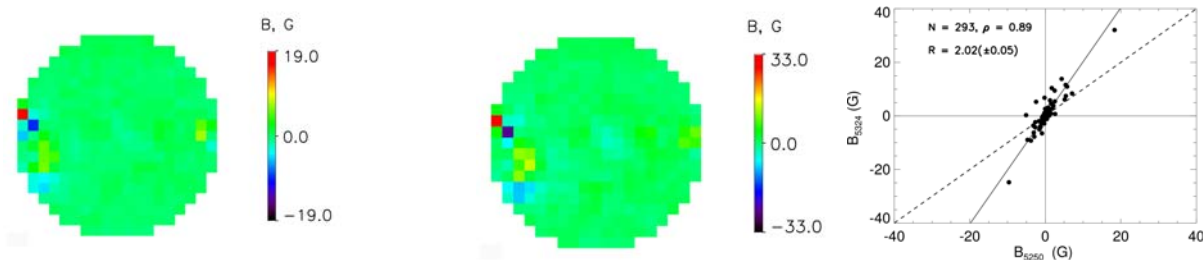


Рис. 1. Сопоставление квази-одновременных наблюдений крупномасштабных магнитных полей Солнца на телескопе СТОП Саянской солнечной обсерватории в линии FeI 525.02 нм (левая панель) и в линии FeI 532.42 нм (центральная панель), используемой на телескопе SMAT Солнечной наблюдательной станции Хуайроу (Китай). Правая панель показывает результат корреляционного и регрессионного анализа данных магнитограмм. Пунктирная линия соответствует случаю, когда коэффициент регрессии $R = 1.0$

Этот результат в очередной раз продемонстрировал актуальность проблемы надежного детектирования положения нулевого уровня (которое может варьировать в зависимости от положения на диске Солнца) при наблюдениях магнитограмм. У автора есть веские доводы предполагать, что и данные GONG, широко используемые в задачах прогноза космической погоды, далеко не свободны от проблем нулевого уровня. Детальный анализ данного

вопроса находится в стадии исследования и составит предмет отдельной работы автора.

Работа выполнена частично благодаря поддержке кооперативного российско-китайского проекта (грант РФФИ 17-52-53203 ГФЕН-а) и Госзадания, проект No. 007-00163-18-00 от 12.01.2018.

Литература

1. Riley, P., Ben-Nun, M., Linker, J. A., Mikic, Z., Svalgaard, L., Harvey, J., Bertello, L., Hoeksema, T., Liu, Y., Ulrich, R. A Multi-Observatory Inter-Comparison of Line-of-Sight Synoptic Solar Magnetograms // *Solar Phys.* V. 289. P. 769-792. 2013.
2. Hayashi, K., Yang, S.B., Deng, Y.Y.: 2016, Comparison of Potential Fields Solutions for Carrington Rotation 2144. *J. Geophys. Res. Space Phys.* V.121,P. 1046-1062. 2016.
3. Virtanen L., Mursula K. Photospheric and coronal magnetic fields in six magnetographs. II. Harmonic scaling of field intensities. *Astron.Astroph.* V.604. A7. 2017
4. Демидов М.Л. О возможностях и проблемах наблюдений магнитных полей Солнца для прогноза космической погоды // *Солнечно-земная физика.* Т. 3. № 1. С. 22-33.
5. Demidov M.L., Wang X.F., Wang D.G., Deng Y.Y. On the Measurements of Full-Disk Longitudinal Magnetograms at Huairou Solar Observing Station // *Solar Phys.* 2018. Accepted.

ВЫБОР ИНДЕКСА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ИОНОСФЕРЫ

Демин М.Г., Демин Г.Ф.
ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
deminov@izmiran.ru

CHOICE OF THE SOLAR ACTIVITY INDEX FOR THE LONG-TERM IONOSPHERIC PREDICTION

Deminov M.G., Deminova G.F.
IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

Based on the comparison of 12-month running mean solar activity indices with the ionospheric index of this activity for 1954-2014, estimates of the relative accuracy of the solar indices for the long-term ionospheric prediction are given. It is found that the solar radio flux at 10.7 cm is more accurate than the previous and new versions of the international sunspot number.

Долгосрочный прогноз ионосферы основан на прогнозе индексов солнечной активности. Для этой цели можно использовать скользящие средние за 12 месяцев индексы этой активности: поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см F_{12} , международные числа солнечных пятен Rz_{12} (прежняя версия) или R_{12} (новая версия). Целью данной работы был анализ солнечных индексов F_{12} , Rz_{12} и R_{12} с целью выбора оптимального из них как индикатора солнечной активности для медианы критической частоты $F2$ -слоя $foF2$. Для этого солнечные индексы сопоставлены с ионосферным индексом солнечной активности IG_{12} . Ионосферный индекс IG_{12} получен на основе анализа и усреднения данных медиан $foF2$ ряда ионосферных станций в полдень как замена индекса Rz_{12} в уравнении

$$foF2 = a + bRz_{12}, \quad (1)$$

где коэффициенты a и b известны и вычисляются с помощью ITU-R карт для этих станций [1]. Ионосферный индекс основан на данных измерений $foF2$, поэтому он точнее солнечных индексов для медианы $foF2$ [1]. Это позволяет использовать индекс IG_{12} для выбора наиболее адекватного из солнечных индексов в долгосрочном прогнозе $foF2$. Результаты решения этой задачи без учета новых солнечных индексов были получены недавно [2].

Ниже представлены результаты выбора солнечного индекса для медианы $foF2$ на основе более полного анализа. Этот анализ основан на сопоставлении солнечных и ионосферных индексов в интервале 1948–2014 гг., поскольку регулярные измерения F_{12} начались с 1948 г., а поддержка индекса Rz_{12} была прекращена в конце 2014 г.

На основе анализа данных за 1948-1979 годы были получены уравнения регрессии

$$Ri_{12} = 0.708 R_{12} - 0.3, \quad (2)$$

$$Rf_{12} = 33.52 (85.17 + F_{12})^{1/2} - 408.99 - 15 \exp(-0.1(F_{12} - 65)), \quad (3)$$

где Ri_{12} и Rf_{12} – индексы R_{12} и F_{12} в единицах измерения (в шкале Rz_{12}). Отметим, что в интервале 1948-1979 гг. индексы Ri_{12} и Rz_{12} практически совпадают: $|dR| < 0.5$, где $dR = Ri_{12} - Rz_{12}$. Индексы Rz_{12} , Ri_{12} , Rf_{12} и IG_{12} удобны для анализа, поскольку приведены к одной и той же шкале.

Результаты анализа для последних солнечных циклов показаны в таблице.

Таблица. Средние квадратичные отклонения σ солнечных индексов Rz_{12} , Ri_{12} , и Rf_{12} от ионосферного индекса IG_{12} для 19–23-го солнечных циклов и неполного 24-го цикла

Солнечные циклы	$\sigma(Rz_{12}, IG_{12})$	$\sigma(Ri_{12}, IG_{12})$	$\sigma(Rf_{12}, IG_{12})$
19 (04.1954–10.1964)	5.0	5.0	5.2
20 (10.1964–06.1976)	7.4	7.4	4.7
21 (06.1976–09.1986)	7.0	6.9	5.1
22 (09.1986–05.1996)	7.1	6.2	5.7
23 (05.1996–12.2008)	15.0	10.9	8.7
24 (12.2008–11.2014)	12.3	11.4	7.8

Из данных таблицы видно, что в целом индекс Ri_{12} точнее индекса Rz_{12} , индекс Rf_{12} точнее индексов Ri_{12} и Rz_{12} . Эта тенденция наиболее отчетлива в последние солнечные циклы, 23 и 24. Она, по-видимому, связана уменьшением магнитного поля Солнца и, как следствие, уменьшением высоты циклов 23 и 24, когда это уменьшение для числа солнечных пятен более значительно, чем для потока солнечного радиоизлучения (см., например, [3]).

Итак, поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см может быть рекомендован в качестве индикатора солнечной активности для медианы $foF2$, поскольку он точнее прежней и новой версий международного числа солнечных пятен.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 17-05-00427) и Программы № 28 Президиума РАН.

Литература

1. Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved $foF2$ predictions using the CCIR atlas // Telecommun. J. V. 50. N 8. P. 408–414. 1983.
2. Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // Космические исследования. Т. 54. № 1. С. 3–9. 2016.
3. Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н. Свойства солнечной активности и ионосферы для солнечного цикла 25 // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 56. № 6. 2016.

СВОЙСТВА ИОНОСФЕРЫ НА ФАЗАХ СПАДА И В МИНИМУМАХ ПОСЛЕДНИХ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н.

*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
deminov@izmiran.ru*

PROPERTIES OF THE IONOSPHERE AT THE FALL AND MINIMUM PHASES OF THE LATEST SOLAR CYCLES

Deminov M.G., Nepomnyashchaya E.V., Obridko V.N.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The properties of the ionosphere in solar cycles 23 and 24 were studied on the basis of the comparison of the solar activity indices ($F_{10.7}$ and Ri) with the ionospheric index of this activity T . It was found that in cycle 24 the hysteresis effect was observed in the dependence of T on Ri . This effect was absent in the dependence of T on $F_{10.7}$.

Магнитное поле Солнца считают основной причиной изменчивости солнечной активности, включая изменения этой активности с солнечным циклом [1]. Это поле отчетливо уменьшалось в течение последних солнечных циклов. С уменьшением магнитного поля Солнца связывают уменьшение амплитуды солнечных циклов [1], и такое уменьшение амплитуды было более значительным для относительного числа солнечных пятен Ri (новая версия), чем для потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см $F_{10.7}$. Это позволило утверждать, что Солнце переходит в новый режим низкой активности [2]. Можно предположить, что новый режим солнечной активности проявляется не только в изменении амплитуды циклов, но и в характере изменений индексов солнечной активности (Ri и $F_{10.7}$) и ионосферных индексов этой активности T в течение солнечного цикла. Решение этой задачи и было целью данной работы.

Индекс T определяется по данным ряда ионосферных станций (медианам критической частоты $F2$ -слоя $foF2$) как замена прежней версии относительного числа солнечных пятен Rz в уравнении регрессии

$$foF2 = a + b Rz,$$

где a и b – известные коэффициенты этого уравнения [3]. Для медиан $foF2$ индекс T точнее солнечных индексов Ri и $F_{10.7}$. Поэтому сопоставление индекса T с солнечными индексами позволяет судить о степени соответствия солнечных индексов ионосферным данным. Единицы измерения (шкалы) индексов T и Rz совпадают. Поэтому индексы $F_{10.7}$ и Ri также целесообразно привести к шкале Rz с помощью соответствующих уравнений регрессии. Обозначим через Rf и Rr индексы $F_{10.7}$ и Ri , приведенные к шкале Rz . Для анализа использованы сглаженные (с 24-месячным гауссовским фильтром)

индексы Rf_{24} , Rr_{24} и T_{24} , поскольку они передают общую форму солнечных циклов [1].

На рис. 1 показан один из результатов решения поставленной задачи.

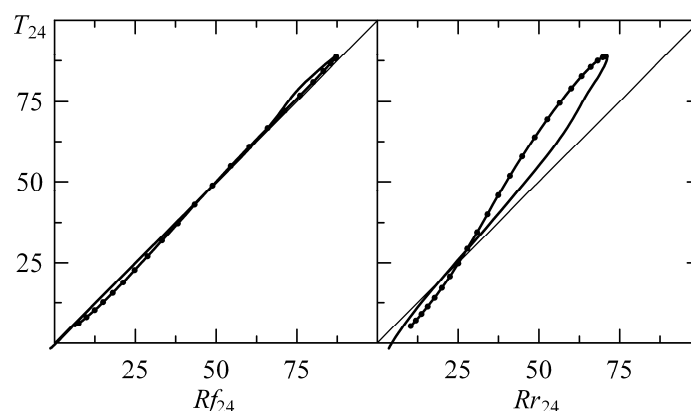


Рис. 1. Зависимости ионосферного индекса T_{24} от индексов солнечной активности Rf_{24} и Rr_{24} в солнечном цикле 24. Точками выделена фаза спада этого цикла.

Видно, что индекс T_{24} почти совпадает с Rf_{24} в течение всего цикла 24, т.е. зависимость $foF2$ от потока солнечного радиоизлучения оставалась стабильной и не отличилась от этой зависимости для контрольного интервала 1949-1978 гг. Зависимость T_{24} от Rr_{24} в солнечном цикле 24 отличалась от контрольного интервала. Кроме того, наблюдался отчетливый эффект гистерезиса, когда на фазе роста и спада цикла фиксированному значению Rr_{24} соответствуют различающиеся значения T_{24} . Эффект гистерезиса между разными парами индексов солнечной активности отмечался неоднократно [4]. Особенность цикла 24 заключалась в том, что этот эффект наблюдался при низкой солнечной активности. Итак, новый режим низкой солнечной активности проявляется не только в амплитуде солнечного цикла, но и в особенностях его формы, включая фазу спада цикла.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 17-02-00300, 17-05-00427) и Программы 28 Президиума РАН.

Литература

1. Hathaway D.H. The Solar Cycle. Living Rev. //Solar Phys. 12 (4), doi: 10.1007/lrsp-2015-4. 2015.
2. Svalgaard L., Hansen W.W. Solar activity – past, present, future // J. Space Weather Space Clim. V. 3, A24, doi: 10.1051/swsc/2013046. 2013.
3. Caruana J. The IPS monthly T index / Solar-Terrestrial Prediction: Proc. Workshop at Leura, Australia (October 16–20, 1989). V.2. P. 257–263. 1990.
4. Bruevich E.A., Kazachevskaya T.V., Katyushina V.V., Nusinov A.A., Yakunina G.V. Hysteresis of indices of solar and ionospheric activity during 11-year cycles // Geomagnetism and Aeronomy. V. 56. N 8. P. 1075–1081. 2016.

SPATIAL FEATURES OF GEOMAGNETIC STORMS MANIFESTATION ACCORDING TO IONOSPHERE OBSERVATIONS AT DIFFERENT LATITUDES

**Devi¹ M., Patgiri¹ S., Barbara¹ A.K., Gordiyenko² G.I., Depueva³ A.H.,
Depuev³ V.H.**

¹*Gauhati University, Guwahati, Assam, India*

²*Ionosphere Institute, Almaty, Kazakhstan*

³*IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

The paper presents a comparative analysis of the magnetic storm induced effects on the ionosphere for a few events of very strong and weak intensity by utilizing foF2 data collected at mid-latitude stations Moscow and Alma-Ata and TEC profiles of an equatorial ionosphere anomaly crest station Guwahati. In support to the observed variations, the role of storm induced electric field in development process of equatorial anomaly is brought in to ambit of discussion.

The response of the ionosphere to geomagnetic activity, commonly called ionospheric storms, is a relatively old topic in space physics. It is now well established through global studies that a storm may increase or decrease ionization density termed as positive and negative ionospheric effects, depending on latitude, onset time and the severity of the storm [1, 2]. However, many issues still require serious attention for framing of a reliable regional storm time ionospheric model and one such important aspect is to understand development/inhibition of equatorial anomaly through coupling dynamics between high latitudes and the anomaly region.

With the above basic aim, ionospheric parameters like foF2 received respectively from stations IZMIRAN (55.47° N, 37.30° E, $\Phi=+50.82^\circ$), Alma-Ata (43.25° N, 76.92° E, $\Phi=+33.42^\circ$) and Total Electron Content (TEC, the integral with height of the ionospheric electron density profile) data of equatorial anomaly crest station Guwahati (26.148° N, 91.73° E, $\Phi=+12.30^\circ$) during the two (very strong and moderate to weak) magnetic storm cases are analyzed. As an indicator of the intensity of the magnetic disturbance, the Dst index is used here, as is customary in majority of works on ionospheric storms.

The process of identifying storm induced effects in the ionosphere starts with the appropriate selection of the parameters (here foF2 and TEC data) and then to define their excursions from quiet day (Q-day) level. Next, variation feature of such parameters of any other day is compared with that of the Q-day excursion level and anomalous feature detected, if any, is then examined in association with magnetic storm. So, the main parameters for the analysis here are ΔfoF2 and ΔTEC calculated each hour of a day. This is the basic approach adopted for the cases studied here.

1. Magnetic storm of August, 2011

The August, 2011 storm started with an SSC ($Dst=20$ nT) and then developed immediately to a strong event with Dst value of -110 nT. The recovery was gradual and took almost five days to attain its normal value as displayed in Fig. 1 (bottom panel) along with diurnal ΔfoF_2 or ΔTEC profiles for the respective station, Fig. 1 (upper panels). Strong negative ionospheric effect in IZMIRAN is well developed from the time of the SSC and attains its maximum during the main phase

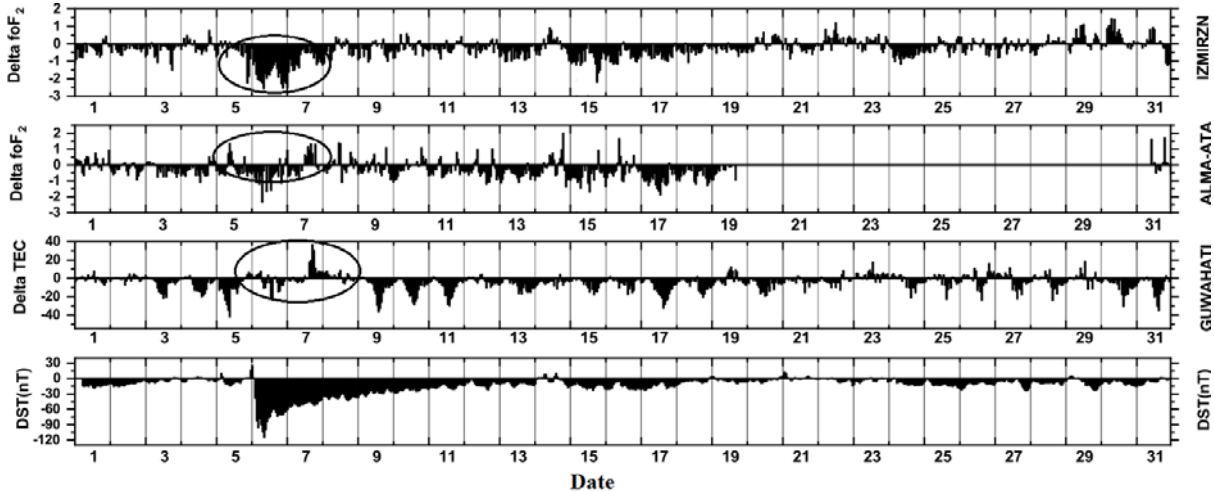


Fig. 1. Upper panels – ΔfoF_2 variation in IZMIRAN, Alma-Ata, and ΔTEC variation in Guwahati; bottom panel – Dst for August, 2011. Note strong negative storm effect in IZMIRAN with main phase of the storm of August 6; weak association in Alma-Ata and almost no relation in Guwahati.

of the storm on August 6, 2011. The synchronization of ΔfoF_2 variations with changes in Dst magnitude even for mild disturbed situations $Dst=-20$ nT, is another marked character to note along with the abnormal minimum level in nighttime density during the entire recovery phase. This dip in the residual density gradually disappears and comes to normal level in association with the Dst recovery pattern. In Alma-Ata a less intense main phase negative storm effect was observed preceded by a short increase in density with the onset of SSC. The positive density values seen along with recovery phase are then followed by weak negative effect showing a loose association with Dst till August 17, beyond which data are not available. Like in IZMIRAN, dip in residual density magnitudes exists in this station too.

A very weak negative feature in density during main phase and positive effect with the onset of recovery of the storm are observed in Guwahati TEC similar to those of Alma-Ata. Unlike in IZMIRAN and Alma-Ata, abnormal minimum in residual electron content was not observed here.

2. Magnetic storms of March, 2012

This month experiences a number of storms of March 7 ($Dst=-88$), 9 ($Dst=-145$), 11 ($Dst=-65$), 14 ($Dst=-88$) of different intensities (Fig. 2, bottom panel).

In this event too, IZMIRAN density shows strong negative ionospheric effect during the storm period, except for a short time increase in day time density magnitudes in synchronization with SSC. The responses of foF2 and hence of Δ foF2 towards weak magnetic storms of March 11, 14 and 27 are also seen as strong decrease in day time density and significant dip in the residual night time values, all following in steps with Dst variations.

The density profiles over Alma-Ata for different storm events of this month show enhancement in day time values during the main phase occurred in March 7

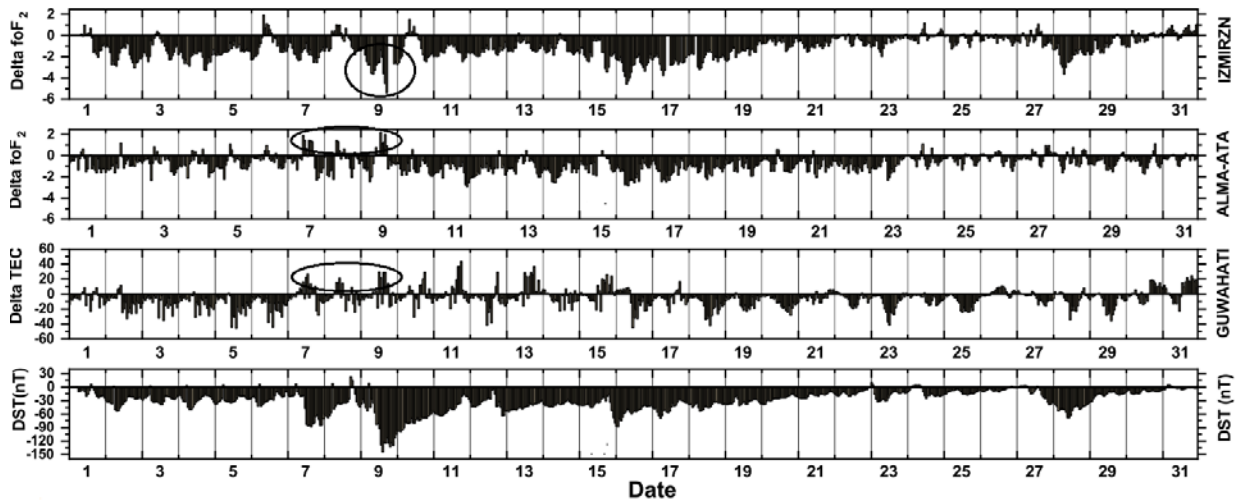


Fig. 2. Upper panels – Δ foF2 variation in IZMIRAN, Alma-Ata, and Δ TEC variation of Guwahati during main phase and recovery period of March, 2012 storms. Note strong synchronization in density modulation over IZMIRAN with Dst variations (bottom) and positive storm time Δ TEC.

and the other in March 9 but with mild negative effect during night hours accompanied by dip in the residual density. Interestingly, the responses of foF2 towards weak magnetic storms of March 11, 14 and 27 are seen as decrease in day time density as well as in the residual night time density values.

The modifications in foF2 and Δ foF2 features are in synchronization with the Dst, similar to that reflected in density modulation pattern over IZMIRAN.

TEC profiles of Guwahati also indicate presence of positive electron content values on 7th and 9th of March in association with Dst, similar to that observed in Alma-Ata. But unlike in Alma-Ata and IZMIRAN, the Δ TEC profiles reflect positive effect during the recovery phases of the storm as well as in the weak storms of March 11 and March 14. The significant differences between IZMIRAN, Alma-Ata and Guwahati observations are that while IZMIRAN foF2 shows strong negative effect during the main phases of the storm even for less intense magnetic storm events of 11, 14 and 27th March, in Alma-Ata the main phase effect is positive during day and negative during night and in Guwahati the positive/negative effects do not bear any significant relation with the Dst magnitudes.

One of the sources generally associated to such changes is the storm time electric field [3, 4, 5] which vary with storm magnitudes as well as occurrence time and season of the storm which: 1) carries plasma down from high latitude,

resulting to depletion in plasma density at higher latitude and positive/negative effect with different intensities at mid latitude and at low-latitude anomaly crest station; 2) pushing plasma up/down from the magnetic equator.

The authors M. Devi, A. K. Barbara, A. Depueva, V. Depuev acknowledge with thanks partial support through RFBR-DST Grant 17-55-45094 IND_a. The work of G. Gordiyenko has been supported by the No 0082/GF4 research grant.

References

1. Danilov A. D. Reaction of F region to geomagnetic disturbances (review) // *Heliogeophysical research (in Rus.)*. V. 5. P. 1–33. 2013. ISSN 2304-7380.
2. Fejer B.G., Gonzalez C.A., Farley D.T., Kelly M.C., Woodman R.F. Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 1. The effect of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 84. N 10. P. 5797–5802. 1979. doi: 10.1029/JA084iA10p05797.
3. Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* V. 44. 2006. RG4001, doi: 10.1029/2005RG000193.
4. Prölss G.W. Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 98. N 4. P. 5981–5991. 1993. doi: 10.1029/92JA02777.
5. Basu S., Basu Su., Rich F.J., Groves K.M., MacKenzie E., Coker C., Sahai Y., Fagundes P.R., Becker-Guedes F. Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 112. 2007. A08308. doi: 10.1029/2006JA012192.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ,
СОПРОВОЖДАЮЩИХ ЭРУПТИВНОЕ СОБЫТИЕ 7 ИЮНЯ 2011 Г., С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ БЕССИЛОВОЙ
ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ПОЛЯ**

**Егоров Я.И., Файнштейн В.Г., Мышьяков И.И., Анфиногентов С.А.,
Руденко Г.В.**

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия
egorov@iszf.irk.ru

**STUDYING MAGNETIC FIELD VARIATIONS THAT FOLLOWED 7 JUNE 2011
ERUPTIVE EVENT, USING NONLINEAR FORCE-FREE FIELD EXTRAPOLATION**

**Egorov Ya. I., Fainshtein V.G., Myshyakov I.I., Anfinogentov S.A.,
Rudenko G.V.**

ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

The paper deals with studying the features of magnetic field variations in the region of the 07.06.2011 eruptive event. This event includes a large filament eruption, a flare and formation of a coronal mass ejection (CME). The investigated parameters of magnetic field were obtained due to vector measurements of the photospheric magnetic field using SDO/HMI instrument and nonlinear force-free field extrapolation. These field characteristics include the absolute value of magnetic induction, electric current density, current and relative magnetic helicity, and free energy as well. Above some areas of the eruption region, and above the entire active region where the eruptive event took place, we studied spatial distributions of these parameters, and their time-dependences at different heights.

Эруптивное событие 07.06.2011 характеризуется интересными физическими процессами, вследствие чего оно стало объектом интенсивных исследований (см. [1,2] и цитируемую там литературу). В настоящей работе приводятся результаты исследования свойств и динамики магнитного поля в области данного события, опирающиеся на векторные измерения фотосферного поля инструментом SDO/HMI и расчеты поля в 3D пространстве в нелинейном бессиловом (NLFFF) приближении. Для восстановления магнитного поля в NLFFF приближении применялся метод, описанный в работе [3], который является реализацией оптимизационного метода, предложенного в [4]. При этом анализировались абсолютные значения магнитной индукции B и плотности электрического тока, J а также токовая спиральность, H_c относительная магнитная спиральность H_{mr} , и свободная энергия E_f .

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Показано, что сильные и относительно быстрые изменения характеристик фотосферного магнитного поля после начала вспышки наблюдаются лишь в небольшой части области эрупции, обозначенной на Рис. 1(а) номером 1. К таким характеристикам поля относятся B , модуль поперечной ком-

поненты поля B_t и угол наклона силовых линий поля к положительной нормали к поверхности Солнца α , а также вертикальные электрические токи J_z . Изменение со временем B , B_t и α в квадратах №(1 - 3) показаны на Рис. 1(b, c).

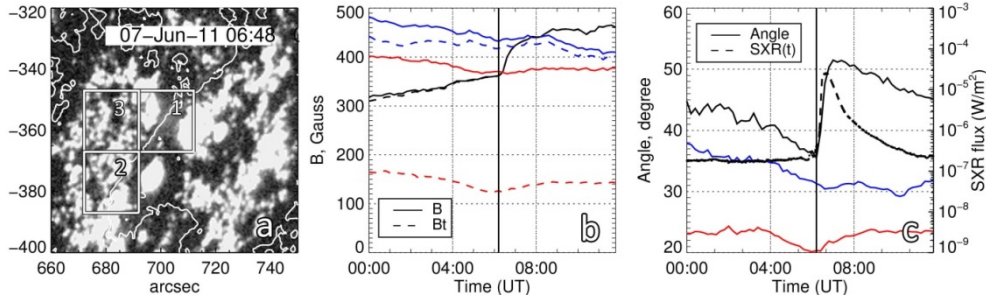


Рис. 1. а – распределение B в момент 07.06.11 (06:48) после начала вспышки. Белыми линиями показаны линии раздела полярности (ЛРП) поля; б – изменение со временем средних в пределах квадратов «1» - «3» B (сплошная линия) и B_t (пунктирная линия); с – изменение со временем угла α . Черными линиями показано изменение параметров поля в квадрате «1», синими линиями – в квадрате «2», красными линиями – в квадрате «3». Пунктиром на панели «d» показано изменение интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Толстой вертикальной линией отмечено начало вспышки.

2. Обнаружено, что до начала вспышки значения B , J , H_c и E_f , усредненные в пределах квадрата №1, возрастают с высотой над этим квадратом до высоты ≈ 15 Мм, а начиная с этой высоты, уменьшаются (для B , H_c и E_f см. Рис. 2). Мы рассчитывали полную токовую спиральность $H_c = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{J} dV$ в объеме V ($\mathbf{J} = (1/\mu) \text{rot } \mathbf{B}$) в прямоугольных боксах, опирающихся на каждый «квадрат» на Рис. 1(a). Токовая и магнитная спиральность – это топологическая мера структурной сложности выделенной области магнитного поля [5,6]. Свободная энергия находится из соотношения $E_f = \int (B_N^2/8\pi) dV - \int (B_P^2/8\pi) dV = E_N - E_P$, где E_N – энергия магнитного поля, полученного из расчетов поля в NLFFF приближении, E_P – в потенциальном приближении. Считается, что именно E_f является энергией, расходуемой во время эруптивных процессов. На этом рисунке также приведен график изменения относительной магнитной спиральности $H_{mr} = \int (A + A_p)(\mathbf{B} - \mathbf{B}_p) dV$ в боксе высотой 73 Мм, но опирающемся не на квадрат №1, а на прямоугольник, вытянувшийся вдоль ЛРП поля. Это связано с тем, что именно здесь расположен магнитный жгут (см. п.3) и можно ожидать максимальных значений H_{mr} . В выражении для H_{mr} , A , A_p – векторный потенциал поля, \mathbf{B} , \mathbf{B}_p – магнитная индукция. Индекс «р» означает получение параметра поля из расчетов в потенциальном приближении. Из Рис. 2 следует, что с момента времени $t_1 \approx 07.06.2011$ (00:00) и, в большей степени, с момента начала вспышки $t_f \approx 07.06.2011$ (06:16), области повышенных значений B , H_c и E_f со временем приближаются к фотосфере. Отметим, что на высотах, больших 5 Мм над фотосферой значения B , J , H_c , H_{mr} и E_f , усредненные в пределах квадрата №1 на Рис. 1, со временем возрастают на фоне колебаний до момента t_1 , в кото-

рый достигают абсолютного или локального максимума, а затем начинают уменьшаться. Особенно это удивительно для E_f , которая, согласно существующим представлениям, должна резко уменьшаться с начала вспышки.

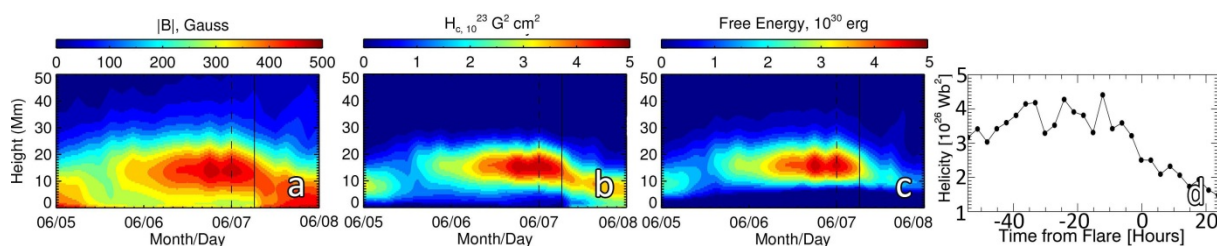


Рис. 2. Зависимость от времени (горизонтальная ось) и высоты (вертикальная ось) усредненных по площади квадрата №1 модуля магнитной индукции (a), токовой спиральности, рассчитанной в боксах высотой 1 Мм, расположенных один над другим (b) и свободной энергии (c). (d) – зависимость относительной магнитной спиральности в боксе с основанием, вытянутым вдоль основной ЛРП поля активной области и высотой 73 Мм.

3. Обнаружено, что в эруптивной области существует магнитный жгут, протянувшийся примерно вдоль основной ЛРП фотосферного поля в активной области (Рис. 3). Ось жгута до момента времени $t_1 \approx 07.06.2011$ (00:00) расположена на высоте ≈ 15 Мм. Этот жгут не является магнитной структурой волокна, потому что величина магнитного поля в нем более, чем в 10 раз больше измеряемых максимальных значений поля в волокнах активных областей и этот жгут не участвует в эрупции. Установлено, что ось жгута, как до начала вспышки, оказывается приблизительно на одной высоте с максимумами B , J , H_c и E_f над ЛРП фотосферного поля, а также над квадратом №1 при усреднении по его площади. Это означает, что область повышенных значений указанных характеристик поля над ЛРП, является отражением этих характеристик внутри жгута. Начиная с момента времени t_1 и, в большей степени, с момента t_f , жгут (т.е. области повышенных значений B , J , H_c и E_f) со временем приближается к фотосфере. Сделан вывод, что обнаруженные сильные вариации характеристик фотосферного магнитного поля в квадрате №1 связаны с быстрым приближением части жгута к этой области на фотосфере.

4. На основании анализа быстроты спада с высотой магнитного поля над эруптивным волокном высказано предположение, что причиной этой эрупции могла стать тороидальная неустойчивость волокна. Показано, что после начала вспышки увеличивается шир силовых линий поля, образующих аркаду над жгутом. И, наконец, отметим, что среднее в пределах длины жгута число оборотов силовых линий после начала вспышки уменьшается на 80%, что может быть причиной движения волокна после начала вспышки к фотосфере.

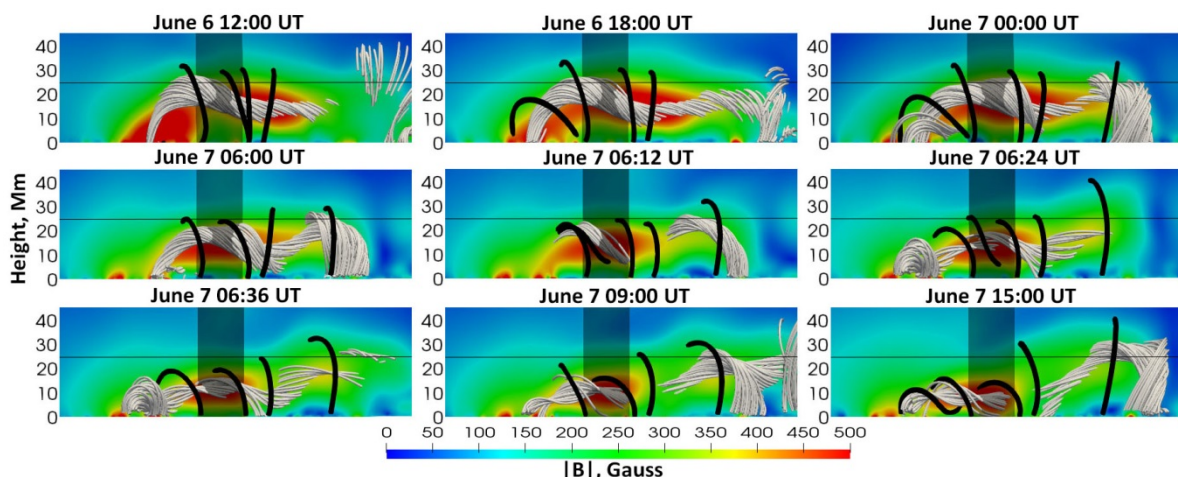


Рис. 3. Для моментов времени до и после начала вспышки показана совокупность силовых линий поля, окрашенных серым цветом, формирующих магнитный жгут. Черными линиями указаны отдельные линии поля, формирующие магнитную аркаду над жгутом. Темная вертикальная полоса проведена над участком ЛРП в «квадрате» «1». Разными цветами в вертикальной плоскости, приблизительно проходящей через ЛРП фотосферного магнитного поля, показано распределение модуля магнитной индукции.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Литература

1. van Driel-Gesztelyi L., Baker D., Török T. and 10 coauthor. Coronal Magnetic Reconnection Driven by CME Expansion the 2011 June 7 Event. // *ApJ.*, 788, 85, 12 pp. 2014.
2. Fainshtein V.G., Egorov Y.I., Rudenko G.V. Variations of the Photospheric Magnetic Field Following the Eruptive Event on June 7, 2011. // *Geomagn. Aeron.* V. 57. P. 906-915. 2017.
3. Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Analysis of Reconstruction Methods for Nonlinear Force-Free Fields. // *Solar Phys.* V. 257. P. 287-304. 2009.
4. Wheatland M.S. Are Electric Currents in Solar Active Regions Neutralized? // *Astrophys. J.* V. 532. P. 616-621. 2000.
5. Berger M.A., Field G.B. The topological properties of magnetic helicity. // *J. of Fluid Mechanics.* V. 147. P. 133-148. (1984).
6. Seehafer N. Electric current helicity in the solar atmosphere. // *Solar Phys.* V. 125. P. 219-232. 1990.

СРАВНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ, ИМЕЮЩИХ РАЗНУЮ СКОРОСТЬ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ КОРОНГРАФОВ LASCO

Загайнова Ю.С.¹, Файнштейн В.Г.², Мышьяков И.И.²

1- ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия.

2- ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, а/я-291, Россия.

E-mail: yuliazagaynova@mail.ru

COMPARE PECULIARITIES OF FORMING CORONAL MASS EJECTIONS WITH DIFFERENT VELOCITIES IN THE FOV OF LASCO CORONAGRAPHS

Zagaynova Yu.S.¹, Fainshtein V.G.², Myshyakov I.I.²

1- IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia.

2- ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

Peculiarities of CME generation with the lowest ($V \leq 600$ km/s) and highest ($V \geq 1500$ km/s) velocity in the FOV of LASCO coronagraphs. From the data of magnetic field vector measurements using SDO/HMI, we compared dynamics of the field parameters in shadow of active regions' spots, where CMEs with various velocities emerge. Using 3D calculations of a field in non-linear force-free (NLFFF) approximation, we estimated and compared spatial distributions of the field in the region where fast and slow CMEs occur.

Корональные выбросы массы (КВМ) характеризуются широким спектром максимальных скоростей V_{\max} по наблюдениям в поле зрения коронографов [1]. В то же время, до сих пор не получен ответ на вопрос: что определяет максимум скорости каждого КВМ? Sheeley et al. [2] пришли к выводу, что КВМ в зависимости от их максимальной скорости V_{\max} можно разделить на два класса: (1) постепенные КВМ с $V_{\max} = 400 \div 600$ км/с, связанные с эрупцией протуберанца и скорость которых увеличивается до максимального значения постепенно в поле зрения коронографа; (2) импульсные КВМ, связанные с солнечными вспышками, для которых $V_{\max} > 750$ км/с еще до выхода КВМ в поле зрения LASCO C2. Позже стало очевидно, что такое разделение на классы не является «абсолютным» (см. [3] и цитируемую там литературу): медленные КВМ могут оказаться импульсными и связанными со вспышками, быстрые могут оказаться постепенными и связанными с эрупцией волокна. Тоероек and Kliem [4] построили модель движения бессилового жгута в магнитном поле различной конфигурации и пришли к выводу, что, если поле быстро уменьшается с высотой, то формируется быстрый КВМ, если медленно, - медленный КВМ.

В настоящей работе обсуждаются особенности формирования быстрых и медленных КВМ. Условно к медленным КВМ мы отнесли КВМ с линейной проекционной скоростью $V_{\text{lin}} \leq 600$ км/с, к быстрым КВМ – $V_{\text{lin}} \geq 1500$ км/с. Исследовались шесть медленных и шесть быстрых КВМ типа гало с источниками в пределах 60° относительно центра солнечного диска. Форми-

рование КВМ анализировалось с использованием многоволновых данных с высоким временным и пространственным разрешением инструментов SDO/AIA. Вариации магнитного поля, сопровождающие эруптивные события, изучались по данным векторных измерений фотосферного магнитного поля инструментом SDO/HMI. По этим же данным проводились 3D расчеты поля в нелинейном бессиловом (NLFFF) приближении [5]. Для трех быстрых и трех медленных КВМ с источниками вблизи центрального меридиана изучены особенности поведения магнитного поля в тени пятен активных областей (АО). Также для этих событий проведено сравнение распределений магнитного поля в трехмерном пространстве до начала эруптивного события, используя расчеты поля в NLFFF приближении. В тени солнечных пятен, были изучены изменения со временем минимального угла наклона силовых линий поля к положительной нормали к поверхности Солнца α_{\min} , среднего значения α , α_{mean} , максимального (B_{max}) и среднего (B_{mean}) значения магнитной индукции в пределах тени пятна. Из NLFFF расчетов поля для всех изученных событий были построены изменения с высотой поперечной компоненты магнитной индукции $B_t(h)$ над главной линией раздела полярности (ЛРП) поля АО до высоты примерно 100 Мм, а также распределения здесь индекса спада магнитного поля $n = -(h/B_t)dB_t/dh$. Данные LASCO и SDO использовались для определения типа КВМ (гало и др.) и их параметров.

Анализ особенностей возникновения медленных и быстрых КВМ показал следующее (Рис. 1):

1. В среднем, магнитное поле до начала связанной с КВМ вспышки на рассматриваемых высотах от фотосферы до $h_m \approx 0.14R_s$ (R_s – радиус Солнца) в АО, в которых возникают медленные КВМ, более слабое, чем в АО, где возникают быстрые КВМ.

2. На высоте h_m индекс спада n поперечной компоненты поля B_t над линией раздела полярности (ЛРП) фотосферного поля в среднем по рассмотренным событиям меньше примерно на 30% для событий с медленными КВМ по сравнению с событиями с быстрыми КВМ. Это различие пока не является статистически значимым, требуется дальнейший анализ выборок событий большего объема.

3. Генерация быстрого КВМ начинается с эрупции волокна и, затем, петлеобразной структуры. В канале 19.3 нм отчетливо наблюдается формирование фронтальной структуры (ФС) КВМ; ее скорость нарастает со временем до значений 823 км/с в поле зрения телескопа SDO/HMI, Рис. 2(b). Углы α_{\min} в пятнах, близкорасположенных к основаниям петлеобразной структуры, начинают резко уменьшаться примерно за 15 минут до начала вспышки и в момент вспышки достигают малых значений $\alpha_{\min} < 1^\circ$, Рис. 2(c). B_{max} и B_{mean} после начала вспышки в одних пятнах уменьшается, в других – возрастает на ~ 100 Гс.

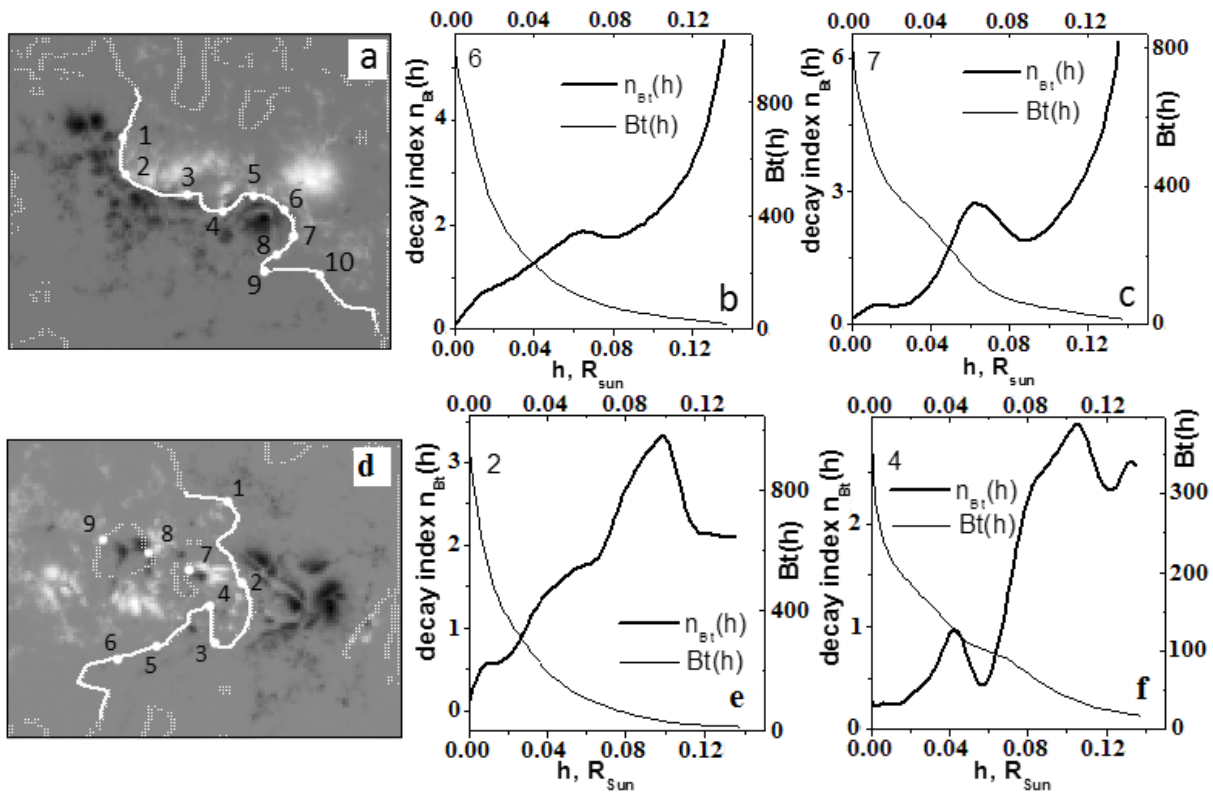


Рис. 1. Распределения радиальной компоненты магнитного поля для быстрого КВМ 09.03.2012 (a) и медленного КВМ 22.10.2013 (d). Белыми линиями отмечены ЛРП фотосферного поля, точками - места построения зависимости Bt [Гс] и n от высоты h ; (b), (c), (e), (f) – зависимости $Bt(h)$ и $n(h)$ над точками, номера которых указаны на этих панелях сверху слева.

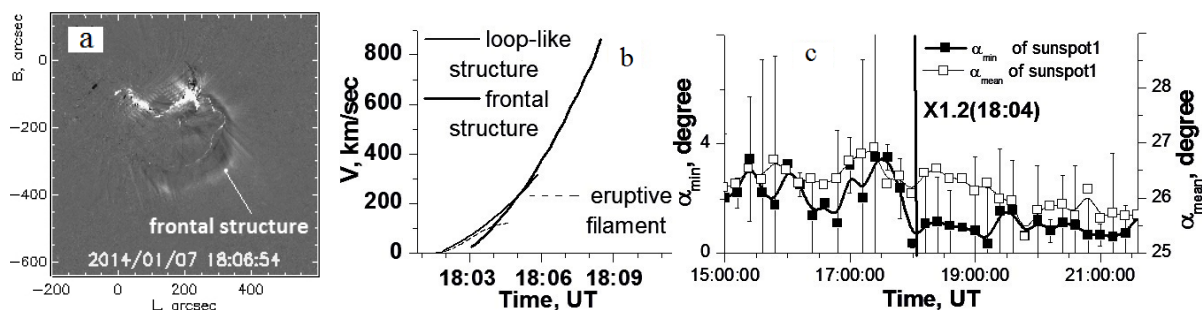


Рис. 2. а – иллюстрация фронтальной структуры быстрого КВМ (07.01.2014); б – профили скорости эруптивного волокна, петлеобразной структуры и фронтальной структуры быстрого КВМ. с – зависимости от времени α_{min} (круг) и α_{mean} (окружность).

4. Формирование медленного КВМ по данным SDO/AIA в канале 19.3 нм включало в себя следующие этапы: эрупцию волокна как триггера КВМ, последующее формирование и движение магнитной петлеобразной структуры и, далее, формирование ФС КВМ, Рис. 3(a). Видно, что максимальная скорость петлеобразной структуры превышает скорость эруптивного волокна (Рис. 3(b)), а максимальная скорость ФС оказалась заметно больше линейной скорости КВМ в поле зрения коронографов LASCO. Во всех пятнах АО, в которой возник медленный КВМ, α_{min} существенно не меняются перед началом вспышки и сразу после начала вспышки, Рис. 3(c).

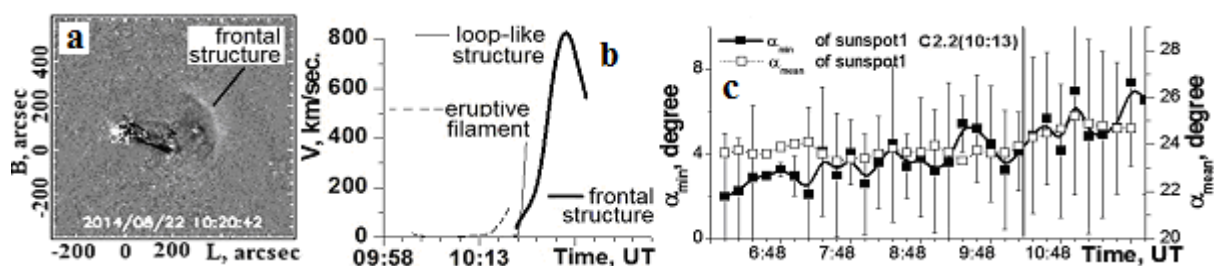


Рис. 3. То же, что на Рис. 2, но для медленного КВМ, зарегистрированного 22.08.2014.

Выполненный нами анализ показал, что процессы генерации рассмотренных КВМ с разной максимальной скоростью в поле зрения LASCO оказались практически одинаковыми. Формированию ФС КВМ предшествует эрупция волокна – триггера КВМ, и последующее движение магнитных петель. В тоже время, существенно отличается поведение угла α_{\min} в тени пятен АО, в которых возникают быстрые и медленные КВМ, Рис. 2(с), 3(с). Для обоих типов КВМ динамика V_{\max} и V_{mean} в тени разных пятен различна. Индекс спада n поперечной компоненты поля V_t на высоте $h_m=0.14R_s$ над ЛРП поля в среднем на 30% больше для событий с быстрым КВМ по сравнению с медленным.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Литература

1. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al. Earth Moon Planet. The SOHO/LASCO CME Catalog V. 104 P. 295-313. 2009.
2. Sheeley N.R., Jr., Walters J.H., Wang Y.-M, and Howard R.A. Continuous tracking of coronal outflows: Two kinds of coronal mass ejections. J.G.R. V. 104. P. 24,767. 1999.
3. Toeroek T., Kliem B. Numerical simulations of fast and slow coronal mass ejections. Astron. Nachr. AN. V. 328. P.743. 2007.
4. Vršnak B., Sudar D., Ruždjak D. The CME-flare relationship: Are there really two types of CMEs? Astron. Astrophys. V. 435. P. 1149-1157. 2005.
5. Rudenko, G. V.; Myshyakov, I. I. Analysis of Reconstruction Methods for Nonlinear Force-Free Fields. Solar Phys., V. 257. P.287-304. 2009.

СВЕРХТЕПЛОВЫЕ ИОНЫ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА 1 а.е. В 23 И 24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

Зельдович М.А., Логачев Ю.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

mariya@srd.sinp.msu.ru

SUPRATHERMAL IONS FROM CORONAL HOLES AT 1 AU IN 23 AND 24 SOLAR CYCLES

Zeldovich M.A., Logachev Yu.I.

SINP MSU, Moscow, Russia

The relative abundances of He, C, O and Fe ions with energy of $\sim 0.04-0.16$ MeV/nucleon in fluxes from near-equatorial coronal holes (CHs) were equal to abundances of thermal ions from CH and showed the good resemblance in dependences on solar wind velocity in the SC 23 and SC 24 as well. The intensities of the suprathermal 3He , 4He , C, O, and Fe ions in outflows from CHs increased with the speed of the solar wind. The results obtained suggest that the sources of suprathermal ions from CHs in periods of low solar activity are accelerated solar wind particles forming a continuously present high-temperature “tail” of the solar wind.

Во время спада и минимума солнечной активности в периоды отсутствия вспышек солнечных космических лучей и других спорадических активных явлений в 2006-2011 гг. и в 2015-2017 гг. были обнаружены 30 [1] и 32 потока сверхтепловых ионов из приэкваториальных корональных дыр (КД). Здесь, как в [2], применялись критерии выбора спокойных периодов, разработанные в [2, 3], которые обеспечивали минимальный вклад в измеряемые потоки энергичных частиц от активных процессов на Солнце и в межпланетном пространстве. Помимо этого, для подтверждения регистрации потоков частиц из изучаемых КД, величины O^7/O^6 и $Q(\text{Fe})$ в потоке солнечного ветра из КД должны были удовлетворять требованиям $\text{O}^7/\text{O}^6 \leq 0.145$ и $Q(\text{Fe}) < 10$ одновременно с регистрацией повышенного потока сверхтепловых ионов [4].

В период спада активности 24 цикла в 2015-17 гг. наблюдались 32 потока ионов из приэкваториальных КД, среди которых была обнаружена рекуррентная КД и коротирующий поток СВ из нее, существовавшие в течение 7 солнечных оборотов. На рис.1 представлены скорость СВ, интенсивности сверхтепловых ионов ^4He , O и Fe по данным прибора ULEIS на к.а. ACE, также величины O^7/O^6 , $Q(\text{Fe})$ и Fe/O тепловых ионов по данным прибора SWICS/ACE для 2 последних оборотов этой долгоживущей КД. На рисунке видно увеличение скорости СВ и потоков сверхтепловых ионов Fe, O и ^4He из КД. Одновременные уменьшения отношения O^7/O^6 и величины $Q(\text{Fe})$ подтверждают прохождение потока солнечного ветра из КД мимо Земли.

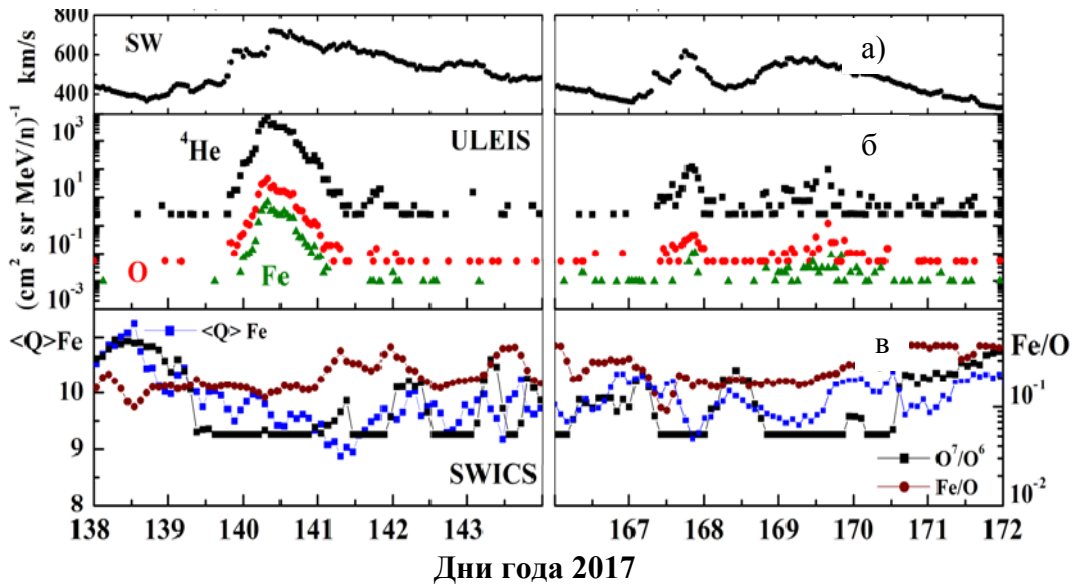


Рис. 1. а) скорость СВ по данным КА ACE, б) интенсивности сверхтепловых ионов: ^4He с энергией 0.08–0.16 МэВ/нуклон (квадраты), O (кружки) и Fe (треугольники) с энергиями ~ 0.04 –1 МэВ/нуклон (ULEIS/ACE), в) ионы солнечного ветра: величины $Q(\text{Fe})$ (синие квадраты), O^7/O^6 (черные квадраты), Fe/O (кружки) данные SWICS/ACE.

В таблице даны средние величины Fe/O с энергиями 0.04-0.08 МэВ/нуклон и средние величины тепловых Fe/O в потоках ионов из 32 КД, которые рассчитывались по критериям, применявшимся в [1]. Результаты, не противоречащие данным [5], приведены в таблице в графе СЦ 24, где также даны полученные в [1] значения сверхтепловых Fe/O с из 30 КД в СЦ 23. Видно, что величины Fe/O в потоках сверхтепловых ионов соответствуют относительному содержанию тепловых ионов в солнечном ветре из КД в каждом цикле, причем значения Fe/O были выше в СЦ 24 как в тепловых так и в сверхтепловых потоках ионов.

Таблица. Среднее содержание сверхтепловых ионов Fe/O и ионов тепловых энергий в солнечном ветре из 30 корональных дыр в 2006 -2010 гг. и из 32 КД в 2015-2017 гг.

Энергия ионов	прибор	O^7/O^6	Fe/O (СЦ 23)	Fe/O (СЦ 24)
Сверхтепловые ионы 40-80 кеВ/нуклон	ULEIS		0.11 ± 0.01	0.17 ± 0.05
Тепловые ионы солнечного ветра	SWICS	0.049 ± 0.003 СЦ 23 0.059 ± 0.003 СЦ 24	0.090 ± 0.004	0.186 ± 0.06

Результаты изучения зависимости величин Fe/O от максимальной скорости солнечного ветра из КД представлены на рис. 2. Рисунок демонстрирует, что величины Fe/O сверхтепловых и тепловых ионов из КД в СЦ 24 также, как в СЦ 23 [2], уменьшаются с возрастанием скорости СВ. Нужно отметить, что максимальные скорости СВ из КД в 24 СЦ на спаде активности превышали 750 км/с, в то время как в 23 цикле в области минимума активности скорости были < 700 км/с. Обнаруженный в 24 СЦ рекуррентный поток СВ из КД, существовавший в течение 7 солнечных оборотов, отмечен

на рис.2а крестами. Как видно из рисунка, все значения Fe/O показывают одинаковый характер уменьшения величины от скорости СВ.

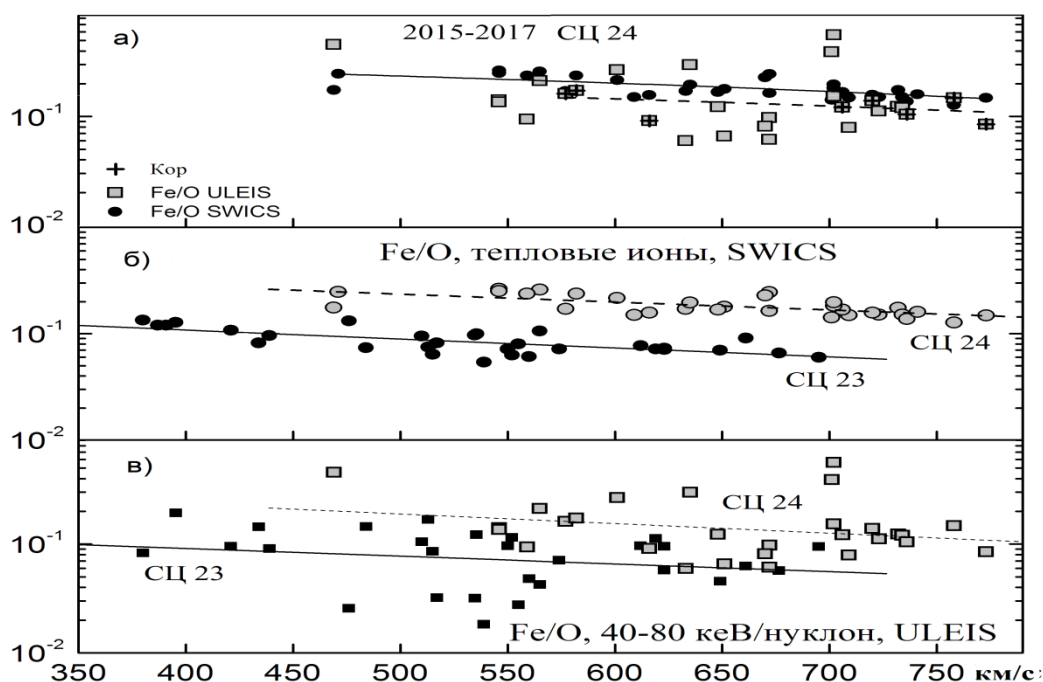


Рис. 2. Величины Fe/O: квадраты – в потоках сверхтепловых ионов 40-80 кэВ/нуклон (ULEIS), кружки – в потоках тепловых ионов СВ (SWICS) в зависимости от максимальной скорости СВ из КД: а) в 2015-2017 гг., крестами отмечены Fe/O в потоках ионов из долгоживущей коротярующей КД, б) Fe/O в потоках тепловых ионов в СЦ 23 в 2006-2011 гг. и в СЦ 24 в 2015-2017 гг., в) то же, что в б) для сверхтепловых ионов.

На рис. 3 представлены усредненные энергетические спектры ионов сверхтепловых энергий в потоках частиц из КД в СЦ 24 с максимальными скоростями СВ из этих КД <600 км/с, 600–700 и >700 км/с. Учет весового вклада каждого периода проводился по процедуре, разработанной в [2]. Видно, что интенсивности ионов зависят от скорости СВ из КД: чем выше скорость, тем больше интенсивность сверхтепловых ионов. Отметим, что спектры демонстрируют одинаковые изменения для всех ионов, с низким и высоким первым ионизационным потенциалом (FIP). Подобную зависимость можно объяснить сдвигом исходного спектра тепловых частиц СВ как целого в сторону больших энергий в процессе ускорения ионов при распространении до 1 а.е., при предположении, что при таком сдвиге форма спектра меняется незначительно.

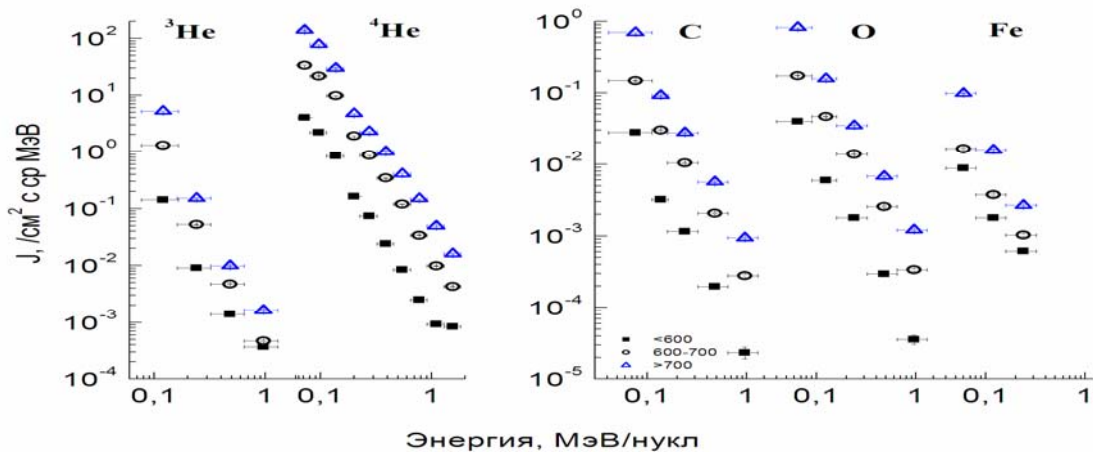


Рис. 3. Усредненные спектры ионов ^3He , ^4He , C, O, и Fe в потоках частиц из корональных дыр в 3 диапазонах скоростей солнечного ветра из КД: <600 (квадраты), $600-700$ (кружки) и >700 км/с (треугольники).

В результате изучения состава сверхтепловых ионов из КД в СЦ 23 и СЦ 24 показано, что величины Fe/O энергичных ионов в СЦ 23 и в СЦ 24 в потоках из КД соответствовали содержанию тепловых ионов в потоках СВ из КД, при этом демонстрируя одинаковую зависимость содержания тепловых (максвелловских) и сверхтепловых ионов от скорости СВ. Полученные здесь результаты по измерениям в СЦ 24 подтверждают предположение, что энергичные ионы из КД представляют собой высокотемпературный «хвост» солнечного ветра [1]. Полученное здесь превышение величин Fe/O в СЦ 24 по сравнению с Fe/O в СЦ 23 объясняется, возможно, тем, что солнечная активность в СЦ 24 в исследуемый здесь период времени (2015-2017) не достигла минимума.

Экспериментальные данные приборов ULEIS и SWICS на КА ACE были получены из сайта <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2>, данные КД – www.solen.info/solar/coronal_holes.html.

Литература

1. Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сулова Г.М., Кечкемети К., Веселовский И.С. Надтепловые ионы в потоках солнечного ветра из корональных дыр на 1 а.е. // Астрон. журн. Т. 93. С. 675. № 7. 2016.
2. Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сулова Г.М. Энергетические спектры и относительное содержание ионов C, O и Fe на 1 а.е. при спокойном Солнце // Астрон. журн. Т. 88. № 2. С.409. 2011.
3. Zel'dovich M.A., Ishkov V.N., Logachev Yu.I., Kecskemety K. Ion abundances of low-energy quiet period particle fluxes at 1 AU // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. V. 75. No 6. P. 776. 2011.
4. Zhao L., Zurbuchen T.H., Fisk L.A. Global distribution of the solar wind during solar cycle 23: ACE observations // Geophys.Res. Lett. V. 36, L14104. 2009.
5. Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H. Solar wind heavy ions over solar cycle 23: ACE/SWICS measurements // Astrophys.J. V. 768, P. 94. 2013.

ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ТЕКУЩЕГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА: УСЛОВИЯ, ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗА

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

ishkov@izmiran.ru

GEOEFFECTIVENESS OF THE SOLAR ACTIVE PHENOMENA OF THE CURRENT SOLAR CYCLE: CONDITIONS AND FEATURES OF THE REALIZATION AND THE POSSIBILITY OF FORECASTING

Ishkov V.N.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The current solar cycle opened the epoch of low solar activity, when after the transition period (the phase of recession 22 and all 23 solar cycles), the background value of the total magnetic field of the Sun according to the WSO data decreased more than twofold. Under these conditions, all manifestations of solar activity significantly decreased, which affected the state of the inner heliosphere and near-Earth space. This led to a significant decrease in both the number of solar flare events and their geoeffectiveness.

1. Согласно сценарию развития достоверных солнечных циклов (СЦ) [1], после эпохи повышенной СА через переходной 23 СЦ, когда изменились условия генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца и фоновая величина общего магнитного поля по данным WSO уменьшилась более чем в два раза [2], Солнце вступило во 2 эпоху пониженной СА. Текущий СЦ – первый цикл низкой величины эры космических исследований доступный изучению практически во всех диапазонах электромагнитного и корпускулярного излучений. В первую эпоху пониженной СА (СЦ 12 – 16) наблюдательные данные ограничивались наблюдениями пятен, площадей групп пятен и возмущений геомагнитного поля. Это даёт возможность, в первом приближении, оценить характер вспышечной спорадической активности (солнечные вспышечные события) и, по рекуррентным геомагнитным возмущениям, примерное количество их источников (корональных дыр – КД). Основные средние характеристики СЦ эпох пониженной СА по сравнению с эпохами повышенной:– более низкие начальные значения $W^*_{\text{мин}}$ (**3.38**);– большая продолжительность циклов (**10.9 лет**);– более продолжительная ветвь роста (**4.5 г.**);– многовершинность фазы максимумов (не меньше 2) для низких СЦ и одновершинность для СЦ средней величины;– более короткая ветвь спада (**6.5 г.**);– более узкая широтная зона пятнообразования $\pm 35^\circ$;– количество беспятенных дней – **781**;– средняя сглаженная площадь групп пятен **1200 мдп**;– число групп пятен с площадями ≥ 1000 мдп во всех СЦ **147**;– большая продолжительность фазы минимума (**64 мес.**), а в двух случаях (23–24 и 14–

15) – самые продолжительные фазы минимума. В Таблице приводятся характеристики СЦ достоверных эпох пониженной СА [1]:

Таблица. T_0 – начало СЦ; W^*_m – начальное значение сглаженных чисел Вольфа; T_M – время максимума СЦ; W^*_M – максимальное значение сглаженных чисел Вольфа; $T_Y\uparrow$ г. – длительность ветви роста в годах; $T_Y\downarrow$ г. – длительность ветви спада; T_Y г. – длительность СЦ; $T1_m$, $T2_m$ – длина фазы минимума перед и после данного СЦ в месяцах; Sp_{less} – количество беспятенных дней в соответствующих фазах минимумов; Σ – средние величины по эпохам. Курсивом приведены прогнозируемые значения.

N	T_0	W^*	T_M	T_e	W^*	$T_Y\uparrow$	$T_Y\downarrow$	T_Y	T1	T2	Sp_e
1	1878XI	2.2	1883XI	1890II	74.6	5.0	6.3	11.	65	59	732
1	1890III	5.0	1894 I	1901III	87.9	4.5	8.2	12.	59	77	937
1	1902 I	2.6	1906 II	1913VI	64.2	4.1	7.6	11.	77	59	104
1	1913VI	1.5	1917VI	1923VI	105.	4.0	6.1	10.	59	48	526
1	1923VI	5.6	1928	1933VI	78.1	4.7	5.6	10.	48	54	666
Σ		3.4			82.4	4.5	6.5	10.	61		781
2	2009 I	1.7	2014	2020V-	81.9	5.32	5.9	12,	68	59	

2. После неполных 10 лет развития 24 СЦ представляется важным выявить различия в его характеристиках с СЦ первой эпохи пониженной СА. Ход его развития показывает, что с IV 2016 г. реализуется фаза минимума СА ($W^*\leq 30$). За первым промежуточным пиком в XI 2011 после небольшого, но продолжительного (15 мес.) спада в числах Вольфа 24 СЦ стал уверенно расти и к IV 2014 г. достиг своего максимума ($W^*=81.9$). Отсюда следует первая особенность 24 СЦ – ни в одном СЦ первой эпохи пониженной СА промежуточный пик не проявлялся так четко и с такой разницей в пиковых значениях ($\Delta W^*\sim 15$), а с учётом спада после первого пика промежуточный участок роста занял интервал $\Delta W^*\sim 30$. Второй особенностью 24 СЦ стала рекордная продолжительность ветви роста, которая составила 5.32 г, для СЦ первой эпохи пониженной СА и всего достоверного ряда. Текущий СЦ имеет наименьшее количество больших ($Sp\geq 1000$ мдп) и очень больших ($Sp\geq 1500$ мдп) групп пятен не только среди всех СЦ космической эры, но и всех СЦ первой эпохи пониженной СА: на IX 2018 г. на Солнца появилось всего 16 больших групп пятен, из них 5 очень больших и одна – $Sp\geq 2000$ мдп (16/5/1), против 23/10/0 в 12 СЦ, 37/9/2 в 13 СЦ, 21/7/2 в 14 СЦ, 21/7/2 в 15 СЦ и 33/10/3 в 16 СЦ. До середины 2013 г. наблюдалось преобладание пятнообразовательной активности N-полушария Солнца и первый пик, связанный с ним, приходится на X 2011 г, затем картина резко меняется и группы пятен чаще появляются в S-полушарии с максимумом в IV 2014 г. Однако с начала 2016 г. опять наблюдается преобладание групп пятен N- полушария. Эта картина значительно отличается от распределения асимметрии появления групп пятен первой эпохи пониженной СА, особенно первых её трёх СЦ.

3. Процессы перестройки общего магнитного поля к уровню эпохи пониженной СА привели к уменьшению общего магнитного поля Солнца. Это породило цепочку изменений магнитных полей всех структур на Солнце, в том числе и в характеристиках солнечных активных явлений. Наиболее яркими наблюда-

тельными изменениями стали: (1) значительное уменьшение (~ 700 Гс от уровня 1998 г.) величины магнитного поля в тенях пятен до уровня ~ 2050 Гс, вероятно, за счёт значительного увеличения относительного количества групп пятен среднего и малого размера [3] и уменьшения продолжительности жизни групп пятен; среднее число пятен в группе, средний размер, а также среднее число отдельных пятен и групп пятен являются наименьшими. 24 СЦ – лидер по количеству групп однодневков и пятен одиночек [4]; (2) заметное уменьшение величины магнитного поля КД занимающих интервал $0.2\text{--}8.7$ Гс со средней величиной 3.0 ± 1.6 Гс [5], по сравнению с предыдущими СЦ ($3\text{--}36$ Гс) и ~ 20 Гс в фазах максимумов и $1\text{--}7$ Гс, со средним ~ 5 Гс в минимумах предыдущих СЦ. В период минимума СЦ 24 площадь КД была максимальна, а напряженность и поток магнитного поля оказались минимальными за весь период наблюдений КД [6]; (3) смена режима изменений полярных магнитных полей: величина полярного магнитного поля была около $7\text{--}8$ Гс в фазах минимумов предыдущих 3 СЦ и только $4\text{--}5$ Гс в последнем минимуме 2008–2009; (4) темп развития и уровень вспышечной активности в текущем СЦ существенно ниже предыдущих 5 СЦ: вспышечных событий класса $X \geq 1.0$ было всего 58 ($4 - X > 5$), а очень больших и экстремальных не было совсем; (5) количество корональных выбросов вещества (СМЕ) уменьшилось незначительно по сравнению с 23 СЦ, но их угловая ширина заметно увеличилась для событий одинаковой скорости распространения [7]. Такие изменения магнитной ситуации в физических процессах на Солнце привели к значительным изменениям в характеристиках солнечного ветра (СВ): значительное уменьшение всех средних параметров СВ в процентах по сравнению со средними показателями в эпоху повышенной СА: скорость, отношение теплового и магнитного давлений ($\sim 11\%$), температура ($\sim 40\%$), тепловое давление ($\sim 55\%$), массовый поток ($\sim 34\%$), поток импульса или динамическое давление ($\sim 41\%$), поток энергии ($\sim 48\%$), величина межпланетного магнитного поля ММП ($\sim 31\%$) и его радиальная составляющая ($\sim 38\%$), протонное динамическое давление (~ 1.4 нПа, по сравнению с ~ 2.4 нПа в 1970-1990 г.) остаются вблизи самых низких значений космической эры [8]. Напряжённость ММП $|Br|$ измеренная у Земли составила только 67% от её величины в 1996 г. (от 2.0 до 1.3 нТ), а на расстоянии $2.5 R_{\odot}$ средняя радиальная компонента ММП (Br) в годы минимума 2007-2009 г. стала меньше на $\sim 33\%$ по сравнению с минимумом 1995-1997 в полярных областях, $\sim 36\%$ в областях средних широт и на $\sim 11\%$ в экваториальных районах. Относительно большое ММП на экваторе при движении с СВ, может расширять гелиосферный плазменный слой, что в дальнейшем становится причиной низкой плотности СВ и ослабляет ММП в экваториальной плоскости в период 2007-2009 г. и на протяжении всего 24 СЦ;

4. В настоящее время принято, что все изменения космической погоды на кратковременной шкале (сутки) определяются только активными явлениями на Солнце - солнечными вспышечными событиями и КД. Возмущения от них через СМЕ и высокоскоростные потоки изменяют состояние околоземного космического пространства (ОКП). Изменения физических условий в гелио-

сфере привели к наблюдаемому изменению уровня геоэффективности солнечных активных явлений в системе Солнце-Земля.

Итак, сравнительно небольшое уменьшение фоновых значений общего магнитного поля Солнца привело к принципиальным изменениям геоэффективности, уровень которой стал значимо меньше за счёт того, что агенты отвечающие за геоэффективность, выходя из Солнца, распространяются в среде с пониженными характеристиками. Угол раствора СМЕ одной и той же скорости стал более широким, что значимо понижает их способность воздействовать на ОКП. Уменьшилось количество мощных солнечных вспышек, а очень больших ($X > 10$) и экстремальных ($X > 10$) не было, то есть отсутствовали всплывающие магнитные потоки нужных для этого величин и скоростей всплывания. Значимо упало число СПС ($E_{pr} > 10$ МэВ), 96 против 149 в 23, 127 в 22, 146 в 21 и 144 в 20 СЦ особенно больших (8) и очень больших (5), а также возрастаний (2) на нейтронных мониторах. Катастрофично упало число магнитных бурь, особенно умеренных (на 40%) и больших (на 80%), по сравнению с СЦ космической эры; максимум среднемесячных значений Ариндекса достиг в IX 2017 г. (18.1).

Литература

1. Ишков В.Н., Периоды «пониженной» и «повышенной» солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Сб. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013». Изд. ВВМ. С- П. 2013, с. 111–114.
2. Ишков В.Н. Прогноз космической погоды: принципы построения и границы реализации (опыт трёх циклов), Косм. иссл., 2017, т. 55, 6, с. 391–398,
3. Nagovitsyn, Y.A, Pevtsov, A.A, Livingston, W.C. On a Possible Explanation of the Longterm Decrease in Sunspot Field Strength // *Astroph. J. Lett.* 2012. 758:L20.
4. Откидычев П.А., Скорбеж Н.Н., Особенности 24 цикла СА и их связь с общими закономерностями 19–23 циклов // Сб. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013». Изд. ВВМ. С-П, С. 187–190. 2013.
5. Hofmeister, S. J., A. Veronig, M. A. Reiss, et al. // Characteristics of Low-latitude Coronal Holes near the Maximum of Solar Cycle 24, *The Astroph. J.*, 835:268, (17pp), 2017
6. Васильева В.В., Тлатов А.Г. Сравнительный анализ свойств КД в 24-м цикле активности // Сб. Солнечная и солнечно-земная физика-2015. Изд. ВВМ, С- П. С. 39–42. 2015.
7. Selvakumaran, R., Veenadhari, B., Akiyama, et al. On the reduced geoeffectiveness of solar cycle 24: a moderate storm perspective // *JGR. Space physics*, V.121, 9, 2017, P.8188–8202.
8. McComas, D. J., Angold, N., et al. Weakest Solar Wind of the Space Age and the Current "Mini" Solar Maximum // *Astrophys. J.* V. 779. № 2. PP. 10 (2013).
9. Chin-Chun Wu, Kan Liou, S. T. Wu, Murray Dryer, Heliospheric plasma sheet inflation as a cause of solar wind anomaly during the solar cycle 23-24 minimum // *AIP Conference Proc.* V.1720,N.1. 040021 (2016).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЦЕНАРИЯ ВСПЫШЕЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ЭПОХ ПОВЫШЕННОЙ И ПОНИЖЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

ishkov@izmiran.ru

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SCENARIO OF FLARE ENERGY RELEASE IN ACTIVE REGIONS EPOCHS OF THE INCREASED AND LOWERED SOLAR ACTIVITY

Ishkov V.N.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

Comparison of conditions and characteristics of the emerging magnetic fluxes is occurrence to different epochs of SA in the conditions of sharp recession of flare activity in the 24th solar cycle.

1. Полная перестройка режима генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца к эпохе пониженной солнечной активности (СА) [1] и, как следствие, сильный спад вспышечной активности поставил в повестку дня вопрос о сравнении условий и характеристик всплывающих магнитных потоков в разные эпохи СА. С началом эры космических исследований и появлением высококачественных интерференционно-поляризационных фильтров в отдельных спектральных линиях, особенно в линии водорода H α ($\lambda=6553$ Å) открылись новые возможности детального исследования солнечных вспышек и условий к ним приводящим. Эти исследования пришлось на вторую эпоху повышенной СА (18 - 22 СЦ) и продолжились в переходной солнечный цикл (СЦ) 23. Вторая эпоха пониженной СА началась в 2009 г. с началом 24 СЦ. За почти 10 лет развития мы имеем практически полную картину его пятнообразовательной и вспышечной активности и можем сделать первые выводы об отличии условий в ходе реализации больших вспышек в отдельных вспышечно-активных областях разных эпох. Перестройка общего магнитного поля к уровню эпохи пониженной СА привела к значимому уменьшению общего магнитного поля Солнца, следствием которого стало уменьшение средних магнитных полей в полярных областях и во всех наблюдаемых структурах: в солнечных пятнах [2], корональных дырах [3]. Текущий СЦ имеет наименьшее количество больших ($S_p \geq 1000$ мдп - 16), очень больших ($S_p \geq 1500$ мдп - 5) групп пятен не только среди всех СЦ космической эры, но и всех циклов первой эпохи пониженной СА. Это сказалось на уровне вспышечной активности, который текущем СЦ существенно ниже предыдущих 5 СЦ: вспышечных событий класса $X \geq 1.0$ было всего 58 (4 - $X > 5$), а очень больших ($X \geq 10$) и экстремальных не было совсем.

2. Процесс осуществления больших солнечных вспышек рассматривается как самостоятельный процесс внутри общего развития активной области (АО). Новый всплывающий магнитный поток (ВМП) с быстрой эволюцией [4], приносит в АО дополнительную энергию, реализация которой и приводит к осуществлению солнечных вспышечных событий за небольшой, по сравнению с временем жизни АО, временной интервал [5]. Ограниченный по времени, такой процесс может ускорить эволюцию АО, но, в общем случае, такое влияние можно считать несущественным, т.к. АО продолжает существовать за счёт собственных эволюционных изменений. Само явление АО можно рассматривать как эволюцию одного или нескольких ВМП ($\leq 10^{13}$ Вб), одновременно или последовательно всплывающих в атмосфере Солнца со средним или малым темпом всплытия (10^7 – 10^8 Вб/сек), проходящего развитие от появления первых признаков флоккула, через стадию образования, развития и распада группы пятен до полного исчезновения флоккула. Такие "медленные" ВМП приводят только к эволюционному развитию АО - группа пятен относительно растёт по площади и числу пятен, оставаясь практически спокойной во вспышечном отношении, порой вырастая до гигантских размеров. На всех фазах развития АО могут появляться ВМП, магнитное поле которых, взаимодействуя с магнитным полем АО, либо (медленный) вызывает дополнительный рост группы пятен (эволюционное развитие) без значимого роста вспышечной активности, либо (быстрый), приводит к росту значимой вспышечной активности. Таким образом, процесс осуществления солнечных вспышек рассматривается как самостоятельный процесс внутри общего развития АО, реализующийся ВМП с быстрой эволюцией. Этот физический процесс имеет вполне конкретное начало – всплытие нового магнитного потока внутри АО или вне её, максимум – период осуществления вспышек большой и средней мощности и конец – после полной реализации энергии ВМП. По наблюдениям в эпоху повышенной СА (20–22 СЦ) и в переходный период для осуществления последовательности вспышек средней и большой мощности необходимо, чтобы новый ВМП был достаточно большим ($>10^{13}$ Вб) и скорость его всплытия была не менее 10^9 Вб/с. Первые значимые (обычно среднего балла) вспышки происходят через 1–2 суток после первого появления нового ВМП в пределах АО. Очень важно подчеркнуть, что вспышки больших и средних баллов в АО никогда не происходят в одиночку, они всегда группируются в серии, кортежи, которые происходят в ограниченном временном интервале. В зависимости от степени развития АО и мощности ВМП такой период может длиться от 25 до 90 ч, но основная доля вспышек (95%) осуществляются в промежутке времени 55 ± 20 ч. Заметим, что всё прохождение группы пятен по видимому диску Солнца занимает отрезок времени 330 ч. (13,4 суток). Такой подход открыл возможность создать методику прогноза больших солнечных вспышечных событий, которая была успешно опробована на космических обсерваториях ГАММА, ГРАНАТ, КОРОНАС И, Ф, Фотон.

3. Чтобы выявить возможные отличия в подготовке и реализации типичного развития вспышечного процесса в разные эпохи СА (21, 23 и 24 СЦ) в докладе рассмотрены примеры АО, образовавшихся или бурно эволюционировавших на видимом диске Солнца за счёт ВМП с быстрой эволюцией. Для описания характеристик и вспышечной активности АО используется краткая формула, приведённая в [6]. В эпоху повышенной СА (21 СЦ) характерна картина вспышечной эволюции АО января 1985 г.

AR 4617 (S08L073, ПЦМ 18.01.1985 г.,
Sp max = 750 м.д.п., ЕКI, δ)
XRI = 6.38, $X_1^{4.7} + M_8^{4.1} + C_{18}$; $2_2 + 1_6 + S_{48}$;
ПВЭ (27^h) 20 - 21.01 - $X_1^{4.7} + M_7^{4.1}$;

АО, образовавшаяся в центральной зоне видимой полусферы вечером 18.01 и за одни сутки увеличившая Sp в 6 раз, в конце 20.01 произвела первую вспышку среднего балла ($\Delta t \sim 1.5$ сут).

Самая мощная вспышка (X4.7/2B, S08W38, (2350 0004 0237)UT) наблюдалась через сутки 21.01. В данном случае за 27^h, реализовалась практически вся вспышечная энергия ($X_1 + M_7$) и только одна вспышка балла M1 произошла 23.01. После этих событий АО стала быстро деградировать.

В переходной период картина практически не изменилась и период вспышечного энерговыделения (ПВЭ) начинался обычно со вспышек среднего класса.

AR 10488 (N08L291, ПЦМ 28.4.10.03
Sp max = 1750 м.д.п., FKС, δ)
XRI = 8.57, $X_2^{3.9} + M_7^{1.9} + C_{17}$; $2_2 + 1_2 + S_{48}$;
ПВЭ (41^h) - 02.10 - 04.11 - $X_2 + M_2$

АО образовалась 27.10 в центральной области солнечного диска, и, несмотря на быстрое развитие, до 3.11 выдавала лишь вспышки среднего балла, когда в ней осуществились две вспышки балла X2.7/2B и X3.9/2F.

В 24 СЦ картина заметно изменилась: быстрый, большой ВМП достаточно часто уже в первый день реализует большую вспышку ($M \geq 5$).

AR12673 (S08L117, ПЦМ 04.09.2017,
Sp=1060 мдп, DKС, δ),
XRI=18.97, $X_5^{9.3} + M_{26}^{8.1} + C_{54}$, $3_2 + 2_4 + 1_{13} + S_{84}$
ПВЭ1 (12^h) 4-5.09 - M8/5.5;
ПВЭ2 (12^h) 6-8.09 - X4/9.3 + M15/8.1;
ПВЭ3 (17h) 9-10.09 - X1/8.2 + M1

Для примера возьмем самую вспышечно-активную АО 24 СЦ, в которой во второй половине 3.09 начал всплывать мощный и быстрый ВМП, увеличивший к концу 4.09 Sp группы пятен почти в четыре раза, а к 8.09 довел её до максимального значения.

Как неоднократно бывало в текущем цикле, менее чем через сутки после начала процесса, уже 4 сентября произошла первая большая вспышка (M5.5). В процессе взаимодействия новых магнитных потоков с собственным магнитным полем АО (6-8.09) осуществились 4 вспышки классов X2.2, X9.3, X1.7 6.09, X1.3 7.09 и 6 больших вспышек класса M. Всплытие следующего нового магнитного потока (9-10.09) привело ещё к одной большой вспышке класса X8.2 (10.09).

4. Итак, уменьшение общего магнитного поля Солнца в эпоху пониженной СА привело к некоторым изменениям в процессе подготовки и реализации вспышечного процесса - уменьшилось время между первыми признаками появления значимого нового магнитного потока и началом периода вспышечного энерговыделения ($10 - 20^h$), хотя сам период изменений не претерпел – $\sim 55^h$ [Ишков, 1998], что привело к появлению АО, в которых значимые вспышечные события наступали непосредственно в день начала ВМП (например, AR11045, AR11158, AR11429, 11430, AR12673 и др.). Этот факт несколько усложняет и требует пересмотра возможность оперативного прогноза периода реализации больших солнечных вспышек. В прошедших циклах космической эры этот временной интервал составлял не менее 24 часов [Ишков, 1999].

Для "чистых" случаев эпохи повышенной СА, когда наблюдается только начальное бурное развитие группы пятен или ее активизация при максимальной площади до 1000 м.д.п., вспышечное энерговыделение с большими вспышками будет иметь только один период. К таким АО, кроме указанной выше AR 4617, относятся и АО, в которых произошли вспышки 22.11.1977 г., 26.03.1979 г. и в ряде других исследованных АО.

Литература

1. Ishkov, V.N. Solar sunspot-forming activity and its development on the reliable Wolf numbers series // in book "Variability of the Sun and Sun-like Stars: from Astroseismology to Space Weather". eds J.-P. Rozelot, E.S. Babaev, [EDP Sciences Proceedings](#). ISBN 978-2-7598-2195-2. p.109-118. 2018.
2. Livingston, W., Penn, M, Svalgaard, L. Decreasing Sunspot Magnetic Fields Explain Unique 10.7 cm Radio Flux // *ApJL*, 757, L8. doi:10.1088/2041-8205/757/1/L8 2012.
3. Hofmeister S. J., Veronig A., Reiss M.A., Temmer M, Vennerstrom S., Vrsnak B., Heber B. / Characteristics of low-latitude coronal holes near the Maximum of Solar Cycle 24 // *The Astrophysical Journal*, 835.2. 17. doi:10.3847/1538-4357/835/2/268. 2017.
4. Головки А.А. Области нового магнитного потока с быстрой эволюцией. 1. Диаграмма «магнитный поток–время жизни // *Солн. дан.*, 1986, N4, с.48. 1986.
5. Ишков В.Н., // Всплывающие магнитные потоки - ключ к прогнозу больших солнечных вспышек; *Изв. РАН, сер. физ. т. 62, N 9. С. 1835-1839, 1998.*
6. Ишков В.Н., Солнечные вспышечные суперсобытия: когда они могут происходить и энергетические пределы их реализации // *Сб. статей Межд. коллокви. «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы» Москва, ред. В.Н. Обридко, Изд. ВВМ, С.-П., 2014, с.85-98, 2014. http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/doc/astro_2014.pdf*

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В МАКСИМУМЕ ВЫСОКОШИРОТНОГО F2 СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Карпачев¹ А.Т., Чирик^{2,3} Н.В., Клименко² В.В., Клименко² М.В.

¹ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия

²КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

karp@izmiran.ru

EMPIRICAL MODELS OF ELECTRON DENSITY IN THE MAXIMUM OF THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE F2 LAYER BASED ON SATELLITES MEASUREMENTS FOR DIFFERENT LEVELS OF SOLAR ACTIVITY

Karpachev¹ A.T., Chirik^{2,3} N.V., Klimenko² V.V., and Klimenko² M.V.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²WD IZMIRAN, Kaliningrad, Russia

The results of two empirical models of high-latitude ionospheric foF2 based on satellite data are compared for minimum and maximum level of solar activity. In general, we reveal a good agreement of model results based on different data sources that is positive news for both models. The agreement of the models is worse at solar activity maximum. This may be due to the low level of solar activity in the 23 and 24 solar cycles, which data were the source of one model development.

Высокоширотный F2 слой ионосферы представляет собой наиболее сложную часть ионосферы для эмпирического моделирования. Это объясняется различными факторами: сложным и изменчивым магнитосферно-ионосферным взаимодействием, приводящим к формированию на различных высотах ионосферных неоднородностей различных масштабов; наличием области авроральных высыпаний, которая представляет собой большую помеху для вертикального зондирования F2 слоя ионосферы; недостаточным покрытием наземными средствами мониторинга ионосферы. Несмотря на несомненные успехи, достигнутые в эмпирическом моделировании ионосферы, точность описания параметров F2 слоя высокоширотной ионосферы современными глобальными эмпирическими моделями, включая стандартизованную модель IRI [1], явно недостаточна для решения прикладных задач радиосвязи, радиолокации и позиционирования. В частности, было показано, что эмпирическая модель IRI не описывает как временные вариации высокоширотной ионосферы [2], так и ее широтную структуру вместе с ее основной морфологической особенностью, главным ионосферным провалом [3]. Основная причина последнего детально описана Деминовым и др. [4] и заключается в особенностях работы наземных ионозондов в высокоширотном регионе. Нами были разработаны две эмпирические модели F2 слоя высокоширотной ионосферы на основе данных спутниковых наблюдений: мо-

дель Главного Ионосферного Провала (ГИП), детально описанная в [3], и модель F2 слоя ионосферы, основанная на данных радиозатменных наблюдений.

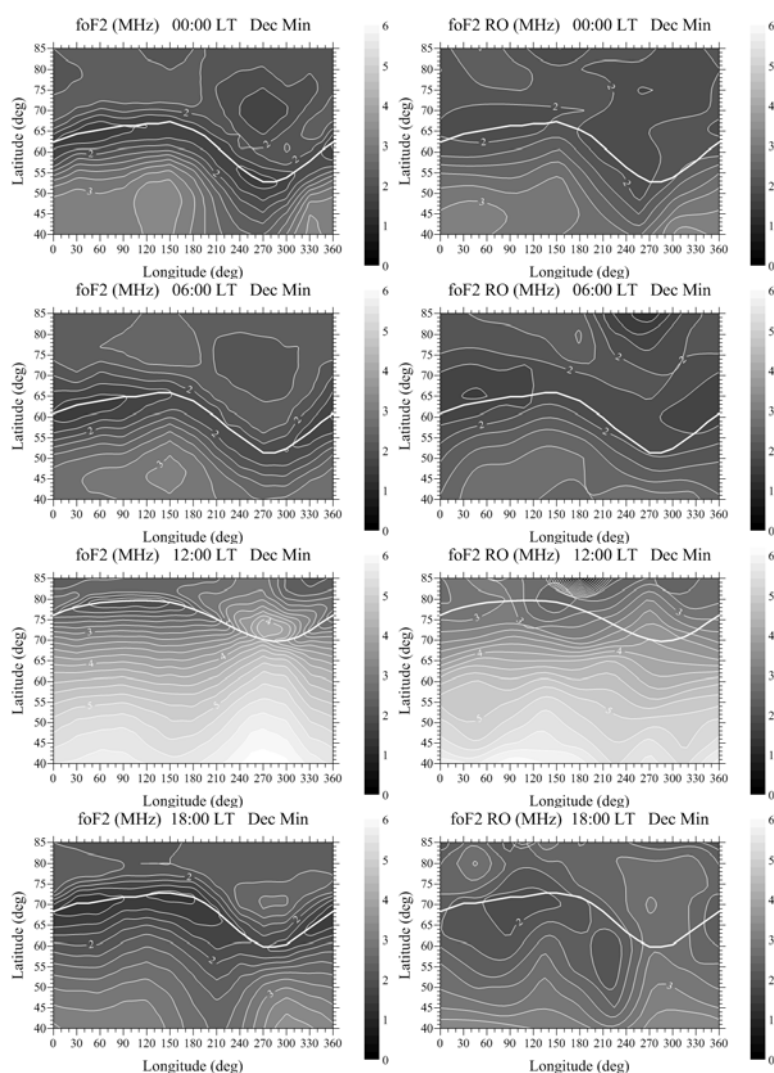


Рис. 1. Карты долготно-широтных распределений критической частоты f_oF2 в северном полушарии, полученные для 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 LT для условий зимнего солнцестояния в минимуме солнечной активности в модели MIT (слева) и в модели, основанной на данных радиозатменных наблюдений (справа). Белой линией показано положение минимума провала, полученное в модели MIT.

В данном исследовании проведено сравнение распределений электронной концентрации в максимуме F2 слоя ионосферы в области ГИП, полученных в двух упомянутых выше эмпирических моделях. Отметим, что модель ГИП построена по данным пролетных *in situ* измерений электронной концентрации спутниками Космос-900 (1978–1979 гг.) и CHAMP (2000–2010 гг.), и данным внешнего зондирования ионосферы на спутнике Интеркосмос-19 (1979–1981 гг.). Вторая наша модель построена на основе созданной базы данных радиозатменных (P3) наблюдений в экспериментах CHAMP (июнь 2001 г. – январь 2008 г.), GRACE (февраль 2007 г. – март 2015 г.) и COSMIC

(февраль 2006 г. – апрель 2017 г.). Все эти данные были получены с сайта: sdaac-ftp.cosmic.uscar.edu. Радиозатменные наблюдения дают глобальный охват $F2$ области ионосферы, но имеют два серьезных недостатка. Во-первых, они рассчитываются с некоторыми допущениями, которые в 15-20% случаев приводят к неверным значениям $foF2$, которые следует отбраковывать [5]. Во-вторых, широтный профиль $foF2$ может быть получен только усреднением РЗ данных за большой период времени, что тоже, как показывает анализ, может приводить к большим ошибкам. Данные РЗ наблюдений в большей степени относятся к низкой солнечной активности. Самые высокие значения $F_{10.7} \sim 200$ s.f.u. наблюдались только в 2001-2002 гг. и ~ 150 s.f.u. в 2014-2015 гг. Зависимость $foF2$ от $F_{10.7}$ в построенной нами модели находилась на основании линейной регрессии.

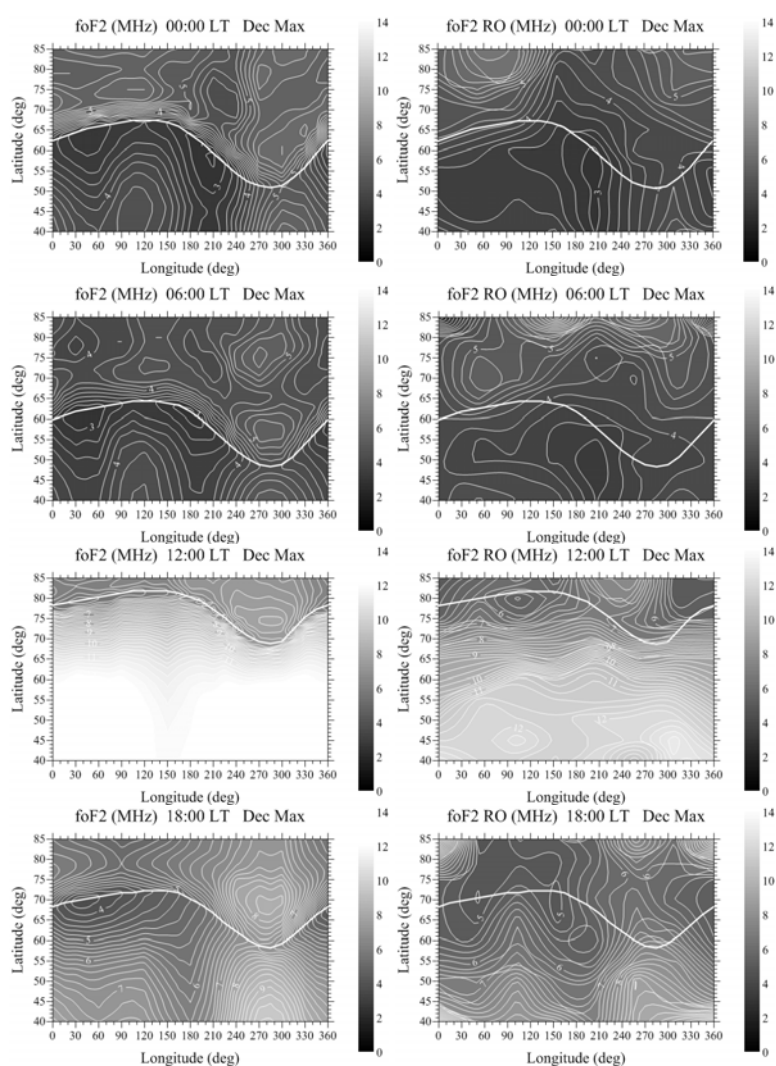


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для максимума солнечной активности.

На рисунках 1 и 2 представлены карты распределения $foF2$ в области главного ионосферного провала в северном полушарии, построенные с использованием результатов двух эмпирических моделей для низкой ($F_{10.7}=70$)

и высокой ($F_{10.7}=200$) солнечной активности в период зимнего солнцестояния для различных моментов LT. Для всех представленных карт характерно существование ГИП, т.е. наличие относительно высоких значений $foF2$ на средних широтах, понижение $foF2$ при смещении на субавроральные широты и затем возрастание на более высоких широтах. Видно, что наиболее глубокий ГИП наблюдается на долготах восточного полушария, при этом он наиболее четко выражен в Европейском долготном секторе. В Американском долготном секторе провал более узкий и менее глубокий. Сравнивая $foF2$ в области ГИП, можно отметить в целом хорошее согласие модели ГИП с результатами модели, построенной по данным радиозатменных наблюдений. Это согласие пространственно-временных распределений значений $foF2$, основанных на экспериментальных данных, полученных различными методами, и их соответствие ранее выявленным морфологическим особенностям ГИП [3], позволяет судить об адекватности и надежности двух моделей. Следует, однако, отметить, что результаты моделей лучше согласуются между собой в минимуме солнечной активности. В максимуме солнечной активности положения ГИП в этих моделях значительно различаются по широте. Это может быть связано с тем, что модель ГИП для максимума солнечной активности построена по данным спутника ИК-19, летавшего в годы очень высокой солнечной активности ($F_{10.7}=180-250$), а данные радиозатменных наблюдений приходятся на 23 и 24 солнечных циклы с более низким уровнем солнечной активности.

Работа по созданию моделей выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-77-20009, а их сравнение за счет средств гранта РФФИ №18-55-52006.

Литература

1. Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Adv. Space Res.* V. 42. P. 599–609. 2008.
2. Themens D.R., Jayachandran P.T., Nicolls M.J., MacDougall J.W. A top to bottom evaluation of IRI 2007 within the polar cap // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 119. P. 6689–6703. 2014.
3. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* V. 146. P. 149–159. 2016.
4. Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Свойства медианы критической частоты F2-слоя в ночной субавроральной ионосфере при низкой и средней солнечной активности // *Геомаг. и Аэрон.* Т. 56. №6. С. 1–7. 2016.
5. Чирик Н.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Карпачев А.Т., Ратовский К.Г., Коренькова Н.А. Принципы обработки и отбора данных радиозатменных наблюдений для исследования F2-слоя ионосферы // *Химическая физика.* Т. 36. № 12, С. 66–74. 2017.

РЕЖИМ С ОБОСТРЕНИЕМ, СТРУКТУРЫ, НЕСИНГУЛЯРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Ковалев В.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, vic.kov@yandex.ru

THE BLOWUP REGIME, STRUCTURES, NONSINGULAREVOLUTION

Kovalev V.A.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

It is shown that evolution of systems of the different nature can be described by nonsingular transition from accelerated to a delayed phase at the maximal increment as a result of decrease of a drain (cooling, braking).

Известную роль в научных исследованиях играют междисциплинарные подходы, в частности, «синергетическое понимание солнечных вспышек» [1]. Представляют интерес решения квазилинейного уравнения теплопроводности, полученные при изучении проблемы управляемого термоядерного синтеза [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_0 T^\sigma \operatorname{grad} T) + q_0 T^\beta, \quad (1)$$

где $T=T(r,t)$ - температура, $\lambda_0 T^\sigma$ - коэффициент теплопроводности, $q_0 T^\beta$ - источник нагрева. При $\beta > 1$, $\lambda_0 > 0$, $\sigma > 0$ процесс горения, идущий в режиме с обострением, проявляется в возникновении пространственно локализованных тепловых структур, внутри которых максимальная температура неограниченно возрастает за конечное время сингулярности τ :

$$T(t) = \frac{T_0}{(1-t/\tau)^{\frac{1}{\beta-1}}}, \quad \tau = \frac{1}{(\beta-1)q_0 T_0^{\beta-1}}, \quad \beta > 1. \quad (2)$$

В зависимости от значений β и σ , обуславливающих конкуренцию нелинейных процессов: нагрева (источника) и теплопроводности, существует три типа режимов с обострением, определяемых автомодельными решениями. 1) *HS*-режим, неограниченное расширение. При $1 < \beta < \sigma + 1$ решение представляет собой тепловую волну, амплитуда и фронт которой увеличиваются в режиме с обострением. 2) *S*-режим, остановившийся фронт. При $\beta = \sigma + 1$ соответствующее решение описывает нестационарную структуру, локализованную в области, имеющей определенный размер. 3) *LS*-режим, локализация тепла. При $\beta > \sigma + 1$ формируются структуры с сокращающейся полшириной, то есть, наблюдается эффект «самофокусировки» тепла.

Приведенное решение (2) в некотором смысле указывает на то, что настоящее $T(t)$ содержит не только прошлое $T_0 = T(0)$, но и будущее: $t \rightarrow \tau$,

$T \rightarrow \infty$, которое можно «спрогнозировать». По этой причине базисная модель (1), (2) достаточно популярна и часто не вполне обоснованно используется в различных приложениях. Попытаемся выяснить, возможны ли обсуждаемые режимы во время солнечных вспышек? Хотя задача нестационарного нагрева магнитной трубки в импульсной фазе вспышки решалась многократно путем численного расчета системы уравнений гидродинамики, ответа на поставленный вопрос до сих пор нет. Для исследования ограничимся уравнением энергии для неподвижной плазмы:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_0 T^\sigma \operatorname{grad} T) + q(T), \quad (3)$$

где $\varepsilon = 3nk_B T$ – внутренняя энергия, $n = n_0 T^\chi$ – концентрация заряженных частиц в плазме; $q(T) = Q(T) - \mathcal{L}(T)$ – обобщенный источник, включающий нагрев $Q(T) = Q_0 T^\beta$ и лучистое охлаждение $\mathcal{L}(T) \approx n^2 L_0 T^{-\alpha}$. При отсутствии охлаждения и $\chi = 0$ уравнение (3) переходит в (1). Учитывая анизотропность плазмы с классической теплопроводностью вдоль и поперек магнитной трубки: $\sigma_{\parallel}^e = 5/2$, $\sigma_{\perp}^e = -1/2$, условия локализации тепла, соответственно, имеют вид: $\beta > 7/2$ и $\beta > 1/2$. В случае, когда вспышки сопровождаются перетяжками магнитных трубок и формированием коллапсирующих магнитных ловушек $\beta = 3/2$ [3], локализация тепла (*LS*-режим) возможна только в поперечном сечении трубки. Численно исследованы различные типы режимов нагрева, которые могут возникать в анизотропной плазме солнечной вспышки. Показано, что при определенных условиях могут формироваться тепловые структуры, температура которых возрастает в режиме с обострением, поперечная полуширина сокращается, а продольная полуширина увеличивается со временем [4].

Если характерный масштаб изотропной теплопроводности сравним с наблюдаемой толщиной магнитной трубки (сотни км), то характерный масштаб поперек магнитного поля не наблюдаем и составляет < 100 м.

В работе [5] получены установившиеся в результате тепловой неустойчивости стационарные решения уравнений двухжидкостной МГД в виде стоячих термомангнитных волн - мелкомасштабных периодических ячеек, ограниченных горячими «стенками». Во время вспышечного нагрева происходит «самофокусировка» тепла, сопровождаемая уменьшением фактора заполнения вспышечного объема горячей плазмой в результате сокращения полуширины горячих «стенок». Наблюдаемый на ранней фазе вспышки эффект «уменьшения меры эмиссии» [6] можно связать с уменьшением фактора заполнения вспышечного объема из-за уменьшения полуширины структур [7].

С другой стороны, при наличии микроструктуры поперечного сечения магнитной трубки значительно (на несколько порядков) возрастает скорость диссипации диамагнитного тока. В [8] рассмотрен соответствующий механизм нагрева короны. Показано, что для поддержания нагрева, компенса-

рующего большие лучистые потери горячей плазмы, достаточно классической проводимости. Области с относительно сильным магнитным полем, разделены областями с повышенным газовым давлением и более слабым магнитным полем. Диамагнитные токи уменьшают магнитное поле в горячих областях на величину избыточного газового давления в них. Охлаждение, уменьшающееся с ростом температуры, способствует локализации («самофокусировке») тепла и нагрева плазмы.

В [7] с помощью дифференциального параметра (инкремента): $H = T'/T$ проведен анализ вспышечного нагрева. Величина H^{-1} является временным масштабом процесса; $H = \text{const}$ соответствует экспоненциальному закону $T(t)$. Считаем условно, что режим нагрева ускоренный (сверхэкспоненциальный), если $H(t)$ возрастает. При замедленном возрастании температуры $H(t)$ уменьшается. Очевидно, режим с обострением является ускоренным. По данным наблюдений ряда вспышек в мягком рентгеновском диапазоне обнаружено, что на временах >10 с нагрев плазмы двухступенчатый: ускоренный + замедленный, с максимумом инкремента $H(t)$. Возникает вопрос: если считать, что $\beta > 1$ и наблюдаемый ускоренный нагрев происходит в режиме с обострением, то с чем связано его подавление, то есть, переход к замедленному режиму ($\beta < 1$)?

Такой вопрос не возникает в случае альтернативного сценария, в котором двухступенчатость нагрева с максимумом инкремента $H(t)$ происходит автоматически при источнике со слабой нелинейностью: $\beta < 1$. В этом случае «доускорение» нагрева связано с уменьшением охлаждения. Обобщенный источник может быть представлен степенно-показательной функцией с переменным эффективным показателем степени: $\beta_{\text{эф}} = \beta_{\text{эф}}(T)$. Квазигиперболический закон роста $T(t)$ вблизи точки равновесия с $\beta_{\text{эф}}(T) > 1$ и возрастающим τ при $\beta_{\text{эф}} = 1$ переходит в экспоненциальный ($\tau \rightarrow \infty$), сингулярная точка удаляется и, далее, нагрев становится замедленным, источник проявляется «в чистом виде» $\beta_{\text{эф}} = \beta$. Наблюдаемое двухступенчатое возрастание радиопотока во время вспышки привело к выводу о преимущественно замедленном режиме ускорения заряженных частиц [9].

Таким образом, возможны два альтернативных варианта развития как природных, так и техногенных и социальных систем [10]: 1) при $\beta > 1$ режим с обострением с монотонным возрастанием инкремента; 2) $\beta < 1$ двухступенчатый (ускоренный + замедленный) сценарий при несингулярной эволюции за счет уменьшающегося стока (охлаждения, торможения).

Однако, при объяснении наблюдаемых неоднократных переключений режимов, возникают определенные трудности. Во время вспышки C2.7/SF5.07.2009 [7], начавшейся с ускоренного нагрева плазмы: от фоновой температуры 0.7 кэВ до максимальной 1.7 кэВ за 280 с наблюдались три локальных максимума $H(t)$, что, по-видимому, связано с возможной линейчатой зависимостью функции охлаждения $L(T)$ в области температур (0.7–1.1) кэВ.

Анализ усредненных среднемесячных значений чисел Вольфа и потока радиоизлучения $F_{10.7}$ позволил обнаружить на фазах роста солнечных циклов осцилляции параметра $H(t)$ длительностью от нескольких месяцев до нескольких лет [11].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 17-02-00308).

Литература

1. Могилевский Э.И. Фракталы на Солнце, М. Физматлит, 152 С., 2001.
2. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука. 1987.
3. Ковалев В.А., Сомов Б.В. О роли столкновений при ускорении частиц в магнитных ловушках солнечных вспышек // Письма в АЖ, Т.29, № 6. С.465-472. 2003.
4. Куркина Е.С., Куретова Е.Д., Ковалев В.А. Математическое моделирование динамики нагрева плазмы в магнитной трубке во время солнечных вспышек. // Прикладная математика и информатика. М.: Изд-во факультета ВМК МГУ, 2018 (в печати).
5. Ковалев В.А., Лаптухов А.И. Термомагнитные периодические структуры в солнечной плазме // Физика плазмы. Т.35. № 5. С.361-365. 2009.
6. Ковалев В.А., Костюченко И.Г., Савченко М.И., Чариков Ю.Е. Быстрый и медленный режимы солнечной вспышки 5.07.2009 // Динамика сложных систем–XXI век. Т. 9. №3. С.78-84. 2015.
7. Ковалев В.А., Куркина Е.С., Куретова Е.Д. К самофокусировке тепла во время солнечных вспышек // Физика плазмы. Т.43. № 4. С.485-490. 2017.
8. Ковалев В.А. Возможный механизм усиления диссипации диамагнитного тока при нагреве магнитных трубок на Солнце // Физика плазмы. Т.44. № 2. С.226-228. 2018.
9. Горгуца Р.В., Ковалев В.А., Костюченко И.Г., Маркеев А.К., Соболев Д.Е., Фомичев В.В. Радиоизлучение солнечной вспышки 2.02.2010г. и режимы ускорения электронов // Геомагнетизм и аэрономия. Т.55. №3. С. 1- 5. 2015.
10. Ковалев В.А. Ускоренная несингулярная эволюция // Сложные системы. №3(24). С. 53-61. 2017.
11. Биленко И.А., Иванов-Холодный Г.С., Ковалев В.А. О нелинейных источниках ускорения и замедления солнечной активности // Нелинейный мир. Т.9. №6. С.378 -383. 2011.

ИЗМЕНЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ КОРОВЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЗЛИЧНЫХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОНАХ

Корсунова Л.П., Легенька А.Д.
ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
lpkors@rambler.ru

CHANGES IN THE IONOSPHERE BEFORE THE STRONG CRUSTAL EARTHQUAKES IN DIFFERENT SEISMIC ZONES

Korsunova L.P., Legenka A.D.
IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The analysis of changes in the ionosphere from measurements at stations of vertical sounding of the ionosphere before earthquakes with $M = 6.1 \div 7.2$, occurred on the Eurasian continent and in the Pacific region was carried out. Deviations from the background values of the critical frequency of the regular layer F2 ($foF2$), the limiting frequency of reflections from the sporadic layer E ($foEs$) and the virtual height of Es ($h'Es$) for 1 to 4 days prior to the earthquake are considered. It is shown that anomalous changes in $foF2$ and $foEs$ and an increase in $h'Es$ are observed before all the earthquakes considered. These anomalies appear almost simultaneously at monitoring stations separated by hundreds of kilometers for 1 - 2 days before both continental and marine earthquakes. It is concluded that the detected ionospheric anomalies may be short-term ionospheric precursors of strong earthquakes.

В физической системе Солнце-Земля есть много актуальных проблем, одной из которых является проявление эффектов солнечной активности (СА) в околоземном космическом пространстве и в самой Земле. В работе [1] рассмотрен один из аспектов этой проблемы, а именно связь СА с сейсмичностью Земли. На основе сравнительного анализа данных о числах Вольфа и магнитудах землетрясений, произошедших с 1900 по 2002 гг., было показано, что существует значимая антикорреляция 11-летних циклов СА и таких же циклов в изменении общей энергии сильных землетрясений. Вследствие литосферно-ионосферного взаимодействия просматриваются и соответствующие изменения в ионосфере, связанные с землетрясениями. Так, авторы [2] обнаружили некоторые различия в поведении спорадического слоя E ионосферы (E_s) перед землетрясениями в периоды высокой и низкой СА. Учитывая, что наибольшую опасность для населения Земли представляют сильные землетрясения с магнитудой $M > 6.0$, число которых возрастает в годы низкой активности Солнца, представляется важным изучение изменений в ионосфере на заключительной стадии подготовки таких землетрясений. Поэтому целью настоящей работы было исследование вариаций параметров ионосферных слоев E_s и F2 перед землетрясениями с $M > 6.0$ как на Евразийском континенте, так и в Тихоокеанском регионе.

Для изучения изменений в ионосфере перед сильными землетрясениями была применена разработанная нами оригинальная методика выделения воз-

возможных ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) по одновременным измерениям четырех параметров [3]: действующей высоты Es ($h'Es$), предельной частоты Es ($foEs$), частоты экранирования Es ($fbEs$), а также критической частоты регулярного слоя F2 ($foF2$). Идентификация возможных ИПЗ проводилась на основе определенного набора морфологических признаков в отклонениях перечисленных параметров от их фоновых значений, соответствующих геомагнитно-спокойным условиям (индекс планетарной геомагнитной активности $Kp < 3$). Критерии отбора ионосферных «аномалий» (вероятных ИПЗ), были следующими: 1) превышение всеми выделенными отклонениями величины своей стандартной ошибки для соответствующего временного интервала наблюдений; 2) длительность существования каждой такой ионосферной «аномалии» должна составлять характерное время $\tau = 1 \div 3$ часа, а сама «аномалия» – наблюдаться для всех рассматриваемых параметров в один и тот же суточный интервал времени. Эффективность этой методики в эпигнозе была проверена для ряда землетрясений Камчатского региона с помощью оценки Хансена-Койпера в работе [4], при этом оказалось, что величина $Rscore = 0.82$ (значение $Rscore = 1$ соответствует 100% вероятности обнаружения ИПЗ). В соответствии с принятой методикой были обработаны данные ионосферных измерений в период подготовки землетрясений в Италии (06.04.2009, $M = 6.3$; 20.05.2012, $M = 6.1$), в Туве (27.12.2011, $M = 6.6$; 26.02.2012, $M = 6.7$), вблизи г. Иркутска (27.08.2008, $M = 6.1$), а также 14 землетрясений в Тихоокеанском регионе (Япония).

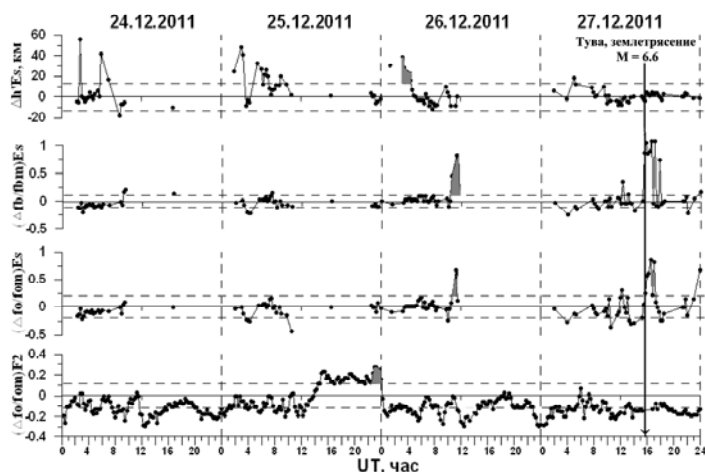


Рис. 1.

В качестве примера на Рис. 1 представлены суточные изменения отклонений в ионосферных параметрах перед одним из Тувинских землетрясений. Темной заливкой отмечены идентифицированные нами возможные ИПЗ этого землетрясения, а сплошная вертикальная линия со стрелкой указывает момент подземного толчка.

Как следует из Рис. 1 и анализа выделенных аномалий для всех рассмотренных землетрясений, наиболее существенные изменения в ионосфере происходят в спорадическом слое E, действующая высота которого и характерные частоты значительно возрастают. При этом $foF2$ изменяется в мень-

шей степени. Аномалии в ионосферных параметрах перед всеми сильными землетрясениями фиксируются, как правило, с упреждением момента землетрясения $\Delta T = 1 \div 2$ суток.

Детальный анализ ионосферных аномалий, выделенных перед рассмотренными нами землетрясениями с $M = 6.1 \div 7.0$, показывает что:

а) ионосферные параметры изменяются в широких пределах как для континентальных, так и для морских землетрясений Тихоокеанского региона. При этом $h'Es$ возрастает от 15 до 60 км, $foEs$ увеличиваются на 20÷75%, а $foF2$ на 15÷30%. Для 14 рассмотренных землетрясений Тихоокеанского региона (Япония) средние значения отклонений в ионосферных параметрах составляют: $\langle \Delta h'Es \rangle \approx 30$ км, $\langle \Delta foEs / fomEs \rangle \approx 40\%$, $\langle \Delta foF2 / fomF2 \rangle \approx 20\%$. Значительный разброс величин отклонений может быть связан как с различным состоянием ионосферы перед разными землетрясениями, так и со спецификой каждого отдельного землетрясения. Кроме того, ионосферные станции находятся на разных эпицентральных расстояниях (R), так что отклик ионосферы на процесс подготовки землетрясения может оказаться разным даже для землетрясений с одинаковой магнитудой;

б) несмотря на отсутствие видимых различий в величинах отклонений в ионосферных параметрах для континентальных и морских землетрясений, наблюдаются некоторые отличия во времени появления ионосферных аномалий. Так, на континенте среднее время упреждения толчка соответствующей ионосферной аномалией $\langle \Delta T \rangle \approx 1.5$ суток, тогда как для морских землетрясений в регионе Японии $\langle \Delta T \rangle \approx 1.1$ суток. Однако, для подтверждения реальности этого различия, необходимо исследовать большее количество континентальных землетрясений.

Надежность идентификации ИПЗ может быть повышена с помощью анализа одновременных измерений ионосферных параметров на нескольких (минимально на двух) разнесенных на сотни километров ионосферных станциях, входящих в область подготовки землетрясения. Рис. 2 иллюстрирует этот подход, реализованный в [5]. Ниже на рисунке приведены временные вариации отклонений в ионосферных параметрах перед землетрясением 14.01.1978 г. с $M = 6.5$ на двух наземных станциях вертикального зондирования ионосферы (Кокубунджи и Акита), удаленных на несколько сотен километров друг от друга. Видно, что выделенные ионосферные аномалии (показаны темной заливкой), предшествующие землетрясению (момент толчка показан вертикальной линией со стрелкой), проявляются над обеими станциями практически одновременно. Кроме того, величины соответствующих отклонений больше на станции, расположенной ближе к эпицентру землетрясения.

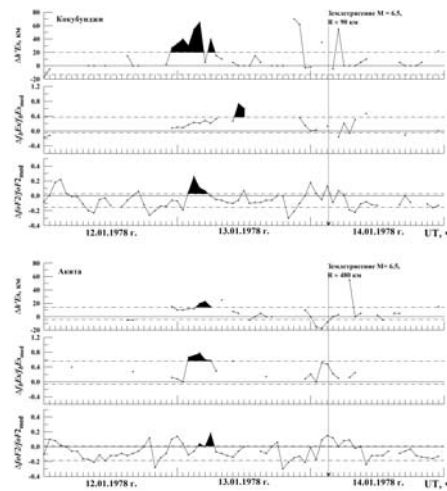


Рис. 2.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Анализ изменений в ионосфере перед сильными землетрясениями показал, что как в континентальной Евразии, так и в регионе Японии за 1÷2 дня до землетрясения происходят значимые отклонения ряда ионосферных параметров от фоновых значений.

2. При одновременных наблюдениях на двух наземных станциях вертикального зондирования ионосферы, разнесенных на сотни километров и входящих в зону подготовки соответствующего землетрясения, аномалии в ионосферных параметрах (предполагаемые ИПЗ) проявляются в течение одних и тех же суток.

Литература

1. Шестопалов И. П., Харин Е. П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений, III Междунар. конф. с. Паратунка Камч. обл. 16-21 августа 2004, сб. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. С. 130-141.
2. Липеровская Е.В., Богданов В. В., Родкин М. В., Мейстер К. В., Васильева Н. Э., Олифинов А. В. Суточная зависимость возмущений в спорадическом слое Es ионосферы в связи с землетрясениями по материалам станций вертикального зондирования «Петропавловск-Камчатский» и «Кокубунжи» (Токио) / Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: сб. докладов IV междунар. конф. с. Паратунка Камч. обл., 14-17 авг. С. 385–390. 2007.
3. Korsunova L. P., Khagai V. V. Analysis of seismoionospheric disturbances at the Chain of Japanese stations for vertical sounding of the ionosphere // Geomagn. Aeron. V. 48. Iss. 3. P. 392–399. 2008. <https://doi.org/10.1134/S0016793208030134>
4. Korsunova L. P., Hegai V. V. Effectiveness criteria for methods of identifying ionospheric earthquake precursors by parameters of a sporadic E layer and regular F2 layer // Journal of Astronomy and Space Sciences. 2015. V. 32. No. 2. P.137–140.
5. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Возможные краткосрочные предвестники сильных коровых землетрясений в Японии по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 58. № 1. С. 94–101. 2018. DOI: 10.7868/S001679401801008X.

INFLUENCE OF CYCLONES ON THE PLASMA PARAMETERS OF THE UPPER IONOSPHERE IN THE TWO-YEAR PERIOD AFTER THE MOUNTS PINATUBO AND HUDSON ERUPTIONS

Kostin¹ V.M., Belyaev¹ G.G., Ovcharenko¹ O.Ya., Trushkina¹ E.P.

¹*IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

kostin@izmiran.ru

The influence of tropical cyclones (TCs) on the redistribution of oceans energy during the disturbed stratosphere by the products of eruptions of the super volcanoes Pinatubo and Hudson is considered. The perturbations of the upper ionosphere above TCs are analyzed from the data of the Cosmos-1809 satellite received in 1991-1992. It is shown that some characteristics of the TCs dynamics can be explained by the features of the propagation and absorption of infrasonic oscillations generated in TC structures.

The main part of the solar energy absorbed by the earth's surface is in the zones of tropical oceans. Tropical cyclones are the most powerful mechanism of heat exchange between oceans and atmosphere. During the eruption of super volcanoes, aerosol emissions reach stratospheric heights and reflect some solar radiation. The eruption of Pinatubo volcano in June and Hudson volcano in August 1991 led to the cooling of the Earth's surface on average by 0.5 degrees for 4 years. According to the satellite Cosmos-1809 data, the maximum average plasma density of the upper ionosphere in 1991-92 decreased almost twofold [1].

The influence of the super volcanoes eruption on the atmosphere is considered in many works: climatic effects [2], the dynamical influence of the Pinatubo eruption to the subtropical stratosphere [3] and an increase of the stratosphere average temperature by 3-4 K at a level of 30 - 50 hPa [4].

The Accumulated Cyclone Energy (ACE) index in the table indicates a sharp change in energy transmitted by tropical cyclones. The ACE index is a wind energy index, defined as the sum of the squares of the maximum sustained surface wind speed (knots) measured every six hours for all named systems, while they are at least tropical storm strength.

$$ACE = \Sigma(I(\text{knot})^2/10000)$$

Table 1.

Year	Region	Accumulated Cyclone Energy	Tropical Storms	Hurricanes	Major Hurricanes
1990	Atlantic	91	14	8	1
1991	Atlantic	34	8	4	2
1992	Atlantic	75	7	4	1
1990	Pacific	249	21	16	6
1991	Pacific	178	14	10	5
1992	Pacific	290	28	16	10

The region of developed single TC reaches an altitude of about 1500 km [5]. Such TC height set up when at the tropopause heights high-altitude anticyclone is formed due to acoustic impact from lightning discharges, and a vertical submerged jet arises in the stratosphere. Neutral atoms of the submerged jet reaching a height of about 200 km fly along ballistic trajectories [6].

Passing a large island, there is a slope of the structure of the TC. The reason is the action of the moment of forces arising from the braking of the base of the TC and the wind pressure at the altitudes of the troposphere that is shown in Fig. 1. The resulting plasma effects are consistent with suggested scheme [6].

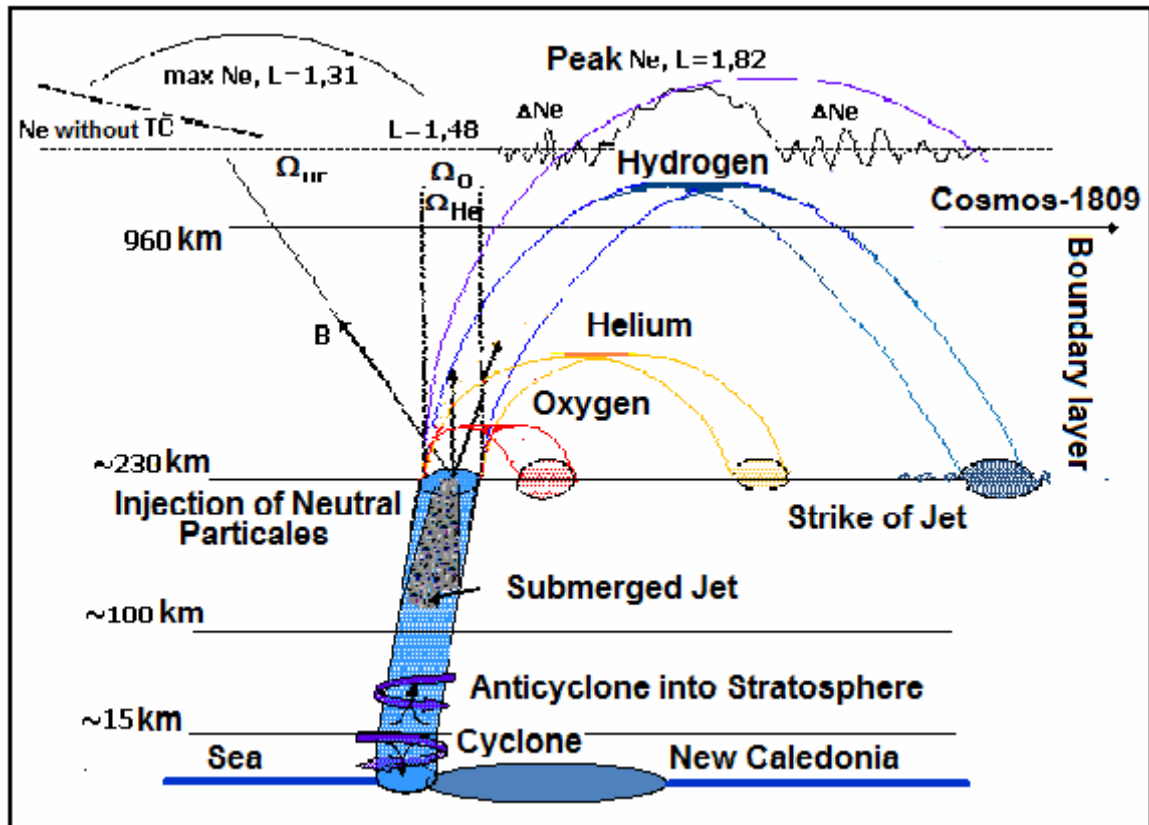


Fig. 1. Scheme of the impacts on the ionosphere TC Harry, while passing the island of New Caledonia.

The dustiness of the stratosphere and its heating after the eruption of super volcanoes [4] changes the trajectories of individual infrasonic waves. This mechanism is proposed to explain the appearance of a sequence of interacting TCs [1]. The stratospheric wind flows around the interacting TCs as shown in Fig. 2. Vortex perturbations are transmitted along the stream and the synchronous development of the three TCs occurs in accordance with the Karman theory [1].

El Niño-Southern oscillation led to an increase in cyclonic activity in the Pacific Ocean in autumn 1992. In this period the strongest TCs are observed which are shown in Fig. 3.

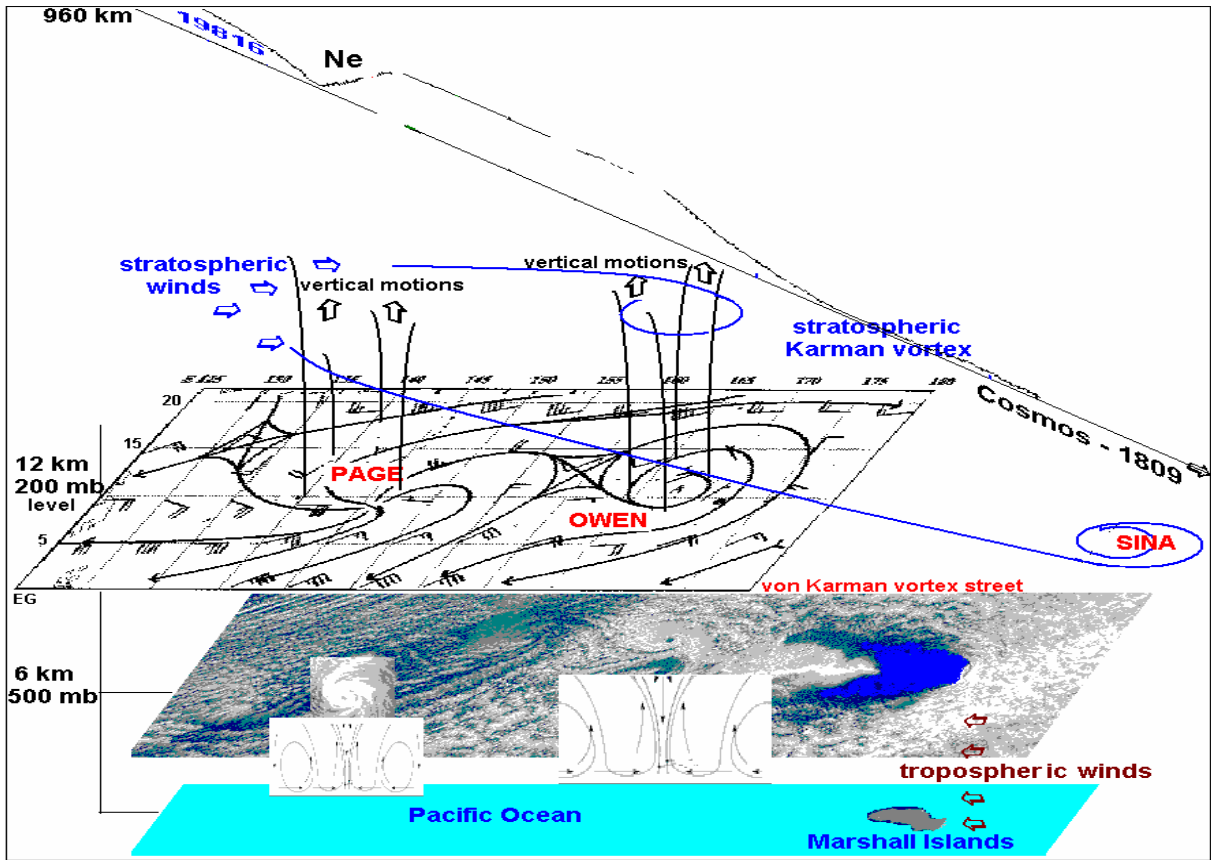


Fig.2. Scheme of TC Page, Owen and Sina interaction

Dynamics of intensity and trajectory of movement of the TCs show that:

1. TC Forrest and TC 10B interacted under the influence of the monsoon on November 12-13.
2. Typhoons Gay, Hunt and Forrest interacted on November 16-21.

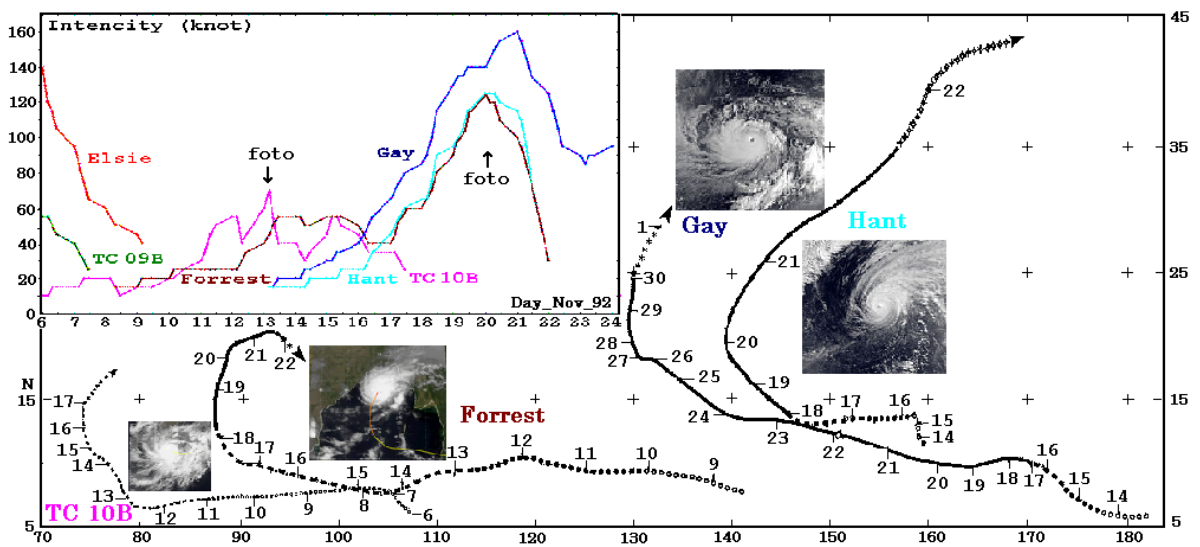


Fig.3. Dynamics of typhoons in the Pacific and Indian Oceans in November 1992.

Typhoon Gay was the strongest and longest-lasting storm of the season. The [Joint Typhoon Warning Center \(JTWC\)](#) estimated its peak winds of 295 km/h (160 knot) and a minimum barometric pressure of 872 mb which would have made Typhoon Gay the most intense typhoon since [Typhoon Tip](#) in 1979 to [Hurricane Patricia](#) in 2015 (the second-strongest tropical cyclone worldwide).

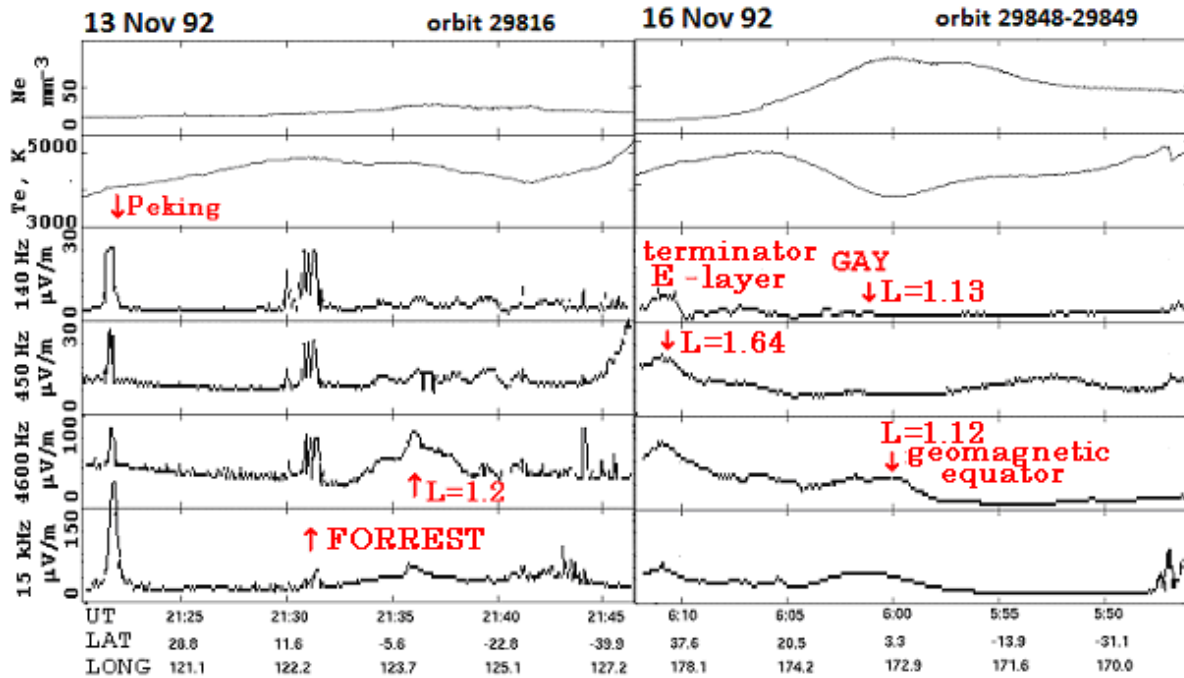


Fig.4. Plasma parameters of the upper ionosphere along TC meridians in the process of development.

In the first case, after the dissipation of the TC 10B the lightning discharges of Typhoon Forrest cause the development of the ELF-VLF turbulence in the ionosphere that is shown in the left part of Fig.4. In the second case the beginning of typhoon interaction is shown in the right part of Fig.4. Typhoon Gay causes the development of Hunt and Forrest in a scenario similar to that shown in Fig.2. The perturbations in the ionosphere sharply decrease as demonstrated in the right-hand side of Fig.4.

The results obtained by the authors and partially presented in the report allow us to better understand the processes that are taking place due to the interaction of TCs with the ocean and surrounding atmospheric structures.

References

1. Boychev B., Belyaev G., Kostin V., et al. // SunGeo. V. 13. Id.1. P. 31. 2018.
2. Graf H.-F., Kircher I., Robock A., et al. // Climate Dynamics. V. 9. Id. 2. P. 81. 1993.
3. Hampson J., Claud C., Keckhut P. // Atm. Sol.- Terr. Phys. V. 68. Id. 14. P. 1600. 2006.
4. Labitzke K. // J. Atm. Terr. Phys. V. 56. Id. 9. P. 1027. 1994.
5. Isaev N., Kostin V., Belyaev G., et al. // Geomagn. Aeron. V. 50. Id. 2. P. 243. 2010.
6. Belyaev G., Boychev B., Kostin V., et al. // SunGeo. V. 10. Id.1. P. 31. 2015.

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Котова^{1,2} Д.С., Оводенко¹ В.Б.

¹КФ ИЗМИРАН, г.Калининград, Россия

²БФУ им. И.Канта, г.Калининград, Россия

darshu@yandex.ru

METHOD OF CORRECTION EMPIRICAL IONOSPHERIC MODEL PARAMETERS BY USING TOTAL ELECTRON CONTENT DATA

Kotova^{1,2} D.S., Ovodenko¹ V.B.

¹WD IZMIRAN, Kaliningrad, Russia

²IKBFU, Kaliningrad, Russia

The article describes the method of updating ionospheric model based on the slant TEC data. The basis of the method is to minimize the discrepancy between the measured and the modeled TEC, which is provided by the search of the control parameter of the model. Two stages of updating technique and results on the evaluation of the efficiency according to the ionosonde data of vertical sounding in Sodankyla are described. The reduction in the foF2 error after updating of the ionospheric model at two stages for March 2014 is shown.

Для задач обеспечения эффективной работы радиотехнических систем необходимо знание состояния ионосферы в конкретном регионе. Существующие глобальные эмпирические модели ионосферы являются климатическими и дают усредненные значения основных параметров ионосферы [1]. Для повышения точности описания ионосферы развиваются различные методы ассимиляции данных или коррекции параметров ионосферных моделей по данным наблюдений в интересующем регионе исследования. Существует разнообразие средств измерений, однако мы остановимся на использовании данных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), позволяющих рассчитывать полное электронное содержание ионосферы (ПЭС) на луче спутник - приемник [2].

Данные ПЭС используются как для исследований ионосферы [3, 4], так и для коррекции эмпирических ионосферных моделей, например [5-8]. Популярность приемников ГНСС обусловлена относительной дешевизной оборудования, легкостью эксплуатации и достаточно плотному покрытию.

В работе [8] был представлен алгоритм компенсации ионосферной ошибки траекторных измерений УКВ радара, который был успешно апробирован для условий весеннего равноденствия в Калининградском регионе. Для коррекции модели в высокоширотном регионе, отличающимся высокой неоднородностью, было предложено доработать алгоритм [9]. В качестве одного из путей доработки было предложено использовать двухступенчатую процедуру коррекции. Основной принцип адаптации строится на подборе

управляющего параметра ионосферной модели таким образом, чтобы квадрат разности измеренного и моделируемого ПЭС был минимален. Обобщенная схема коррекции модели ионосферы представлена на рис. 1.

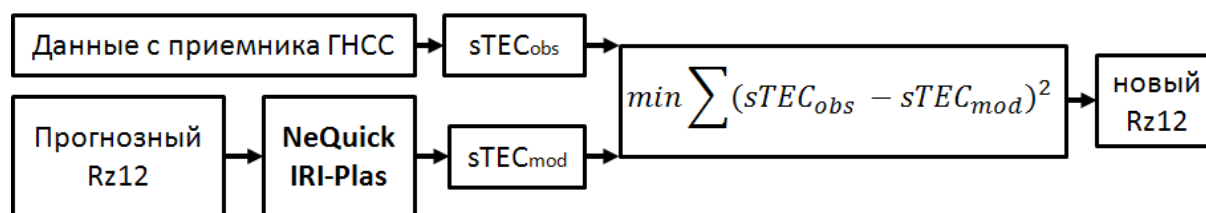


Рис. 1. Схема коррекции ионосферной модели. $sTEC_{obs}$ и $sTEC_{mod}$ – наклонное ПЭС по данным наблюдений и по результатам модельных расчетов, соответственно.

Для корректного описания модельного ПЭС до навигационных искусственных спутников Земли необходимо использовать модели, включающие плазматическое электронное содержание. Для исследований мы использовали такие модели как NeQuick [10] и IRI-Plas [11]. На рис. 2 показана схема использования данных наклонного ПЭС для первого и второго этапов коррекции ионосферных моделей. На первом этапе (Рис. 2а) используются данные с углом возвышения более 45° в полном азимутальном секторе от 0° до 360° . Для первоначального расчета модельного значения наклонного ПЭС используется прогнозное значение управляющего индекса модели (см. Рис. 1). Таким индексом может быть сглаженное число солнечных пятен Rz12 или индекс IG12, которые непосредственно влияют на параметры модели, определяющие ПЭС (например, $foF2$). Далее проводится процедура минимизации невязки по ПЭС. Результатом работы коррекции является новое значение управляющего параметра для рассматриваемого момента времени. На втором этапе коррекции (Рис. 2б) используются данные ПЭС с углом места менее 45° , при этом происходит азимутальное деление на подсектора с шагом в 20° . Для каждого подсектора рассчитывается свое значение управляющего индекса модели. Используя для расчетов на входе новые значения Rz12, получают скорректированные модельные результаты.

В качестве примера на рис. 3 представлено сравнение результатов модельных расчетов после коррекции с данными наблюдений станции вертикального зондирования (ВЗ) в Соданкюля. Коррекция модели NeQuick производилась как по данным ГНСС приемника, расположенному в Соданкюля (Рис. 3а), так и в Ловозеро на удалении 360 км от контрольной точки (Рис. 3б). Для коррекции по данным в Ловозеро имеет место использование второго этапа коррекции с азимутальным направлением в 260° . В данном случае расположение приемника ГНСС вблизи точки коррекции

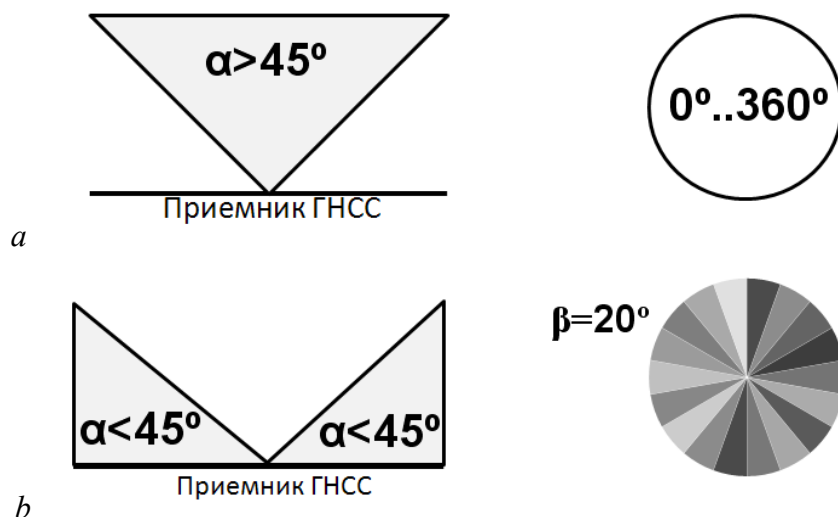


Рис. 2. Схема использования данных наклонного ПЭС с приемников сигналов ГНСС: (а) область данных, используемых для первого этапа коррекции, (б) – для второго, где α – угол места, β – азимут.

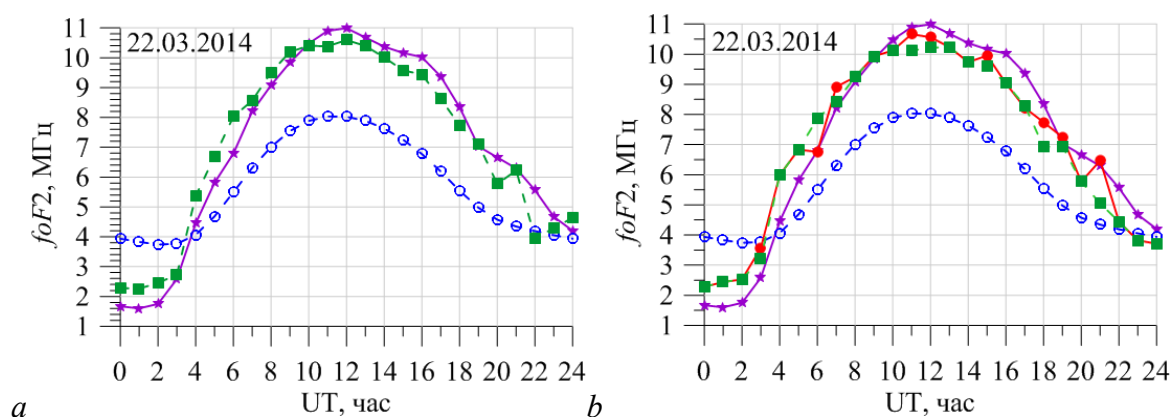


Рис. 3. Суточные вариации критической частоты $F2$ слоя над Соданкюля в день весеннего равноденствия 2014 года. Звездочкой и сплошной линией показаны данные наблюдений ВЗ, полыми кружками и пунктирной линией – результаты расчетов с прогнозным $Rz12$, квадратами и пунктирной линией – после первого этапа коррекции, заполненными кружками и сплошной линией – после второго этапа коррекции. (а) – коррекция проводилась по данным приемника ГНСС в Соданкюля, (б) – в Ловозеро.

улучшает модельное описание по сравнению с модельными расчетами без коррекции: среднеквадратическое отклонение (СКО) уменьшается с 2.21 до 0.66 МГц. Корректируя модель на некотором удалении от приемника ГНСС, получаем, что после первого этапа СКО - 0.84 МГц, а после второго - 0.73 МГц. Таким образом, второй этап уменьшил ошибку описания поведения $foF2$.

Постановка задачи, разработка методики коррекции и ее тестирование выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-20009). Использование кодов программ ионосферных моделей без коррекции выполнено за счет средств программы повышения конкурентоспособности

«5-100» БФУ им. И.Канта. Авторы выражают благодарность Ясюкевичу Ю.В. за предоставление экспериментальных данных ПЭС и Козловскому А.Е. за данные по ВЗ. Экспериментальные данные ПЭС получены в рамках Государственного задания на 2018 год № 007-00163-18-00 от 12.01.2018.

Литература

1. Pignalberi A., Pezzopane M., Rizzi R., Galkin I. Effective Solar Indices for Ionospheric Modeling: A Review and a Proposal for a Real-Time Regional IRI // *Surv. Geophys.* V. 39, N 1. P. 125–167. 2018
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems. Springer. 2008. DOI:10.1007/978-3-211-73017-1
3. Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере // *Оптика атмосферы и океана.* Т. 22(8). С. 753-759. 2009.
4. Coster A.J., Goncharenko L., Zhang S.-R., Erickson P.J., Rideout W., Vierinen J. GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse // *Geophysical Research Letters.* V. 44. P. 12,041–12,048. 2017.
5. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO Data into a Real-Time IRI // *Radio Sci.* V. 47. RS0L07. 2012.
6. Barabashov B.G., Maltseva O., Pelevin O. Near real time IRI correction by TEC-GPS data // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 978–982. 2006.
7. Migoya-Orué Y., Nava B., Radicella S., Alazo-Cuartas K. GNSS derived TEC data ingestion into IRI 2012 // *Adv. in Space Res.* V. 55(8). P. 29. 2015.
8. Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // *Adv. Space Res.* V. 56(5). P. 900-906. 2015.
9. Котова Д.С., Оводенко В.Б., Ясюкевич Ю.В., Клименко М.В., Мыльникова А.А., Козловский А.Е., Гусаков А.А. Коррекция эмпирических ионосферных моделей IRI-Plas и NeQuick в высокоширотном регионе с использованием данных отдаленных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // *Химическая физика.* Т. 37. № 7. С. 87–92. 2018.
10. Hochege G., Nava B., Radicella S., Leitinger R. A Family of Ionospheric Models for Different Uses // *Phys. Chem. Earth (C).* V. 25. № 4. P. 307-310. 2000.
11. Gulyaeva T.L. International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere // *Astron. Astrophys. Trans.* V. 22 (4). P. 639–643. 2003.

МГД УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Кузнецов В.Д., Осин А.И.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Троицк, Россия*

MHD SHOCK WAVES IN COLLISIONLESS PLASMA OF SOLAR WIND

Kuznetsov V.D., Osin A.I.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
Russian Academy of Sciences*

Results of MHD description of shock waves in collisionless plasma of the solar wind are given in the framework of 8-moment MHD approximation. Comparison is made with the similar results obtained for the CGL (Chew-Goldberger-Low) model.

Регистрация и теоретическое описание ударных волн в солнечном ветре важно для гелиофизики и проверки моделей бесстолкновительной плазмы. МГД описание ударных волн в бесстолкновительной плазме было предпринято с определенными предположениями в рамках МГД приближения ЧГЛ [1], которое имеет известные ограничения. При рассмотрении ударных волн в этом приближении, в частности, не учитывались тепловые потоки, которые могут существенно менять свойства линейных и ударных волн [2-5]. Тепловые потоки являются результатом несимметричной (немаксвелловской) функции распределения частиц в плазме, что, согласно измерениям, более реально отражает условия в солнечном ветре [6].

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla \left(p_{\perp} + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \mathbf{B} \cdot \nabla \left[\left(\frac{p_{\parallel} - p_{\perp}}{B^2} - \frac{1}{4\pi} \right) \mathbf{B} \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p_{\parallel} B^2}{\rho^3} \right) + \frac{B^2}{\rho^3} \left[\mathbf{B} \cdot \nabla \frac{S_{\parallel}}{B} - 2S_{\perp} \mathbf{B} \cdot \nabla \frac{1}{B} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p_{\perp}}{\rho B} \right) + \frac{1}{\rho B} \left[\mathbf{B} \cdot \nabla \frac{S_{\perp}}{B} + S_{\perp} \mathbf{B} \cdot \nabla \frac{1}{B} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{S_{\parallel} B^3}{\rho^4} \right) + 3 \frac{p_{\parallel} B^2}{\rho^4} \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{p_{\parallel}}{\rho} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{S_{\perp}}{\rho^2} \right) + \frac{p_{\parallel}}{\rho^2 B} \left[\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{p_{\perp}}{\rho} \right) + \frac{p_{\perp} (p_{\perp} - p_{\parallel})}{\rho p_{\parallel} B} \mathbf{B} \cdot \nabla B \right] = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{B} \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

МГД уравнения бесстолкновительной плазмы с тепловыми потоками выведены в рамках 16-ти моментного приближения [7, 8], которые при пренебрежении членами, малыми по ларморовскому радиусу, сводятся к 8-

моментному МГД приближению с замкнутой системой уравнений. Здесь 8 моментов это ρ - плотность плазмы, три компоненты скорости \mathbf{u} плазмы, давление плазмы вдоль p_{\parallel} и поперек p_{\perp} магнитного поля \mathbf{B} , тепловые потоки вдоль магнитного поля S_{\parallel} и S_{\perp} , связанные, соответственно, с продольной и поперечной компонентами теплового движения частиц плазмы.

Рассмотрение малых возмущений в рамках уравнений (1)-(8) дает две линейные волны вдоль магнитного поля [2-5] распространяющиеся в противоположных направлениях вместо одной в приближении ЧГЛ ($V_{\text{чгл}}^2 = 3 p_{\parallel} / \rho$), причем при $|\kappa_{\parallel 1}| > \kappa_{\parallel}^* \approx 0,91$ наступает МГД потоковая неустойчивость (см рис.1). Индексы 1 и 2 у физических величин соответствуют их значениям до и после фронта ударной волны.

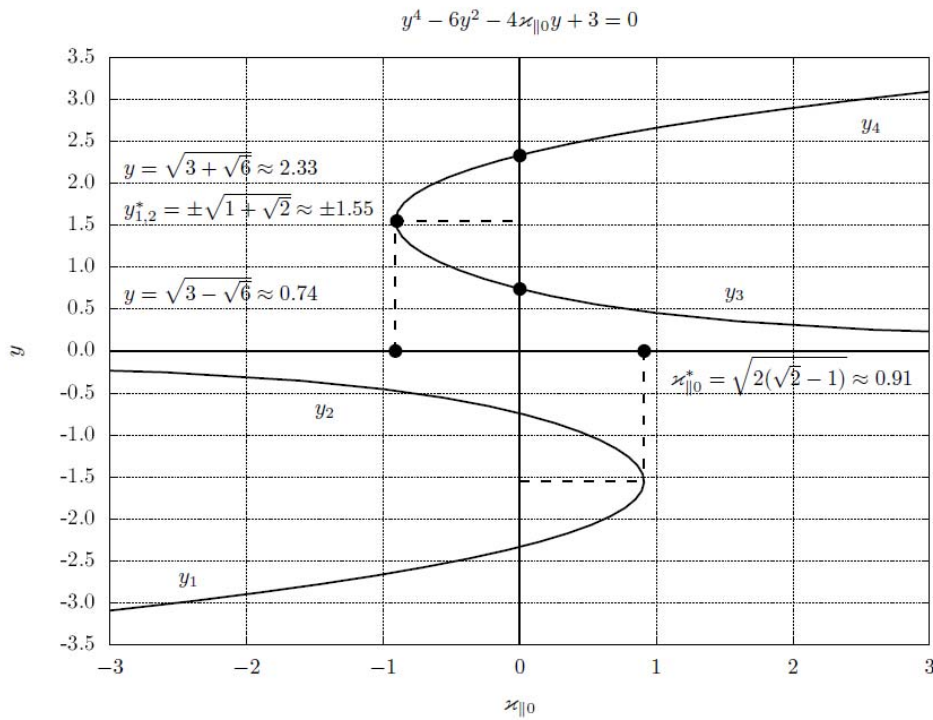


Рис. 1. Зависимость безразмерных фазовых скоростей $y = \omega/ka_{\parallel}$ от безразмерного параметра теплового потока $x_{\parallel} = S_{\parallel}/\rho a_{\parallel}^3$, $a_{\parallel}^2 = p_{\parallel}/\rho$.

В работе авторов [9] для одномерного течения вдоль магнитного поля уравнения (1)-(8) были приведены к дивергентному виду и сделано предположение относительно граничных условий на разрыве для тепловых потоков, а именно, что эти граничные условия определяются дивергентными уравнениями для этих потоков, т.е. уравнениями (см. [9])

$$\frac{\partial}{\partial t}(S_{\parallel} + 3p_{\parallel}u + \rho u^3) + \frac{\partial}{\partial x}(4S_{\parallel}u + 6p_{\parallel}u^2 + \rho u^4 + 3p_{\parallel}^2/\rho) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(S_{\perp} + p_{\perp}u) + \frac{\partial}{\partial x}(2S_{\perp}u + p_{\perp}u^2 + p_{\parallel}p_{\perp}/\rho) = 0$$

что соответствует граничным условиям на разрыве в виде

$$[4S_{\parallel}u + 6p_{\parallel}u^2 + \rho u^4 + 3p_{\parallel}^2/\rho] = 0$$

$$[2S_{\perp}u + p_{\perp}u^2 + p_{\perp}p_{\parallel}/\rho] = 0$$

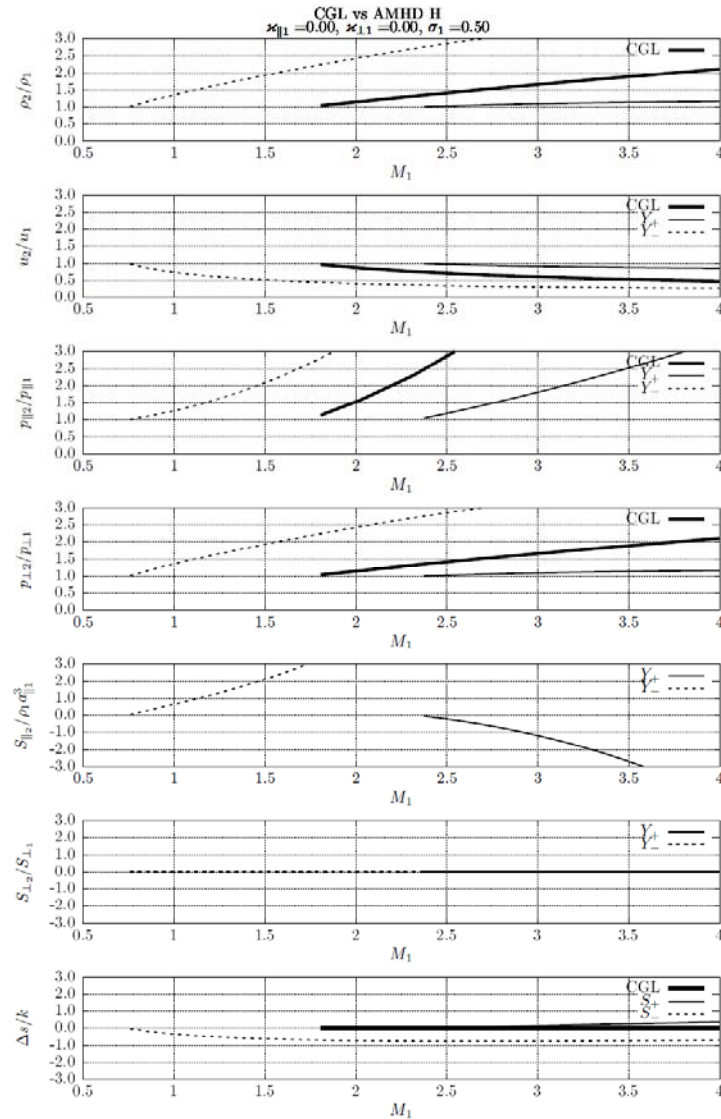


Рис. 2. Зависимость скачков физических величин на ударных волнах от числа Маха и сравнение с ЧГЛ.

В этом случае полученное в [9] решение описывает скачки физических величин на разрыве для двух продольных ударных волн ($Y_{+,-} = u_2/u_1$), отвечающих соответствующим линейным волнам.

На рис. 2 приведены зависимости скачков физических величин от числа Маха набегающего потока плазмы $M_1 = u_1/a_{\parallel 1}$ и их сравнение с зависимостями в приближении ЧГЛ. Графики показывают существенные различия даже в случае нулевого теплового потока. Сопоставление данных измерений ударных волн в солнечном ветре с полученными теоретическими зависимо-

стями в рамках 8-моментного МГД приближения позволит осуществлять более детальную диагностику плазмы солнечного ветра (плотности, давления, скорости, тепловых потоков, и т.д.) и построение адекватного теоретического описания МГД ударных волн в бесстолкновительной плазме.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 17-02-01328).

Литература

1. Chew G.F., Goldberger M.I., Low F.E. The Boltzmann equation and the one-fluid hydromagnetic equations in the absence of particle collisions // *Proc. R. Soc. Lond.* V. A 236. P. 112–118. 1956.
2. Namikawa T., Namabata H. Influence of proton heat fluxes on the propagation of hydromagnetic waves // *Phys. Lett.* V. A 81 (6). P. 339–342. 1981.
3. Namikawa T., Namabata H. Propagation of hydromagnetic waves through a collisionless, heat-conducting plasma // *J. Plasma Phys.* V. 26 (1). P. 95–121. 1981.
4. Захаров В.Ю. Волны малой амплитуды в замагниченной плазме без столкновений // *Вопросы магнитной гидродинамики без столкновений в сильном магнитном поле.* МГУ. С.48-70. 1988.
5. Кузнецов В.Д., Джалилов Н.С. 16-ти моментное приближение для бесстолкновительной космической плазмы: волны и неустойчивости // *Физика плазмы.* Т. 35 (11). С. 1041-1054. 2009.
6. Matteini, L., Landi S., Hellinger P., Pantellini F., Maksimovic M., Velli M., Goldstein B.E., Marsch E. Evolution of the solar wind proton temperature anisotropy from 0.3 to 2.5 AU // *Geophys. Res. Lett.* V.34. P. L20105. 2007. doi:10.1029/2007GL030920.
7. Ораевский В.Н., Конников Ю.В., Хазанов Г.В. Процессы переноса в анизотропной околоземной плазме, Наука, Москва, 1985.
8. Ramos J.J. Dynamic evolution of the heat fluxes in collisionless magnetized plasma // *Phys. Plasmas* V.10 (9). P.3601–3607. 2003.
9. Kuznetsov V.D., Osin A.I. On the parallel shock waves in collisionless plasma with heat fluxes // *Physics Letters.* V. A 382. P. 2052–2054. 2018.

ОСОБЕННОСТИ ГОДОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ БОЛЬШИХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЧЕТНЫХ И НЕЧЕТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

tvkuz3@gmail.com

FEATURES OF ANNUAL DISTRIBUTIONS OF OCCURRENCE FREQUENCY OF LARGE GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN EVEN AND ODD SOLAR CYCLES

Kuznetsova T.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

Annual distribution of disturbances with daily geomagnetic index $A_p > 190$ nT since 1932 shows that 70% of the days occur during decline phase of odd solar cycles. Annual distribution of large disturbances with daily $A_p > 220$ nT shows further increase of contribution of the days in decline phase of odd cycles into total number of the days. Annual distribution of the disturbances with $A_p > 190$ nT also shows that 70% of the days occur near equinoxes and 20% on July and November. For the large disturbances with $A_p > 220$ nT number of the days on July and November increases but one of days near equinoxes decreases that leads to near equal probability of occurrence of the large disturbances at equinoxes and July, November. These results are discussed and compared with results based on indexes K_p , aa , Dst .

Ранее мы анализировали индексы aa , K_p и Dst и обнаружили, что при больших возмущениях на классическом профиле годового распределения частоты их появления наряду с известными пиками вблизи равноденствий появляются максимумы в мае, июле и ноябре [1]. Рис.1 показывает распределение числа значений с $K_p = 8-9$ в 14-дневных интервалах в году за 1932-2005 гг. Из рис.1 следует, что максимумы K_p в июле, ноябре и аномальный по величине в марте не нарушают известного профиля годовой вариации, а проявляются добавочными пиками при больших возмущениях.

На рис. 2 показана годовая вариация (M - номер месяца) относительной разности K_p индекса в четных и нечетных солнечных циклах на двух выбранных интервалах времени в %, $DK_p < 0$ означает, что K_p в четных циклах больше, чем в нечетных. $DK_p < 0$ показывает главный экстремум $DK_p \sim 15\%$ в марте и меньший в мае. $DK_p > 0$ (K_p в нечетных циклах больше, чем в четных) имеет главный экстремум $DK_p \sim 15\%$ в июле и меньший в ноябре. Итак, наибольшая разность DK_p между четными и нечетными циклами достигается в первом полугодии в марте (K_p больше в четных) и во втором полугодии в июле (K_p больше в нечетных). Рис. 2 показывает также большую величину K_p в четных циклах и во втором полугодии в сентябре ($DK_p < 0$). Преобладающее влияние нечетных циклов на рост K_p выражено во втором полугодии в июле и ноябре. Для объяснения экстремумов в мае, ноябре нами было

проведено исследование влияния взаимной ориентации векторов плотности электромагнитной энергии Пойтинга \mathbf{P} в

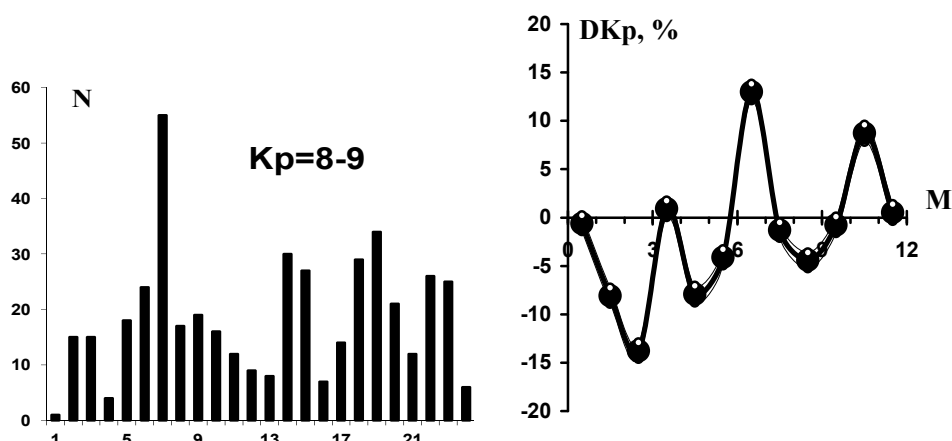


Рис. 1. Годовое распределение числа значений N с $K_p=8-9$ в 14-дневных интервалах с номером m за 1932-2005 г.; $m=7$ – конец марта - начало апреля; $m=14,15$ – июль; $m=19$ – сентябрь, $m=22, 23$ – ноябрь.

Рис. 2. Годовая вариация относительной разности DK_p между временными рядами K_p для нечетных и четных солнечных циклов в % за 1964-2007 г.

солнечном ветре и магнитного момента Земли \mathbf{M}_e (с учетом его орбитально-го и суточного движений) на геомагнитную активность (ГА) на основе измерений параметров солнечного ветра на 1 а.е. в 1963-2005 г. [2,3]. Было показано, что компонента P_m вектора \mathbf{P} вдоль вектора \mathbf{M}_e , связанная с потоком э/м энергии в полярные шапки, имеет четкую полугодовую вариацию с экстремумами в мае и ноябре. Анализ показал также, что фаза вариации определяется только взаимной ориентацией векторов \mathbf{P} и \mathbf{M}_e , которая повторяется при движении Земли по орбите, а амплитуда зависит от величин электрических и магнитных полей, скорости в солнечном ветре [2]. Проявлением диссипации э/м энергии, описываемой P_m с максимумами в мае, ноябре, может быть мода AL-индекса, не зависящая от знака ММП и имеющая экстремумы в годовом ходе в ноябре и мае [2]. AL-индекс описывает возмущение от западного электроджета в полярной ионосфере. В этих работах не использовался Ар-индекс ГА. Кроме того, выводы основаны на статистических результатах, что не позволяет отследить детали больших возмущений. Анализ, представленный внизу, заполнит этот пробел.

В таблице представлены 20 самых возмущенных дней за период 1932-2014 Г., расположенных в порядке N убывания величины суточного Ар от 280 до 190 нТл. Для каждого дня вместе с суточной величиной Ар указаны: дата, номер солнечного цикла и его фазы (роста или спада), когда был возмущенный день, величина максимума сглаженных среднемесячных чисел Вольфа W_m и время его наступления (месяц, год) цикла. Чтобы выявить тенденцию изменения вклада фаз циклов на характеристики распределения дней в году при переходе к очень большому уровню возмущенности, были выбраны 6 дней под номерами N1- 6 с критерием $Ar > 220$ для сравнения с анализом дней во всей таблице.

Таблица. Большие возмущения в данных суточного геомагнитного индекса A_p и характеристики солнечных циклов, сопровождающих эти возмущения.

N	Дата	Цикл, фаза	W_m , дата	A_p , нТл
1	13 ноября 1960	19 (спад)	201,3 (март 1958)	280
2	13 марта 1989	22 (рост)	158,5 (июль 1989)	246
3	1 апреля 1960	19 (спад)	201,3 (март 1958)	241
4	15 июля 1959	19 (спад)	201,3 (март 1958)	236
5	18 сентября 1941	17 (спад)	119,2 (апрель 1937)	232
6	5 июля 1941	17 (спад)	119,2 (апрель 1937)	222
7	28 марта 1946	18 (рост)	151,8 (май 1947)	213
8	1 марта 1941	17 (спад)	119,2 (апрель 1937)	207
9	29 октября 2003	23 (спад)	120,8 (март 2000)	204
10	6 октября 1960	19 (спад)	201,3 (март 1958)	203
11	8 февраля 1986	21 (спад)	164,5 (декабрь 1979)	202
12	8 июля 1958	19 (рост)	201,3 (март 1958)	200
13	11 февраля 1958	19 (рост)	201,3 (март 1958)	199
14	6 сентября 1982	21 (спад)	164,5 (декабрь 1979)	199
15	22 сентября 1946	18 (рост)	151,8 (май 1947)	198
16	5 июня 1991	22 (спад)	158,5 (июль 1989)	196
17	25 марта 1946	18 (рост)	151,8 (май 1947)	195
18	31 марта 2001	23 (спад)	120,8 (март 2000)	192
19	30 октября 2003	23 (спад)	120,8 (март 2000)	191
20	30 марта 1940	17 (спад)	119,2 (апрель 1937)	190

Предварительный анализ табл. показывает, что цикл 19 с самой большой амплитудой $W_m=201$ дал больше всего возмущенных дней (6). День N1 в табл. 13 ноября 1960г с $A_p=280$ нТл - день бури с $Dst = -339$ нТл. Эта буря не попадает в список больших бурь с $Dst < -400$ нТл как, например, день N13 11 февраля 1958 с $A_p=199$ на фазе роста цикла во время большой бури с $Dst=-426$ нТл. Отметим, что в цикле 19 число дней на фазе спада в 2 раза больше, чем на фазе роста, причем половина дней приходится на равноденствия, а половина на июль, ноябрь. Однако, цикл 17 с наименьшим $W_m=119$ в таблице внес четыре дня, два из которых попали в топ шести очень возмущенных дней. Это относится и к циклу 23 с близкой амплитудой $W_m=121$, который дал три возмущенных дня на фазе спада этого цикла. День N2 13 марта 1989 с $A_p=246$ в 22 цикле на его фазе роста (со средним $W_{max}=158$) стоит отметить хотя бы потому, что он сопровождался мощной бурей с $Dst= -589$ нТл, которая показала опасность подобных больших возмущений из-за отключения электричества для миллионов жителей Канады и сбоев радиосвязи по всему миру.

Известно, что распределение частоты появления возмущений имеет максимумы вблизи весеннего и осеннего равноденствий. Установим, каким будет распределение возмущений по A_p . Анализ табл. показывает, что 13 из 20 дней были вблизи весеннего и осеннего равноденствий (65%), 3 из 20 в июле (15%), 2 в феврале (10%) и по одному дню в июне (5%) и ноябре (5%).

Следовательно, 65% возмущенных дней в равноденствия и 20 % дней в июле, ноябре объясняют 85% возмущенных дней таблицы. Самые возмущенные дни с $A_p > 220$ под номерами N1- 6 были вблизи весеннего равноденствия (2 дня) и осеннего (1 день), а также в июле (2 дня) и ноябре (1 день). Половина дней в равноденствия и половина в июле, ноябре в сумме дают все возмущенные дни с $A_p > 220$. Индекс $aa > 200$ нТл дает распределение в году с максимумом в июле, а $Dst < -250$ нТл в ноябре [1].

Найдем связь распределения возмущенных дней в году с фазами четных - нечетных циклов. Как видно из табл., 14 из 20 дней были на фазе спада циклов (70%), а 6 дней на фазе роста (30%). Это преобладание дней на фазе спада циклов усиливается для самых возмущенных дней с $A_p > 220$: только день N2 был на фазе роста четного 22 цикла, а остальные на фазе спада нечетных циклов. Итак, возмущенные дни происходили преимущественно на фазе спада солнечных циклов (70% дней против 30%) и в нечетных циклах (75% дней против 25%). При переходе к возмущениям с $A_p > 220$ число дней на фазе спада нечетных циклов продолжает расти.

Большие возмущения редки, но их необходимо изучать для улучшения прогноза. Результаты по A_p согласуются с ранее полученными нами статистическими результатами на основе индексов K_p , aa , Dst [1,2] прежде всего в том, что при возмущениях на известном профиле годового распределения частоты их появления возникают максимумы в июле и ноябре, амплитуда которых растет по мере приближения к высокому уровню GA и становится больше известных равноденственных максимумов только при больших возмущениях преимущественно на фазе спада нечетных циклов.

Литература

1. Кузнецова Т.В. и Лаптухов А.И. Годовая и УТ вариация геомагнитной активности для различных уровней возмущенности // Сборник трудов конференции "Экспериментальные и теоретические исследования прогнозирования гелиогеофизической активности", ИЗМИРАН, 10-15 октября, 2005, СПб-Петербург. С. 217-222, 2006.
2. Кузнецова Т.В. и Лаптухов А.И. Отклик высокоширотной полярной ионосферы на изменения ориентации вектора Пойтинга вблизи орбиты Земли относительно ориентации геомагнитного момента//Солнечно-Земная физика, Т.2, С. 215–217, 2008.
3. Kuznetsova T.V. and Laptukhov A.I. Contribution of geometry of interaction between interplanetary and terrestrial magnetic fields into global magnetospheric state and geomagnetic activity//Adv. Space Res. V. 47, P. 978–990, 2011.

О ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЦА НА КОМЕТУ 1P/ГАЛЛЕЯ 1986 ГОДА

Куликова¹ Н., Чепурова² В.М.

¹ИИТЭ НИЯУ «МИФИ» г. Обнинск, e-mail: kulikova@yandex.ru

²ГАИШ МГУ, г. Москва

ON POSSIBLE OUTCOME OF THE SUN IMPACT ON HALLEY'S COMET 1P/HALLEY 1986

Kulikova¹ N., Chepurova² V.N.

¹Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University MEPHI,
Obninsk, e-mail: kulikova@yandex.ru

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow

We present an analysis of simulation results and estimation of the sublimation process input into the general comet nucleus disintegration for the case of the comet 1P/PHalley's Comet 1986. We determine the moments and heliocentric distances of the sublimation process beginning and fading. We show that the major portion of comet nucleus disintegration on any heliocentric distance is due first of all to ejection processes. In any case, the sublimation process input holds the main responsibility for the overall disintegration process.

Считается, что при приближении кометы к Солнцу возникающий при нагреве газовый поток выносит с собой твердую составляющую кометного ядра, фрагменты которой образуют в дальнейшем метеороидное образование с орбитами, почти не отличающимися от кометной. Эти образования в процессе эволюции жизненного цикла кометы движутся вместе с ней, создавая конкретный метеороидный комплекс с кометой внутри, имеющий форму тора, размеры которого зависят от параметров орбит эжектируемых твердых фрагментов, а сам процесс имеет место на определенном участке кометной орбиты непосредственно вблизи Солнца. Однако к настоящему моменту имеется целый ряд наблюдений за различными кометами, вспышки блеска которых зафиксированы на гелиоцентрических расстояниях свыше 2 а.е. Причины этого явления пока неизвестны. Т.к. вынос твердой составляющей газовым потоком характеризуется невысокими скоростями истечения, а наблюдатели фиксируют вспышки блеска комет, в основном, для больших скоростей выброса пылевой материи (до 1 км/с), можно предположить, что основным процессом дезинтеграции кометного ядра является взрыв с пока неопределенными механизмами эжекции. При приближении кометы к Солнцу за счёт нагрева добавляется нарастающая с приближением к перигелию сублимация. Авторы, используя имеющуюся компьютерную технологию, смоделировали для кометы 1P/ Галлея её прохождение перигелия в 1986 году для выяснения вклада двух дезинтеграционных процессов в разрушение кометного ядра. Основные характеристики и возможности компьютерной технологии разрабатывались в течение ряда лет и докладывались на междуна-

родных и российских конференциях по небесной механике и околоземной астрономии [1-4].

Постановка задачи и результаты. Кометное ядро принимается за конгломерат смёрзшихся льдов различных газов с вкраплениями тугоплавкой составляющей. Сублимационный процесс представляет собой возникновение газового потока, который усиливается с приближением к Солнцу, вынося твердую фракцию в виде пылевых частиц небольших размеров. Качественная теория этого процесса была обстоятельно разработана в пятидесятых годах прошлого столетия Ф. Уипплом-старшим [5, 6, др.]. Цель заключалась в следующем: создать самостоятельно работающий модуль расчёта сублимационного процесса по уточненному математическому алгоритму, включить его как работающий вариант в блок “Дезинтеграция” базового варианта технологии, провести численные расчёты для кометы 1/Галлея с исходными данными для прохождения 1986 года в двух вариантах - только вероятностная дезинтеграция с учетом всех гравитационных эффектов и вероятностная дезинтеграция + сублимация на дуге основной орбиты при пересечении перигелия (размер расчётной дуги задается в исходных данных). Комета 1P/Галлея оказалась весьма интересным объектом. Во-первых, в прохождении 1986 года условия её наблюдения были крайне неблагоприятными, во-вторых, 12 февраля 1991 года на расстоянии более 14 а.е. после прохождения перигелия у кометы внезапно произошел выброс вещества, высвободивший облако пыли около 300 000 км в поперечнике [7]. При этом по данным наблюдателей (Чурюмов К.И. и др.) была зафиксирована скорость выброса 400-500 м/с. Численные расчёты проводились в предположении максимальных значений скоростей выброса: 100, 200, 400 м/с с автоматическим включением алгоритма расчёта сублимационного процесса в той расчётной точке истинной аномалии орбиты кометы, в которой этот алгоритм становится отличным от нуля, нарастая с приближением к Солнцу. В каждом случае моделирование проводится для десяти конкретных значений скоростей в интервале от 0 до заданного максимального значения, т.е. для анализа были получены 30 различных модельных вариантов по 500 000 испытаний в каждом. Исходные значения параметров орбиты исследуемого объекта таковы: диапазон расчёта от 0° до 360° через 10°, большая полуось 17,41 а.е., эксцентриситет 0,967277, i° -162.2422°, ω -111.8657°, Ω -56.8601°, P-76 лет. Полученные результаты показывают, что качественная картина вариаций элементов орбит выброшенных частиц от расположения точки выброса на орбите кометы с включением в модель алгоритма сублимационного процесса не меняется [8], но количественные характеристики увеличиваются. Возникает два вопроса: какова величина дуги орбиты кометы, на которой существенен учёт сублимации, и насколько существенно влияние этого учёта на изменения орбитальных элементов выбрасываемых частиц твёрдой фракции. В таблицах 1 и 2 приведены некоторые расчётные данные (таблица 1 – при скорости выброса 100 м/с; таблица 2 – при скорости выброса 400 м/с). По данным таблиц 1 и 2 мы можем определить коэффициент $\Delta_i = (A_i + B_i)/B_i$, где $(A_i + B_i)$ есть

изменение любого орбитального параметра при действии двух процессов, V_i – изменение этого же параметра только под действием сублимации. Данные в столбце 1 – расчёты без учёта сублимационного процесса, в столбце 2 – с включением сублимации.

Таблица 1. Изменение орбитальных элементов при скорости выброса 100 м/с.

Точка выброса (град)	Изменение большой полуоси δa (а.е.)		Изменение эксцентриситета $\delta e \times 10^{-2}$		Изменение аргумента перигелия $\delta \omega$ (град)		Изменение долготы восходящего узла $\delta \Omega$ (град)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
0°	1,878	2,510	3,425	4,589	11,54	15,47	10,41	13,95
10°	1,875	2,466	3,420	4,497	10,90	14,33	9,55	12,56
20°	1,854	2,391	3,378	4,360	10,32	13,32	8,61	11,11
30°	1,821	2,304	3,318	4,197	9,86	12,48	7,42	9,38
40°	1,769	2,194	3,220	3,993	9,58	11,79	5,97	7,40
50°	1,703	2,069	3,095	3,760	9,33	11,33	4,25	5,16
60°	1,634	1,945	2,965	3,528	9,51	11,32	2,11	2,51
70°	1,544	1,798	2,792	3,253	10,34	12,04	0,54	0,63
80°	1,444	1,646	2,602	2,967	11,83	13,49	3,88	4,42
90°	1,328	1,481	2,382	2,656	14,57	16,25	8,19	9,13
100°	1,214	1,323	2,162	2,357	18,79	20,49	13,97	15,23
110°	1,080	1,151	1,907	2,031	25,34	27,01	22,00	23,43
120°	0,939	0,977	1,637	1,702	35,52	36,94	33,61	34,95

Таблица 2. Изменение орбитальных элементов при скорости выброса 400 м/с.

Точка выброса (град)	Изменение большой полуоси δa (а.е.)		Изменение эксцентриситета $\delta e \times 10^2$		Изменение аргумента перигелия $\delta \omega$ (град)		Изменение долготы восходящего узла $\delta \Omega$ (град)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
0°	7,511	10,07	1,370	1,836	46,17	61,78	41,64	55,80
10°	7,501	9,864	1,368	1,799	38,21	57,33	41,36	50,25
20°	7,415	9,566	1,352	1,744	41,27	53,24	34,45	44,44
30°	7,285	9,216	1,327	1,679	39,45	49,90	29,37	37,54
40°	7,078	8,776	1,288	1,597	38,00	47,12	23,88	29,61
50°	6,812	8,276	1,238	1,504	37,28	45,30	16,99	20,64
60°	6,537	7,779	1,186	1,411	38,03	42,26	8,43	10,03
70°	6,175	7,194	1,117	1,301	41,35	48,18	2,16	25,10
80°	5,775	6,584	1,041	1,186	47,37	54,01	15,51	17,68
90°	5,312	5,923	0,953	1,063	58,38	66,55	32,75	32,75
100°	4,854	5,236	0,865	0,942	75,32	82,02	55,89	60,86

Оказалось, что для всех трех расчётных вариантов (100, 200, 400 м/с) значения коэффициента Δ_i одинаковы и меняются только от расположения точки выброса на орбите кометы (табл. 3).

Таблица 3. Взаимосвязь значения коэффициента Δ_i и точки выброса на орбите.

Точка выброса (град)	Коэффициент отношения Δ_i	Точка выброса (град)	Коэффициент отношения Δ_i	Точка выброса (град)	Коэффициент отношения Δ_i
0°	1,34	50°	1,215	100°	1,089
10°	1,315	60°	1,190	110°	1,066
20°	1,290	70°	1,165	120°	1,040
30°	1,264	80°	1,140		
40°	1,240	90°	1,115		

Выводы: Опираясь на данные таблицы 3, можно заключить, что сублимационный процесс в нашем случае возникает при приближении кометы к перигелию в области истинной аномалии -120° , медленно нарастает до -30° и в области $(-20^\circ, 0^\circ)$ увеличивает изменения орбитальных элементов максимально в 1,34 раза в перигелии. Далее процесс затухает в таком же режиме. Таким образом, сама по себе чистая сублимация оказывает определенное влияние на вынос твердой фракции примерно на дуге $(-60^\circ, +60^\circ)$. Таким образом, можно утверждать, что основное значение в развале кометных ядер типа конгломерата смерзшихся льдов с тугоплавкой фракцией имеют выбросовые явления. Механизм таких выбросов может быть различным. Вспышка блеска кометы на значительном расстоянии после прохождения перигелия приводит к мысли, что нагрев, не являясь основным процессом дезинтеграции ядра, как катализатор приводит в действие силы иного природного свойства. Рис. 1 демонстрирует все сказанное в более наглядном виде. Скорее всего, алгоритмы процессов нагрева и затухания не идентичны, тогда график будет не симметричен, но значения Δ_i вряд ли существенно изменятся.

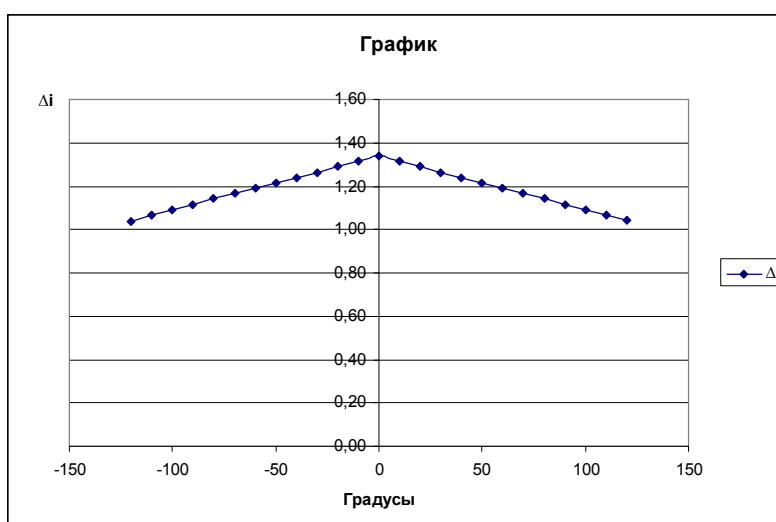


Рис.1. Вариация коэффициента Δ_i на дуге орбиты от -120° до $+120^\circ$ за период прохождения кометой 1P/Галлея перигелия в 1986 году. $\Delta_i = (A_i + B_i) / B_i$, $(A_i + B_i)$ - изменение орбитальных элементов под действием различных эффектов, включая сублимационный процесс, B_i - аналогично только за счёт одной сублимации.

Литература

1. Куликова Н.В., Тищенко В.И. Возможности компьютерного моделирования орбитальной эволюции космических объектов малой массы, Вестник РосНОУ, 2012, № 4, с. 34-41 www.vestnik-rosnou.ru
2. Куликова Н.В., Тищенко В.И., Чепурова В.М, Поляков Н.В., Калинин Д.А. Миграция малых тел средствами компьютерных технологий. Сб. трудов конф. «Околоземная астрономия-2009 », М., ГЕОС, 2010., с. 174-180.
3. Куликова Н.В., Тищенко В.И. Применение научной визуализации при анализе эволюции кометы 17P/Холмса, Электронный журнал «Научная визуализация», 2016, т. 8, № 1, с. 108-119 www.sv-journal.org
4. Chepurova V.M., Kulikova N., Petrovskaja E. Contribution of the Earth's gravitational potential in orbital motion of short period comets. RAA, 2016, v. 16, #4, p. 53–58.
5. Whipple F.L. A comet model I. The acceleration of comet Encke. Astrophys. J., 1950, v. 111, № 2, p.375-394.
6. Whipple F.L. A comet model II. Physical relations for comets and meteors, Astrophys. J. 1951, v. 113, #3, p. 464-474.
7. Новикова Е.С., Смирнов М.А., Чепурова В.М. Влияние электростатических явлений на элементы орбиты и моменты вращения ядра кометы. Сб. «Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы», Изд-во Космосинформ, М., 2000, стр. 197.
8. Куликова Н.В., Тищенко В.И., Перовская Е.Н. Особенности динамики движения кометы Холмса на интервале 1892-2300 лет. Международный научный журнал «Экологический вестник» научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧСЭ), 2013, т. 2, № 4, т. 2, с. 98-106.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ВЫСОТАХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Ларкина В.И.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

larkina@izmiran.ru

SOLAR ACTIVITY AND LOW FREQUENCY EMISSION VARIATION AT THE TOPSIDE IONOSPHERE

Larkina V.I.

IZMIRAN, g. Moscow, Russia

Intensity variations of low frequency electromagnetic emissions were investigated in the upper ionosphere under different conditions of solar activity. It is discovered that amplitude of emissions depends on solar activity. The interpretation of the discovered effect is present.

Магнитосфера – это гигантская природная лаборатория, в которой происходят разнообразные геофизические процессы. В магнитосферной плазме присутствуют электрическое, магнитное (геомагнитное) поля. Магнитосферная плазма представляет собой смесь частиц различных энергий от надтепловых до высоко- и сверхвысокоэнергичных частиц. Здесь могут возбуждаться электрические и электростатические волны, которые взаимодействуют с частицами плазмы и приводят к эволюции различных геофизических явлений, как на Земной поверхности, так и в магнитосфере. Хорошо известна связь многих геофизических процессов с уровнем солнечной активности.

В последние годы значительно возрос интерес к количественным и качественным исследованиям радишумов как естественного, так и искусственного происхождения в различных областях околоземного космического пространства. Интенсивность и спектр низкочастотных (0.1-20 кГц) излучений, регистрируемых на высотах внешней ионосферы, зависят от свойств среды (плотности и температуры окружающей плазмы), в которой они возбуждаются и распространяются. Волны зависят также от потоков энергичных частиц, проникающих в различные области пространства и приводящих к генерации этих излучений, и от магнитного поля, определяющего условия распространения волн, и от состояния квазизахваченных резонансных электронов, возбуждающих низкочастотные излучения. Тем самым они несут информацию о параметрах плазмы.

В зависимости от Солнечной активности изменяются параметры магнитосферной плазмы и потоки частиц, проникающих в магнитосферу, изменяется геомагнитное поле. В итоге вариации низкочастотных излучений зависят также от солнечной активности.

При увеличении солнечной активности концентрация плазмы в магнитосфере выше, чем в минимуме, примерно на 1/2 порядка [1], возрастают также и потоки энергичных частиц в магнитосфере [2]. Это связано с увеличением потоков энергичных частиц из межпланетного пространства и с общим сжатием магнитосферы под воздействием возрастающего солнечного ветра. Известно, что интенсивность плазмосферных шумовых низкочастотных излучений пропорциональна концентрации холодной плазмы и скорости притока энергичных частиц в область возбуждения.

Рост концентрации и увеличение притока энергичных частиц должны приводить, согласно [3], к увеличению интенсивности шумов. Далее известно, что возбуждение волн происходит при условии:

$$\gamma = \Omega\eta A > 0, \quad (1)$$

где γ – инкремент неустойчивости, Ω – гирочастота электронов, η – число частиц, вступающих в резонансное взаимодействие с излучением, A – анизотропия функции распределения электронов. Ω и η всегда положительны. Следовательно, $\gamma > 0$, если $A > 0$.

Из литературы известно, например [3], что днем анизотропия выше, чем ночью. Можно предположить, что при усилении солнечной активности анизотропия функции распределения электронов возрастает, увеличивается также и число частиц, вступающих в резонансное взаимодействие. Все это приводит к тому, что легче выполняется условие возбуждения волн, и интенсивность возбуждаемых волн должна быть выше.

По данным Solar Geophysical Data, где представлена солнечная активность в числах Вольфа, наши спутники «Интеркосмос» летали в различных условиях солнечной активности. Заметим, что 21-й цикл был очень сложным, и Солнце было существенно более активным (интенсивным), чем в 20-м цикле. В статье [5] в нижней части рисунка, представляющего солнечную активность, жирными отрезками показано время существования наших спутников. Видно, что эксперимент на ИСЗ «Интеркосмос 3» пришелся на середину 20 цикла солнечной активности, эксперимент на спутнике «Интеркосмос 5» проводился при меньшей солнечной активности. Спутники «Интеркосмос 13» и, особенно, «Интеркосмос 14», функционировали в минимуме солнечной активности. Волновые измерения на спутниках «Интеркосмос 18» и «Интеркосмос 19» проводились при максимальной солнечной активности (максимум 21-го цикла), на спутнике «Ореол 3» - в максимуме цикла и при меньшей активности. Спутник «Ионозонд -Э» («Космос 1809») работал в сложное время перехода солнечной активности от минимума к максимуму. Заметим, что 21-й цикл был очень сложным, и Солнце было существенно более активным, чем в 20-м цикле.

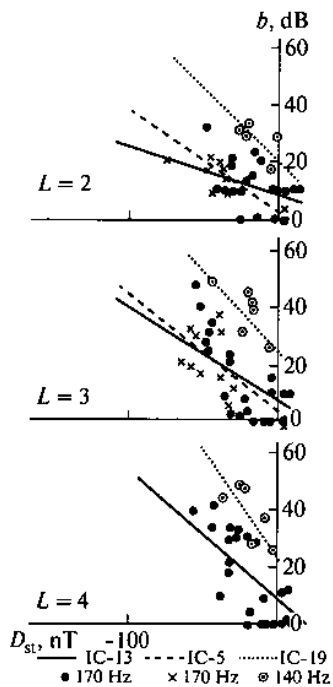
Аппаратура волновых комплексов была однотипной и во всех экспериментах сохранялись ее основные параметры: чувствительность, динамический диапазон, частоты настройки каналов, относительные полосы пропускания каналов, постоянные времени детекторов заряда и разряда. Это позво-

лило накопить однородный материал, пригодный для статистической обработки и сопоставления вариаций амплитуды электромагнитных шумовых колебаний при различных условиях солнечной активности.

Наклон орбиты спутника «Интеркосмос 13» к плоскости экватора составлял 82 градуса, спутника «Интеркосмос 18» - 83 градуса, а спутников «Интеркосмос 19» и «Космос 1809» - 74 градуса. Наклон орбиты ИСЗ «Интеркосмос 3» и «Интеркосмос 5» к плоскости эклиптики составлял ~48 градусов, максимальные L-оболочки, которых достигал спутник, были всего лишь $L=4.5-5$, то есть спутники «Интеркосмос 3» и «Интеркосмос 5», находились внутри плазмосферы.

В качестве показателя уровня возмущенности использовалась Dst – вариация – усредненная по долготе величина возмущения магнитного поля в средних широтах. Наиболее полные данные по волновым экспериментам относятся к плазмосфере, поэтому использование данных Dst-вариаций вполне оправдано.

Ранее было обнаружено [6], что, в среднем, по многим геомагнитным возмущениям амплитуда шумовых низкочастотных излучений изменяется пропорционально Dst вариации. Скорость роста амплитуды излучений различна для разных частот и увеличивается с переходом к более высоким L-оболочкам. При сопоставлении изменений амплитуды в разные фазы цикла солнечной активности эти выводы получили новое подтверждение. На рисунке представлено изменение уровня излучения на частоте 170 (140) Гц на различных L-оболочках ($L=2, =3, =4$) в зависимости от величины Dst вариаций. По вертикали отложена амплитуда излучений b по отношению к уровню собственных шумов. Данные ИСЗ «Интеркосмос 13» относятся к минимуму солнечной активности, «Интеркосмос 19» - к максимуму, «Интеркосмос 5» - к промежуточной активности. Из рассмотрения рисунка видно, что с усилением солнечной активности скорость роста уровня излучений с изменением величины Dst возрастает. Связь амплитуды излучения с Dst отражает увеличение количества частиц в радиационных поясах, приводящее к возрастанию энергии кольцевого тока [6]. Сопоставление с другими индексами геомагнитной активности (Kp, AE) не дают таких согласованных результатов, как с величиной Dst. По-видимому, это согласие можно объяснить тем обстоятельством, что из разнообразных индексов геомагнитной возмущенности Dst-вариации наиболее подходят для характеристики интенсивности и положения области возбуждения плазмосферных возмущений. Это связано с тем, что указанные излучения генерируются в районе, где находится экваториальное токовое кольцо, и амплитуда излучений обусловлена энергией кольцевого тока или количеством энергичных частиц, проникающих каким-либо путем во время бури в магнитосферу.



Таким образом, из анализа данных низкочастотных волновых измерений, выполненных на ИСЗ «Интеркосмос» в разные фазы цикла солнечной активности, обнаружено, что интенсивность естественных низкочастотных шумовых излучений на высотах внешней ионосферы зависит от уровня солнечной активности.

Полученные сведения позволяют судить об изменениях плотности потоков и энергии частиц, вторгающихся в плазмосферу Земли в годы максимума и минимума солнечной активности, и об изменениях магнитосферной плазмы, связанных с ростом солнечной активности. Другими словами, электромагнитные низкочастотные шумы могут быть своеобразным индикатором солнечной активности и состояния магнитосферы.

Литература

1. Etcheto J., Gendrin R., Solomon J., Roux A. A self-consistent theory of magnetospheric ELF hiss // J. Geophys. V.78, N 34. P/8150-8196. 1973.
2. Хесс В. Радиационные пояса в магнитосфере. М.: Атомиздат. 1972
3. Kaye S.M., Lin C.S., Park J.K., et al. The diabatic modulation of equatorial pitch-angle anisotropy //J. Geophys. Res. V.83, N A6. P.2675-2682. 1978
4. Ларкина В.И. Низкочастотные шумы и солнечная активность //Структура и волновые свойства приземной плазмы. М.: ИЗМИРАН.
5. Larkina V.I. Low noise frequency at altitudes of outer ionosphere and solar activity //Geomagnetism and aeronomy. Vol. 49, N8. P. 1260 – 1263. 2009.
6. Ларкина В.И., Лихтер Я.И. Плазмосферные шумовые излучения во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т.21, № 4. С. 661-667. 1981.
7. Ларкина В.И. Низкочастотные шумы на спутниках «Интеркосмос» разных условиях солнечной активности //Космические исследования. Т. 28, № 5, С 760-764). 1990.

ELECTRON WHISTLER WAVE EMISSION IN THE EARTH PLASMASPHERE AND AN APPROPRIATE SPECTRAL MATRIX ANALYSIS DEPENDING ON SOLAR ACTIVITY

Lundin B.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

lundin.bv@gmail.com

The multicomponent wave field registration in space permits, in principle, to reveal its electromagnetic structure compounds (ESC) after appropriate analysis of corresponding spectral matrix. However, the results validity, in general, is sensitive to mutual cross correlation time between ESC which is not known beforehand. Nevertheless the level of solar activity influencing on whistler excitation can prompt the structure of most intense EMC.

There is no conventional mathematical approach inherent to analysis of multi structural frequency-time spectra registered in different spatial regions of the near Earth plasma surrounding in very low frequency (VLF) domain typical to the electron whistler wave mode [1, 2]. Similar problems are actual for laboratory devices used for modeling the space plasma phenomena and in helicon discharge experiments (see [3, 4] and references therein) where the plane electro-magnetic wave structure is not typical for bounded plasma setups. The undistorted spectra registration crucially depends on the compatibility of VLF receivers on board the space vehicle and the VLF waves of distant origins. The most known approach developed earlier [1] was based on general supposition of mutual phases independence for wave packets arriving from different directions. Then the averaging time in calculating the spectral matrix (averaged cross correlation in time for different wave field components) can be selected rather small and permits reasonable space resolution along the space vehicle trajectory after application the developed scheme of spectral matrix analysis [1]. However, another technique was developed for two or three sets of independent origins of wave packets. It is based on different nature of each compounds and rather natural under increased solar activity level. Even if the main VLF electromagnetic background is generated by lightning discharges, the variations of plasmaspheric parameters due to solar activity introduce an essential contribution into the generation of VLF noises as well as into their propagation regimes to the remote VLF receivers. In these cases whistler emissions are accepted to be generated mainly near the equatorial regions with instability increments independent on wave vector azimuthal angle with respect to ambient magnetic field. These emissions are an electromagnetic background to get the signal of man-made transmitter and/or the natural transient transmitter as lightning discharge. For selection the data processing technique and spectral matrix analysis one can apply the scheme of paper [5] to extract the azimuthally symmetric path and the nearly plane wave intensity of the wave packets from transmitter. To improve the validity of final results one needs to vary the averaging time intervals during the calculation of spectral matrix and perform their mu-

tual comparison. In addition the ambiguity of the final result is inherent also to the interference picture registration between wave packets which are longer (in time) than the internal time of spectral matrix calculation. As a result even the ion type of registered field polarization can be found inside the interference pattern of plane wave with electron type polarization as shown in paper [6]. Thus the multi-component registration of electromagnetic wave field and calculation of their mutual cross-correlation in time continues to be the promising technique of extraction the compounds from complex mixture of wave field locally registered in space. However, the conventionally developed forgoing data processing cannot be uniquely valid under any circumstances and the solar activity level could prompt the adequately selected (from recently developed) spectral matrix analysis technique to be applied. Then even under different ambiguity accompanying recently developed scheme of multicomponent electromagnetic data processing there is a promising target for plasma diagnostics as shown in paper [7], where the local ion plasma composition was reconstructed using rather draft evolution of wave magnetic field polarization ellipse near the local ion plasma frequency.

References

1. Storey L.R.O., Lefeuvre F. Theory for the interpretation of measurements of a random electromagnetic wave field in space // *Space Res.* V. 14. P. 381-386. 1974.
2. Narita Y. Review article: Wave analysis methods for space plasma experiment // *Nonlin. Processes Geophys.* V. 24. P. 203-214. 2017.
3. Urrutia J.M., Stenzel R. Helicons in uniform fields. I. Wave diagnostics with hodograms // *Phys. Plasmas.* V. 25. P. 082108. 2018.
4. Stenzel R., Urrutia J.M. Whistler modes in highly nonuniform magnetic fields. III. Propagation near mirror and cusp fields // *Phys. Plasmas.* V. 25. P. 082110. 2018.
5. Voevodskiy V.P., Lundin B.V. Determining the properties of the plasma and the VLF signal from the spectral matrix of the wave field detected in a region which is a source of magnetospheric noise // *Geomagn. Aeron.*, V. 24. P. 47–51. 1984.
6. Lundin B., Krafft C. Ion sense of polarization of the electromagnetic wave field in the electron whistler frequency band // *Ann. Geophys.* V. 20. P. 1153-1165. 2002.
7. Krafft C., Lundin B. Determination of the averaged charge-to-mass ratio of the heavy charged constituents of a magnetoplasma using whistler wave measurements // *Ann. Geophys.* V. 28. P. 2237-2247. 2010.

ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ И КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ВЕЛИЧИНЕ

Мелкумян¹ А.А., Белов² А.В., Абунина² М.А., Абунин² А.А.,
Ерошенко² Е.А., Оленева² В.А., Янке² В.Г.

¹ *Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)*

имени И.М. Губкина, г. Москва

² *ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк*

amelkumyan6@gmail.com

FORBUSH DECREASES AND CORONAL MASS EJECTIONS: SIZE DISTRIBUTION

Melkumyan¹ A.A., Belov² A.V., Abunina² M.A., Abunin² A.A., Eroshenko² E.A.,
Yanke² V.G., Oleneva² V.A.

¹ *Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), Moscow, Russia*

² *IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

Distribution of Forbush decreases magnitude fits a power law with the slope $\alpha=2.31\pm 0.11$ from the threshold 1.4%. A comparison with power law slopes of various solar–terrestrial phenomena reveals that solar flares and solar energetic particles have flatter slopes; geomagnetic storms have steeper slopes; the power law slope for Forbush decrease magnitude is close to the slopes for coronal mass ejections parameters.

Эту работу следовало бы посвятить Эммануилу Израилевичу Могилевскому. В начале 90-х годов он долго и увлечённо убеждал одного из нас (АВ), как важно и необходимо получить распределение величин Форбуш-понижений (ФП) и сравнить их с солнечными характеристиками, прежде всего с параметрами корональных выбросов массы. Убеждать нужды не было – интересность задачи и полезность ожидаемых результатов сомнений не вызывали, но мы тогда только начали создавать базу данных ФП. Понадобилось ещё четверть века, чтобы собрать достаточное количество однородных данных. Жаль, что эти результаты Эммануилу Израилевичу уже не покажешь.

Здесь мы представляем анализ распределения величины ФП, основанный на большом экспериментальном материале. Если вероятность получения того или иного значения некоторой величины обратно пропорциональна определенной степени этого значения, то данная величина характеризуется распределением, подчиняющимся степенному закону $p(x)=Cx^{-\alpha}$. Натуральные распределения редко соответствуют степенному закону во всем диапазоне, часто ему подчиняются только большие величины (“степенной хвост”). Степенные распределения наблюдаются в самых разнообразных явлениях солнечно-земной физики: рентгеновских вспышках и протонных событиях [1], корональных выбросах массы [2,3], геомагнитных бурях [4,5]. Что касается величины ФП, то до сих пор нет анализа ее распределения, основанного

на большом количестве данных, существуют только приближенные оценки [6].

Для исследования распределения величины ФП использовалась созданная и поддерживаемая в ИЗМИРАН база данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений {HYPERLINK “<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>”}. База данных содержит параметры ФП, полученные методом глобальной съемки по данным всемирной сети нейтронных мониторов для частиц жесткостью 10 ГВ [7], начиная с 1957 г. (всего более 7000 событий). Мы постарались выделить изолированные ФП, которые создавались только одним источником, а именно, события, начало которых отдалено от последующего не менее чем на 36 часов, и от предыдущего (если предыдущее ФП было больше 1.4%) минимум на 60 часов. В результате была получена выборка объемом в 4692 события с 1957 по 2016 год (группа FULL). Кроме того, в интервале с 1997 по 2014 год мы выделили 350 рекуррентных ФП (источник – высокоскоростные потоки из корональных дыр; группа CH – Coronal Holes) и 207 спорадических ФП (источник – межпланетные возмущения ICMEs, связанные с корональными выбросами массы; группа CME – Coronal Mass Ejections). На графиках размаха амплитуды ФП (Рис. 1) видно, что распределения в группах FULL и CME имеют длинные “хвосты” в области больших значений. Такие распределения часто соответствуют степенному закону.

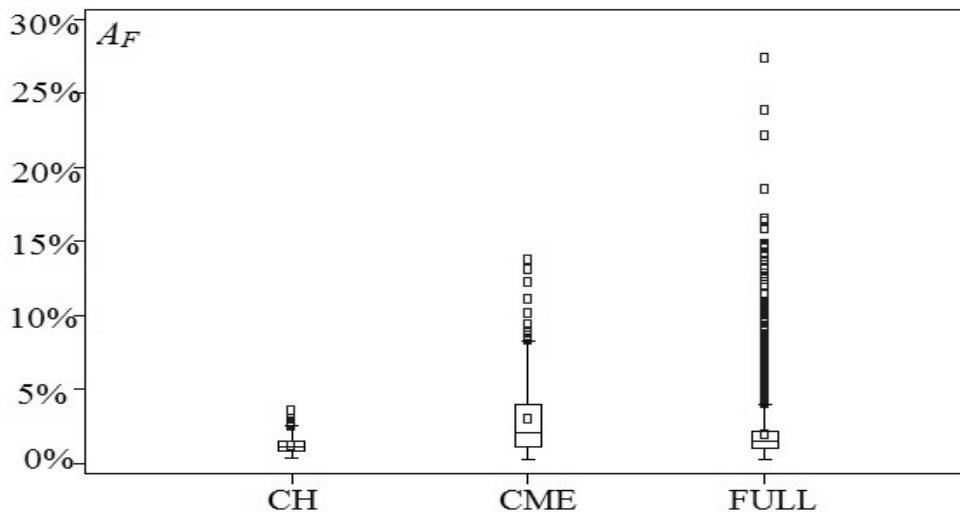


Рис. 1. Диаграмма размаха амплитуды ФП (A_F): CH – рекуррентные (1997-2014), CME – спорадические (1997-2014), FULL – изолированные (1957-2016) ФП.

Для проверки этой гипотезы был построен график кумулятивной функции распределения (Complementary cumulative distribution function – *CCDF*) величины ФП в двойном логарифмическом масштабе. Прямой отрезок на этом графике выше некоторого порогового значения подтверждает, что хвост распределения подчиняется степенному закону [8]. Вычисление показателя степени распределения α проводилось методом линейной регрессии с

использованием теста Колмогорова-Смирнова (К-С) для проверки гипотезы о степенном законе распределения и для минимизации расстояния между расчетным и экспериментальным распределениями. В результате расчетов было получено: значение показателя степени распределения $\alpha=2.31\pm 0.11$; пороговое значение величины ФП $A_{Fmin}=1.4\%$; количество событий в степенном хвосте распределения 2159; расчетное значение статистики К-С ($D=0.013$) меньше, чем критическое значение ($D_{crit}= 0.0296$).

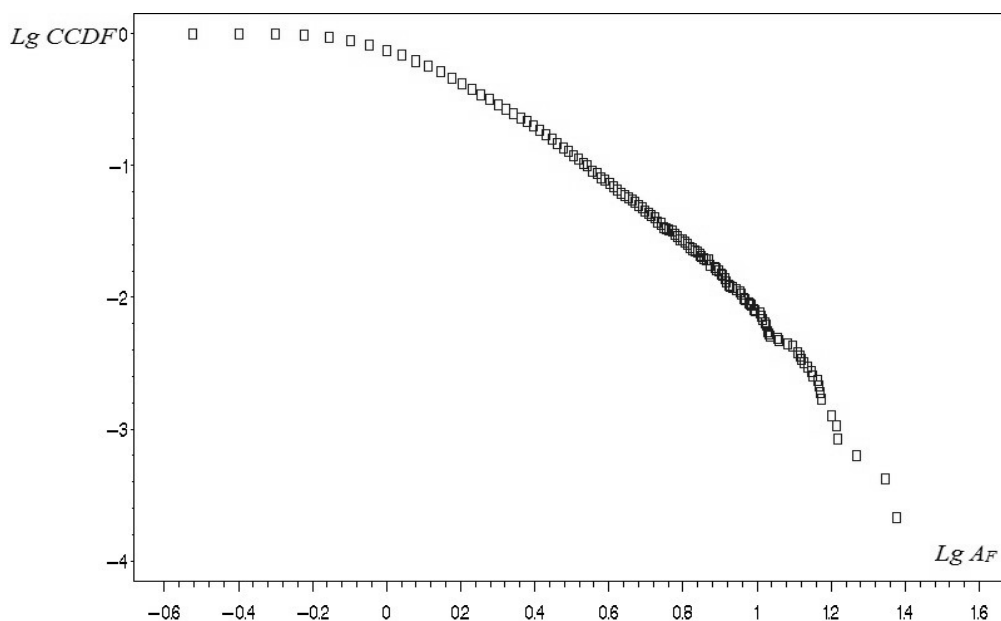


Рис. 2. Кумулятивная функция распределения (CCDF) величины ФП (AF) в двойном логарифмическом масштабе (1957 – 2016).

Таблица 1. Показатель степенного распределения α параметров солнечных вспышек, корональных выбросов массы и геомагнитных бурь. Обозначения: α_p – максимальный поток, α_E – энергия, α_m – масса, α_a – ускорение, α_τ – длительность фазы ускорения, α_v – скорость.

		Показатель степени α	Источник
Солнечные вспышки	HXR	$\alpha_p=1.73\pm 0.07, \alpha_E=1.62\pm 0.12$	Aschwanden et al., 2016 (review)
	SXR	$\alpha_p=1.98 \pm 0.11$	
	SEP	$\alpha_p = \alpha_E=1.2-1.4$	
Корональные выбросы массы		$\alpha_m = 2.5\pm 0.6 \quad \alpha_E = 1.6\pm 0.2$	Aschwanden, 2017
		$\alpha_a = 1.7\pm 0.2 \quad \alpha_\tau = 2.6\pm 0.6$	Aschwanden, 2016
		$\alpha_v=1.9\pm 0.3$	
Геомагнитные бури		$\alpha=2.94\pm 0.03$	Minamoto et al., 2015
		$\alpha=3.02$	Riley, 2012

Полученное значение показателя степени распределения величины ФП сравнивалось с показателями степени для параметров солнечных вспышек, корональных выбросов масс и геомагнитных бурь (Табл. 1). Сравнение показало, что солнечные вспышки (Hard X-rays – HRS, Soft X-rays – SXR, Solar Energetic Particles – SEP) имеют более пологий, а геомагнитные бури – более

крутой степенной спектр, чем величина ФП. Спектр величины ФП наиболее близок к спектрам параметров CMEs, в частности к спектру скорости, определяющему скорость распространения и расширения межпланетных возмущений ICMEs, и через них влияет на модуляцию космических лучей.

Литература

1. Aschwanden M.J, Crosby N.B., Dimitropoulou M. et al. 25 Years of Self-Organized Criticality: Solar and Astrophysics // *Space Sci. Rev.* V. 198. N 1–4. P. 47–166. 2016.
2. Aschwanden M.J. Global Energetics of Solar Flares: IV. Coronal Mass Ejections Energetics // *Astrophys. J.* V. 831. N 1. id. 105. 2016.
3. Aschwanden M.J. Global energetics of solar flares: VI. Refined energetics of Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.* V. 847. N 1. id 27. 2017.
4. Minamoto Y., Fujita S., Hara M. Frequency distributions of magnetic storms and SI + SSC-derived records at Kakioka, Memambetsu and Kanoya // *Earth Planets Space.* V. 67. id 191. 2015.
5. Riley P. On the probability of occurrence of the extreme space weather events // *Space Weather.* V. 10. N 2. S02012. doi:10.1029/2011SW000734. 2012.
6. Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / *Proc. IAU Symposium.* N 257. P. 119–130. 2009.
7. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 58. № 3. С. 356–372. 2018.
8. Clauset A., Shalizi C.R., Newman M.E.J. Power law distributions in empirical data // *SIAM Rev.* V. 51. N 4. P. 661–703. 2009.

THE 10 JULY 2012 EVENT: AN EXAMPLE OF NARROWBAND GYROSYNCHROTRON BURST?

Meshalkina¹ N.S., Fleishman^{2,3} G.D., Altyntsev¹ A.T.

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia*

²*Ioffe Physical Technical Institute, St. Petersburg, Russia*

³*Center for Solar-Terrestrial Research, New Jersey Institute of Technology, Newark, USA*
nata@iszf.irk.ru

We have identified events with steep (narrowband) microwave spectra that do not show a prolonged trapping and imply some degree of source uniformity. We revealed event of 10 July 2012 with such narrow spectra, having low- and high-frequency spectral indices larger than 3 in absolute value during the flare. Based on an analysis of radio images dynamics we concluded that even narrowband burst had the complex structure, consisting of two sources - low and high frequency ones. The behavior of each was very differ that appeared in spectrum shape and spatial structure dynamics.

Microwave ranges of flare bursts are an important source of information on parameters of flare plasma. Follows from a statistical study [1] that the integrated spectra of microwave bursts have usually the peak about 5 - 10 GHz dividing optically thick and thin parts of a spectrum. The spectrum of the gyrosynchrotron emission dominating in microwave emission of flare plasma increases in case of the radiating electrons with power law distribution on energy with the index $\gamma_{LF} = 2.9$, and the spectrum inclination at high frequencies γ_{HF} is proportional to an exponent of non thermal emitting electrons [2].

Rather dense plasma in a source can suppress radiation at low frequencies, i.e. result in values $\gamma_{LF} > 2.9$ because of Razin-effect. On the other hand, values of the index $\gamma_{LF} < 2.9$ can be explained if the area of emission grows with decreasing of frequency [3-5]. Therefore, in the case $\gamma_{LF} \geq 2.9$ it is natural to expect that the source is more or less spatially uniform and the integrated spectra can be used for plasma parameters estimations, magnetic field and non thermal electrons in an emission source.

Results of statistical verification of these assumptions [6] were unexpected. Firstly, the plasma density estimates on SXR emission appeared an order of magnitude lower than the values derived from the fitting of microwave spectra. Secondly, in all cases several HXR of sources were observed, and their locations didn't coincide with microwave sources. In one case when localization of microwave sources was available, their locations differed at different frequencies. Thus, sources even of narrowband spectra are appear non-uniform, in a particular, may contain several sources with various physical parameters and, thus, different spectra of radiation. To confirm if this is typical for (all/most of the) narrowband bursts requires a combination of spectral and spatial observations.

To this end, we analyzed dynamic spectra for 87 events in the catalog <http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/event/> from 1 Aug 2010 to 27 June 2013 and

found 10 July 2012 flare having low- and high-frequency spectral indices larger than 3 in absolute value during five time moments: beginning, rise, peak, decay, end of the burst, and imaged simultaneously by SSRT and NoRH at three MW frequencies (5.7 GHz, 17 GHz, and 34 GHz). The goal of the study is to clarify if such kind of events show spatial complexity or not.

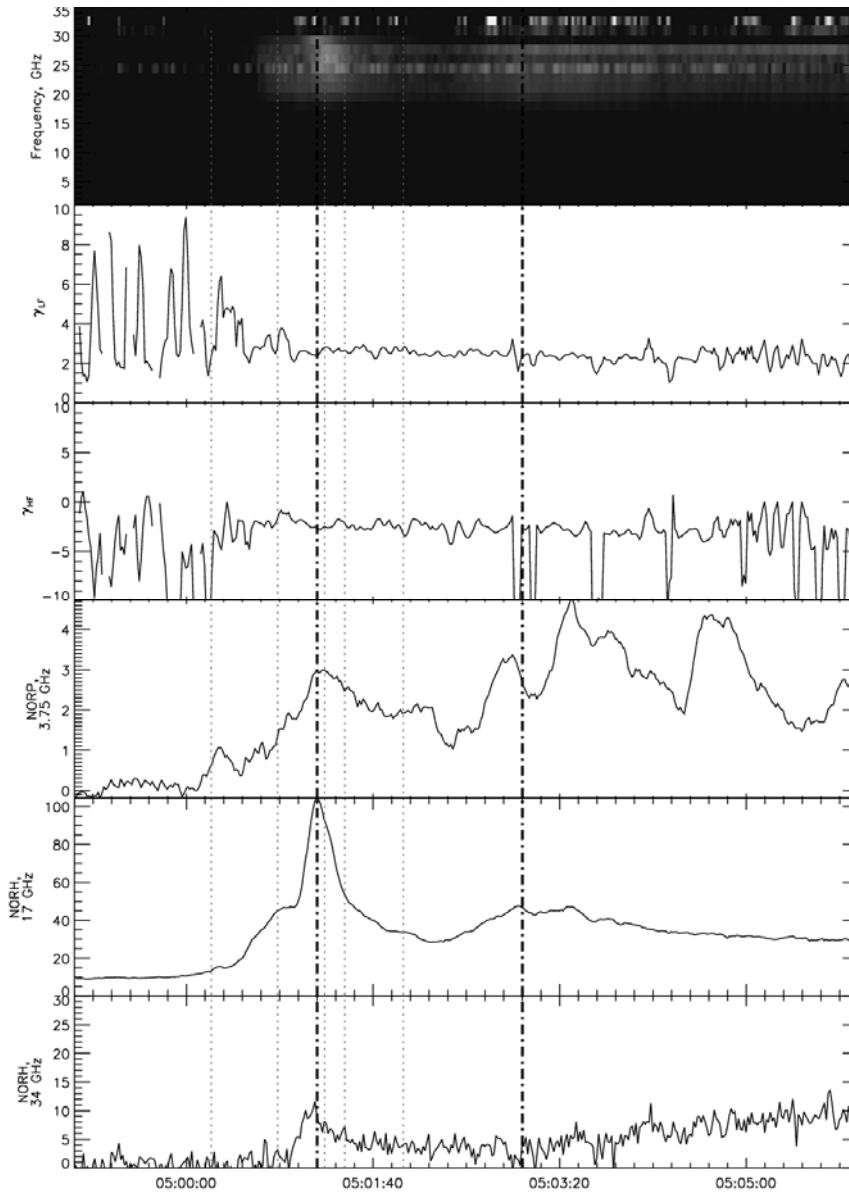


Fig. 1. From top to bottom: Microwave composite dynamic spectra. Microwave spectral parameters: slopes at low and high frequency parts obtained for each time moment by spectrum fitting. Fluxes of microwave emission (NORP, NORH). Dash-dotted lines mark moments showed in Figure 3. Dotted lines mark moments showed in Fig. 2, top.

For analysis radio spectra we used data of *Nobeyama Radio Polarimeters*, *Badary Broadband Microwave Spectropolarimeters* (BBMS) and the 2-24 GHz spectropolarimeter (*Solar Radio Spectropolarimeters* (SRS)). To study spatial configuration we used the SSRT and NORH data. The *Nobeyama Radioheliograph* (NORH) observed flare sources at 17 and 34 GHz. The *Siberian Solar Radio Telescope* (SSRT) operates in the 5.67-5.79 GHz range. We used the 45s full disk LOS

magnetograms from *the Helioseismic and Magnetic Imager* aboard the Solar Dynamics Observatory (SDO/HMI).

We combined the radio spectra from these instruments into one composite dynamic spectrum, making calibration of SRS and BBMS using fluxes from NORP (Fig.1).

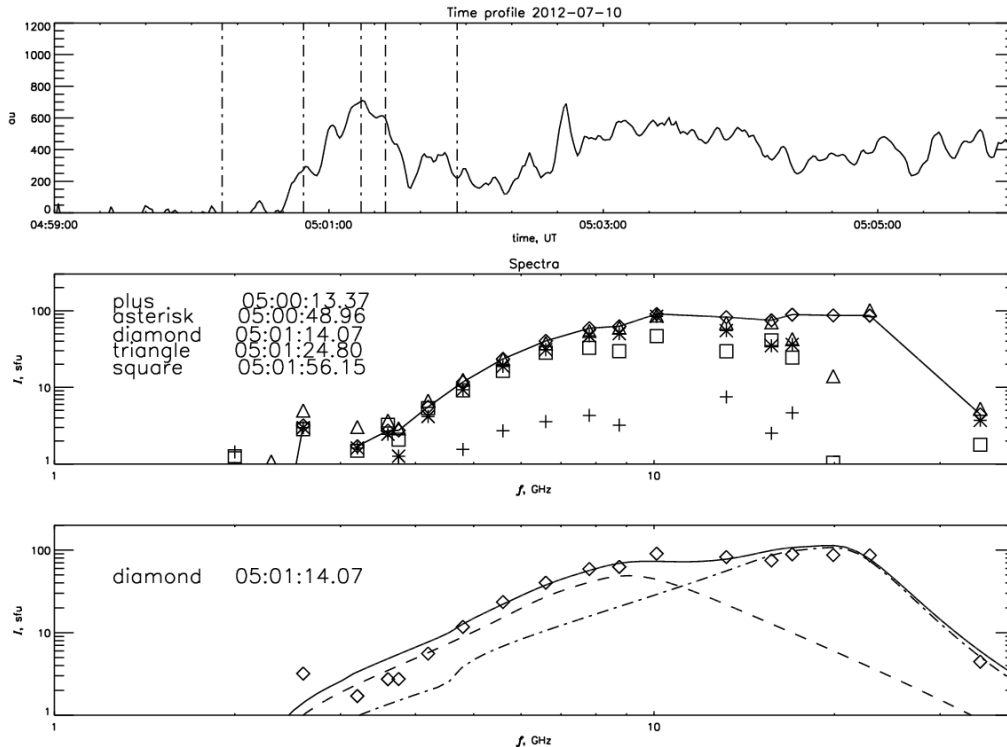


Fig. 2. 10 July 2012. Top: Total flux obtained from dynamic spectrum in Fig. 1. Middle: Spectra obtained in five moments of time marked at top palette by dashed-dotted lines. Solid line shows spectrum for peak 05:01:14.07. Bottom: The solid line indicates the result of spectrum fitting by two sources (dashed line: upper source and dash-dotted line: lower source) for peak at 05:01:14.07.

From the radio maps it follows that the spectrum consists of two main components emitted by the upper and lower sources at low and high frequencies, respectively. The spectrum of low frequency part demonstrates relatively constancy during the flare and spectrum of high frequency part shows instability (Fig. 2, middle). It is confirmed as well by spatial dynamics of both sources (Fig.3). Narrowband burst demonstrates the complex spatial structure and uniformity. The fitting of radio spectrum using the code for the gyrosynchrotron emission at the peak time showed that magnetic field was different in two sources: 500 G in the upper source and 1300 G at the lower source (Fig.2, bottom). The results were obtained using the unique Research Facility Siberian Solar Radio Telescope <http://ckp-rf.ru/usu/73606/>. This study was supported by the Program of basic research of the RAS Presidium No. 28.

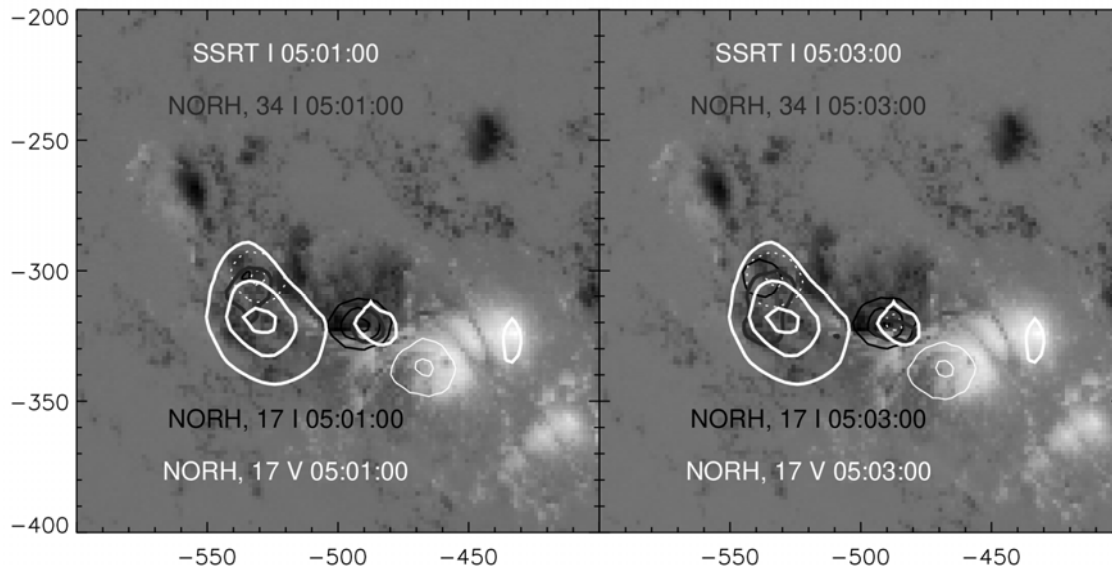


Fig. 3. Flare structure of 10 July 2012. Background – magnetograms HMI images at a) 05:01:10 UT; b) 05:03:00. Black contours show 17 GHz source subtracting background source at 04:59 (Stokes I, levels of contours are 30% and 90%), and grey solid contours show 34 GHz source subtracting background source at 04:59 (levels of contours are 30% and 90%) a) 05:01:10 b) 05:03:00. White thin contours show the 17 GHz sources of polarized emission at 30% and 90% level of maximum (solid line - RCP and dotted line - LCP), the same time as in intensity at 17 GHz. White thick solid contours show continuum 5.7 GHz source subtracting background source at 05:11, Stokes I (levels of contours are 20%, 60% and 90%) a) 05:01 b) 05:03. The axes show arc seconds from the solar disk center.

References

1. Nita Gelu M., Gary Dale E., Lanzerotti Louis J. Statistics of solar microwave radio burst spectra with implications for operations of microwave radio systems // *Space Weather*. V. 2(11). Cite ID S11005. 2004.
2. Dulk G.A. Radio emission from the sun and stars // *Annual review of astronomy and astrophysics*. V. 23. P. 169-224. 1985.
3. Gary D. E., Hurford G. J. Multifrequency observations of a solar microwave burst with two-dimensional spatial resolution // *Astrophysical Journal*. V. 361, P. 290-299. 1990
4. Lee J., Gary D. E., Zirin H. Flat microwave spectra seen at X-class flares // *Sol. Phys.*, V. 152. P. 409-428. 1994.
5. Altyntsev A., Meshalkina N., Mészárosóvá H., Karlický M., Palshin V., Lesovoi S. Sources of Quasi-periodic Pulses in the Flare of 18 August 2012 // *Sol. Phys.* V. 291. P. 445-463. 2016.
6. Fleishman Gregory D., Nita Gelu M., Kontar Eduard P., Gary Dale E. Narrowband Gyrosynchrotron Bursts: Probing Electron Acceleration in Solar Flares // *Astrophysical Journal*. V. 826(1). article id. 38, 17. 2016

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ ПО АРХИВНЫМ ДАНЫМ О ПРОТОННЫХ СОБЫТИЯХ

Мирошниченко^{1,2} Л.И.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

leonty@izmiran.ru

EXTREME SOLAR FLARES ON THE ARCHIVAL DATA ABOUT PROTON EVENTS

Miroshnichenko L.I.^{1,2}

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²SINP MSU Moscow, Russia

One of serious challenges to the problem of radiation hazard in space is a lack of a clear, unambiguous relation between the fluxes (fluences) of relativistic SCR and non-relativistic SEPs. Modern concept of Extreme Solar Event (ESE) is critically analyzed based on available direct/proxy data on solar cosmic rays (SCR), or solar energetic particles (SEPs). Special attention is paid to recent debate on validity, origin and properties of the events AD1859 (Carrington event) identified by nitrate method and AD775, AD994 and 3372 BC by radionuclide data. In spite of existing uncertainties in proton fluences above 30 MeV, all of them are fitted well by a unique distribution function, at least, with present level of solar activity. Extremely large SEP fluxes (fluences) are shown to obey a probabilistic distribution with a sharp break in the range of large fluences (or low probabilities). The studies of this kind may be extended for the periods with different levels of solar activity in the past and/or in the future. Considering the confirmation of super-flares on Sun-like stars, this issue merits attention.

В статье [1] было опубликовано дополнение при корректуре под названием «Экстремальные солнечные события: Миф или реальность?». Именно так приходится обозначать фундаментальную проблему, которая в последние два десятилетия вызывает пристальный интерес многих исследователей – от теоретиков-астрофизиков [2-5] до гляциологов и климатологов [6, 7], а также специалистов по радиационной безопасности космических миссий [8, 9]. «Цена вопроса» оказалась очень высокой. Только за последние 5 лет по этой проблеме опубликовано несколько десятков статей. Из них мы выделим, прежде всего, работы, в которых критически обсуждаются различные методологические аспекты изучения древних солнечных протонных событий (СПС). Особенно серьёзным сомнениям подвергается «нитратный метод».

Первые косвенные (*proxy*) данные о флюенсах солнечных протонов $\Phi(\geq 30$ МэВ) для ряда больших событий 1561-1994 гг. (в частности, для события Кэррингтона AD1859) были получены нитратным методом [10]. Вскоре другим (радиоуглеродным) методом были обнаружены событие AD775 [11-13], а также СПС AD994 [14] и даже 3372 BC [15]. Хотя данные [10] были весьма ограничены, авторы [16, 8] сочли возможным использовать их для построения новой функции распределения СПС по флюенсам $\Phi(\geq 30$ МэВ).

Впоследствии для той же цели нами [1] были учтены последние оценки флюенса для события AD775 [17], а также оценки предельного флюенса от СКЛ [18] для самых мощных СПС. С учётом состояния проблемы в целом, мы предлагаем использовать все полученные данные и оценки *совместно*, в рамках *единой пробной эмпирической модели*.

Новая функция распределения показана на рис. 1. Видно, что нитратные и радионуклидные данные по флюенсам $\Phi(\geq 30$ МэВ) удовлетворительно согласуются между собой в пределах неопределённостей соответствующих оценок. Что касается более ранних оценок [19], то они представляются нам явно завышенными.

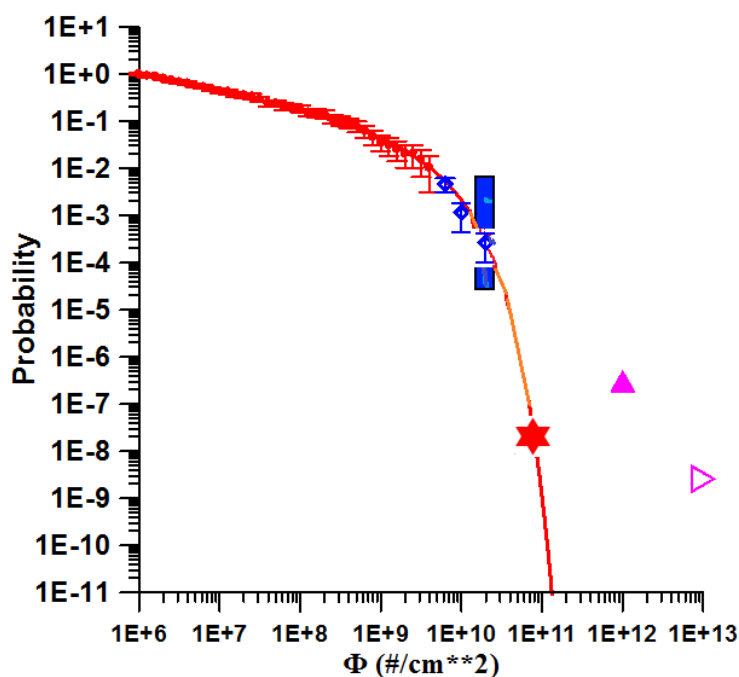


Рис. 1. Функция распределения СПС по интегральным флюенсам протонов $\phi \equiv \Phi(\geq 30$ МэВ) по данным о «древних» экстремальных протонных событиях [1]. Точки – данные прямых спутниковых измерений («космическая эра»); ромбы – оценки, полученные нитратным методом [10], включая событие Кэррингтона. Прямоугольник соответствует событию AD775 (по космогенным изотопам) с учётом разброса новейших оценок [17]. Звёздочка [18] – оценка максимального флюенса $\Phi(\geq 30$ МэВ) по содержанию космогенных изотопов в лунных породах. Треугольниками справа (полный и пустой) обозначены интегральные флюенсы $\Phi(\geq 30$ МэВ) при экстраполяции в прошлое на 1 млн. и 100 млн. лет, соответственно (оценки [16] по данным [19]). Цветной вариант рис.1 см. в обзоре [1]

Ещё перед публикацией [10] ряд авторов предпринимали попытки связать импульсные нитратные пики, обнаруженные во льдах Гренландии и Антарктиды, с большими СПС [20, 21]. Было обращено внимание на то, что пики запаздывают всего на несколько недель относительно больших СПС. Такая картина наблюдалась, в частности, после первых четырёх наземных возрастаний СКЛ (так называемых GLEs) [22]. Спустя несколько лет, эти публикации вызвали острую дискуссию о надёжности нитратных данных как для идентификации древних СПС, так и для оценки флюенсов $\Phi(\geq 30$ МэВ).

Так, авторы [6] отрицали наличие самого «нитратного сигнала» от события AD1859: они утверждали, что его можно было приписать осаждению пепла от лесных пожаров в Северной Америке. Этот вывод был оспорен в работе [23] на том основании, что авторы [6] опирались на данные с низким временным разрешением. Вскоре появились новые возражения [24] против аргументов [23]; при этом был сделан вывод, что использование данных о содержании космогенного изотопа ^{10}Be представляется более перспективным, пусть даже и с меньшим разрешением.

Наконец, отметим обстоятельное исследование [25], в котором так называемая WACCM (обобщённая климатическая модель) применяется для детального изучения вопроса: насколько мощным должно быть СПС, чтобы генерировать по всей атмосфере количество нитратов, достаточное для обнаружения современными методами. Вывод [25] звучит как «приговор» нитратному методу: нитраты не могут служить в качестве *proxy data* для изучения древних СПС, а результаты, основанные на этих данных, должны быть отвергнуты. Заметим, кстати, что авторы другого исследования [26], опираясь на результаты моделирования и измерений в различных кернах полярного льда, пришли к выводу: даже при высоком временном разрешении (до 20 образцов-измерений в год) и при исключении процессов после отложения нитратов, не удаётся обнаружить нитратный сигнал от события AD775, хотя оно и считается пока самым большим из всех известных древних СПС. Авторы [27], в свою очередь, после анализа нитратных данных для событий AD775, 994, 1859 и 1956 годов считают, что ни в одном из них не было достаточно чёткого (измеримого) нитратного сигнала.

Это, однако, не исключает возможности использовать нитратные данные для изучения, например, многолетних вариаций ГКЛ [28]. Более того, вэйвлет-анализ обнаружил высокую степень когерентности между пиками ^{10}Be и содержанием нитратов. При этом предпочтительную связь между ^{10}Be и нитратами (по сравнению с другими малыми химическими составляющими атмосферы) можно приписать их общему космогенному источнику. Здесь уместно отметить многообразие источников генерации нитратов в земной атмосфере [29], мультидисциплинарный характер самой проблемы [30] и наличие нерешённых или плохо изученных вопросов взаимодействия СКЛ с земной атмосферой [30, 31, 25].

В заключение приведём также несколько интересных замечаний из книги [32]. Одно из них констатирует простой факт: то, что для одного учёного представляет интерес как *proxy data*, для другого является просто «шумом». Действительно, генерация космогенных составляющих атмосферы регулируется солнечной активностью и (на больших временных масштабах) напряжённостью геомагнитного поля. Однако результирующий космогенный «сигнал» не сразу и не прямо фиксируется в природных архивах: перед этим космогенные радионуклиды подвергаются различным процессам переноса, которые модифицируют первичный сигнал. Специалист по СПС будет называть эти модификации «шумом», так как они искажают интересующий его

сигнал от СКЛ. Напротив, для физика или химика, занимающегося изучением атмосферы, именно такие модификации представляют наибольший интерес, поскольку они могут привести к улучшению моделей атмосферной циркуляции (перемешивания) и, тем самым, к лучшему пониманию взаимодействия между стратосферой и тропосферой.

В итоге автору [1] представляется преждевременным полностью «закрывать» нитратный метод в применении к древним СПС. Достаточно вспомнить, что все имеющиеся данные являются косвенными «по определению», а оценки флюенсов сильно зависят от принимаемого «сценария» события. Задача состоит в том, чтобы на примере реального большого, хорошо документированного события (типа 20 января 2005 г. [33, 34]) корректно учесть такие особенности СПС, как анизотропия СКЛ, N/S-асимметрия их вторжения в атмосферу, энергетический спектр, длительность события и т.д. При этом, возможно, удастся количественно оценить *относительную долю СПС* в суммарном нитратном сигнале. Во всяком случае, надо иметь в виду предостережение авторов [35]: «***Thus SCR events detected by one method may not be seen using another and vice versa***». Трудно выразить суть дела короче!

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-29-01022).

Литература

1. Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи: 75 лет исследований. *Успехи физических наук*. **188**, №4, 345-376, 2018.
2. Aulanier, G., P. Démoulin, C.J. Schrijver, M. Janvier, E. Pariat, and B. Schmieder. The standard flare model in three dimensions. II. Upper limit on solar flare energy. *Astron. Astrophys.*, 549, A66. 2013.
3. Livshits, M.A., G.V. Rudenko, M.M. Katsova, I.I. Myshyakov. The magnetic virial theorem and the nature of flares on the Sun and other G stars. *Adv. Space Res.*, **55**, 920-926, 2015.
4. Kichatinov, L.L., and S.V. Olemskoy. Dynamo model for grand maxima of solar activity: Can super flares occur on the Sun? *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **459**, 4353-4359, 2016.
5. Katsova, M.M., L.L. Kichatinov, M.A. Livshits, D.L. Moss, D.D. Sokoloff, and I.G. Usoskin. Can superflares occur on the Sun? A view from dynamo theory. *Russian Astronomy Reports*, **62**, No.1, 72-80, 2018.
6. Wolff, E.W., M. Bigler, M.A.J. Curran, J.E. Dibb, M.M. Frey, M. Legrand, and J.R. McConnell. The Carrington event not observed in most ice core nitrate records. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L08503, 2012.
7. Schrijver, C.J., Beer, J., Baltensperger, U., Cliver, E., Gudel, M., Hudson, H., McCracken, K.G., Osten, R., Peter, T., Soderblom, D., Usoskin, I., and Wolff, E.W. Estimating the frequency of extremely energetic solar events, based on solar, stellar, lunar, and terrestrial records. *J. Geophys. Res.*, **117**, A08103, 2012.
8. Popova, E.P., N.V. Kuznetsov, and M.I. Panasyuk. Predicting GCR fluxes for future space missions. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, **81**, No.2, 173-176, 2017.
9. Panasyuk M., V. Kalegaev, L. Miroshnichenko, N. Kuznetsov, R. Nymmik, E. Popova, B. Yushkov, V. Benghin. Near-Earth radiation environment for extreme solar and geomagnetic conditions. – In: *Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences*, 349-372, 2018.

10. McCracken K.G., Dreschhoff G.A.M., Zeller E.J., Smart D.F., and Shea M.A. Solar cosmic ray events for the period 1561-1994. 1. Identification in polar ice, 1561-1950. *J. Geophys. Res.*, **106**, 21585-21598, 2001.
11. Miyake, F., K. Nagaya, K. Masuda & T. Nakamura. A signature of cosmic-ray increase in AD774–775 from tree rings in Japan. *Nature*. **486**, 240-242, 2012.
12. Usoskin, I.G., Kromer, B., Ludlow, F., Beer, J., Friedrich, M., Kovaltsov, G.A., Solanki, S.K., and Wacker L. The AD775 cosmic event revisited: the Sun is to blame. *Astron. Astrophys.*, **552**, L3, 2013.
13. Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Lange, T.E., Kukarskih, V.V., V.S. Myglan, K.J. Clark, M.W. Salzer, G.S. Burr, and S.W. Leavitt. Excursions in the ¹⁴C record at A.D. 774-775 in tree rings from Russia and America. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7 pp., 2014.
14. Miyake, F., K. Masuda, & T. Nakamura. Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings. *Nature Commun.*, **4**, 1748, 1-6, 2013.
15. Wang, F.Y., H. Yu, Y.C. Zou, Z.G. Dai & K.S. Cheng. A rapid cosmic-ray increase in BC 3372-3371 from ancient buried tree rings in China. *Nature Comm.*, **8**, 1487, 2017.
16. Miroshnichenko, L.I., Nymmik, R.A. Extreme fluxes in solar energetic particle events: Methodological and physical limitations. *Radiation Measurements*, **61**, 6-15, 2014.
17. Mekhaldi, F., Muscheler R., Adolphi F., Aldahan A., Beer J., McConnell J.R., Possnert G., Sigl M., Svenson A., Synal H.-A., Welten K.C., and Woodruff T.F. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4. *Nature Commun.*, **6**, 8611, 2015.
18. Kovaltsov, G.A. and I.G. Usoskin. Occurrence probability of large solar energetic particle events: Assessment from data on cosmogenic radionuclides in lunar rocks. *Solar Phys.*, **289**, 211–220, 2014.
19. Kiraly, P., and Wolfendale, A.W. Long-term particle fluence distributions and short-term observations. *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf.*, Salt Lake City, USA, **6**, 163–166, 1999.
20. Dreschhoff, G.A.M., Zeller, E.J. Evidence of individual solar proton events in Antarctic snows. *Solar Phys.* **127**, 333-346, 1990.
21. Smart, D.F., Shea, M.A., and McCracken, K.G. The Carrington event: Possible solar proton intensity-time profile. *Adv. Space Res.*, **38**, 215-225, 2006.
22. Kepko, L., Spence, H., Smart, D.F., Shea, M.A. Interhemispheric observations of impulsive nitrate enhancements associated with the four large ground-level solar cosmic ray events (1940–1950). *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, **71**, 1840–1845, 2009.
23. Smart, D.F., M.A. Shea, A.L. Melott, and C.M. Laird. Low time resolution analysis of polar ice cores cannot detect impulsive nitrate events. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **119**, 9430–9440, 2014.
24. Wolff, E.W., M. Bigler, M.A.J. Curran, J.E. Dibb, M.M. Frey, M. Legrand, and J.R. McConnell. Comment on “Low time resolution analysis of polar ice cores cannot detect impulsive nitrate events” by D.F. Smart et al. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **121**, 1920-1924, 2016.
25. Duderstadt, K.A., J.E. Dibb, N.A. Schwadron, H.E. Spence, S.C. Solomon, V.A. Yudin, C.H. Jackman, and C.E. Randall. Nitrate ion spikes in ice cores not suitable as proxies for solar proton events. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 2994–3016, 2016.
26. Sukhodolov, T., I. Usoskin, E. Rozanov, E. Asvestari, W.T. Ball, M.A.J. Curran, H. Fischer, G. Kovaltsov, F. Miyake, T. Peter, C. Plummer, W. Schmutz, M. Severi, and R. Traversi. Atmospheric impacts of the strongest known solar particle storm of 775 AD. *Nature Sci. Rep.*, **7**, 45257, 2017.
27. Mekhaldi, F., Muscheler R., Adolphi F., Aldahan A., Beer J., McConnell J.R., Possnert G., Sigl M., Svenson A., Synal H.-A., Welten K.C., and Woodruff T.F. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4. *Nature Commun.*, **6**, 8611, 2015.

28. Traversi, R., S. Becagli, S. Poluianov, M. Severi, S.K. Solanki, I.G. Usoskin & R. Udisti. The Laschamp geomagnetic excursion featured in nitrate record from EPICA-Dome C ice core. *Sci. Rep.* **6**, 20235, 2016.
29. Ogurtsov, M.G., Oinonen M. Evidence of the solar Gleissberg cycle in the nitrate concentration in polar ice. *J. of Atm. and Solar-Terr. Physics*, **109**, 37–42, 2014.
30. Sigl M., M. Winstrup, J.R. McConnell, K.C. Welten, G. Plunkett, F. Ludlow, U. Büntgen, M. Caffee, N. Chellman, D. Dahl-Jensen, H. Fischer, S. Kipfstuhl, C. Kostick, O.J. Maselli, F. Mekhaldi, R. Mulvaney, R. Muscheler, D.R. Pasteris, J.R. Pilcher, M. Salzer, S. Schüpbach, J.P. Steffensen, B.M. Vinther & T.E. Woodruff. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, **523**, 543-549, 2015.
31. Miroshnichenko, L.I. Solar Cosmic Rays in the System of Solar-Terrestrial Relations (Review). *J. Atm. and Solar-Terr. Physics (Special Issue of ISROSES Proceedings)*, **70**, 450-466, 2008.
32. Mironova, I.A., Aplin, K.L., Arnold, F., Bazilevskaya, G.A., Harrison, R.G., Krivolutsky, A.A., Nicoll, K.A., Rozanov, E.V., Turunen, E., Usoskin, I.G. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere. *Space Sci. Rev.*, **194**, 1-96, 2015.
33. Beer J., K.G. McCracken, R. von Steiger. *Cosmogenic Radionuclides: Physics of Earth and Space Environments*, Springer, Berlin, pp.426, 2012.
34. Krivolutsky, A.A., and Repnev, A.I. The impact of cosmic energetic particles on the Earth's atmosphere (Review). *Geomagnetism and Aeronomy*, **52**, 723-754 (in Russian), 2012.
35. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky, B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from modeling. *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **7**, 459–463, 2011.
36. Webber W.R., Higbie P.R., McCracken K.G. Production of the cosmogenic isotopes ^3H , ^7Be , ^{10}Be , and ^{36}Cl in the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays. *J. Geophys. Res.*, **112**, A10106, 2007.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛНОГО ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО EUV ($\lambda < 1050 \text{ \AA}$) ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА 5 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Михайлов¹ А.В., Перроне² Л.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²INGV, г. Рим, Италия

mikhailov71@gmail.ru

LONG-TERM VARIATIONS OF THE TOTAL SOLAR EUV FLUX WITH $\lambda < 1050 \text{ \AA}$ ON IONOSPHERIC OBSERVATIONS OVER THE PERIOD OF 5 SOLAR CYCLES

Mikhailov¹ A.V., Perrone² L.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²INGV, Rome, Italy

A new method to extract aeronomic parameters from routine ionospheric (f_oF_1) observations was used to retrieve the total solar EUV flux with $\lambda < 1050 \text{ \AA}$ for Junes of the (1958-2017) period. The retrieved EUV solar cycle variations are close to the EUVAC model ones. The retrieved 1996/2008 interminimum EUV change is $\sim 2\%$ and this is much less than commonly accepted 10% change. The latter results in temperature and density interminimum changes which contradict satellite drag observations.

На основе решения обратной задачи аэрoномии [6] по извлечению термосферных параметров (Tex , O , O_2 , N_2) и полного потока солнечного КВ излучения с $\lambda < 1050 \text{ \AA}$ из ионосферных (f_oF_1) наблюдений впервые были восстановлены среднемесячные значения КВ излучения для июней всех лет, начиная с 1958 по 2017 гг. (Рис. 1). Метод может быть использован только в летнее время, когда слой F_1 отчетливо присутствует на ионограммах. Для анализа были использованы наблюдения f_oF_1 на среднеширотных станциях ионосферного зондирования: Рим, Слау, Москва, Юлиусру и высокоширотной станции Соданкула, расположенной в авроральной зоне. Восстановленные вариации КВ излучения должны быть близкими на разных станциях и это, действительно, так – черные кривые на Рис. 1 для среднеширотных станций практически совпадают, хотя наблюдаемые вариации f_oF_1 на этих станциях никоим образом не связаны между собой. Дополнительным подтверждением эффективности метода служит хорошее совпадение с моделью EUVAC [7], которая не имеет никакого отношения к данному методу.

В отличие от среднеширотных станций, авроральная станция Соданкула дает систематически завышенные значения потока КВ излучения как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности. Единственно возможным объяснением этому может служить корпускулярная ионизация, вероятно, присутствующая в Соданкуле (67.4N; 26.6E) даже в дневные часы летнего сезона.

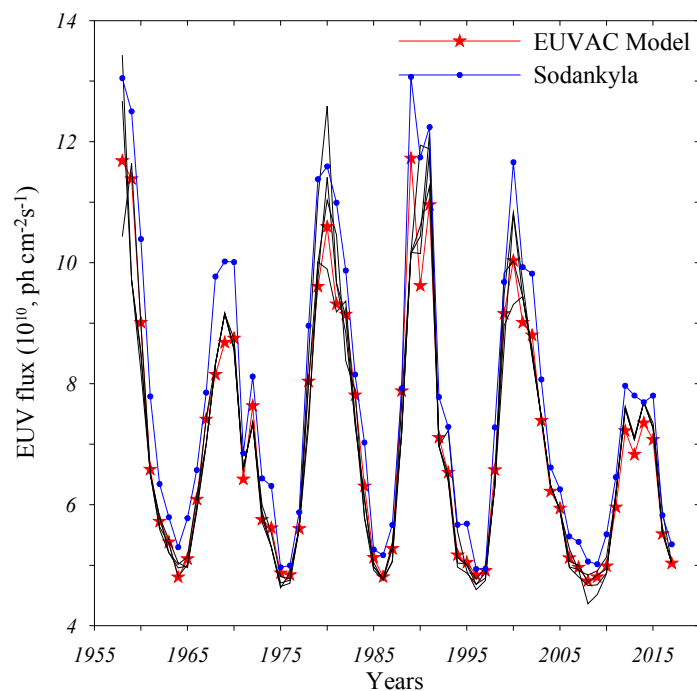


Рис. 1. Восстановленные вариации полного потока солнечного КВ излучения с $\lambda < 1050 \text{ \AA}$ для июня месяца 1958-2017 гг. с использованием наблюдений foF1 по авроральной станции Соданкула (синяя кривая) и среднеширотным станциям: Юлиусру, Слау, Москва и Рим (практически совпадающие кривые даны черным цветом). Для сравнения дана модель EUVAC, широко используемая в аэрономических расчетах.

По этой причине восстановленные потоки КВ излучения по ст. Соданкула были исключены из дальнейшего рассмотрения, а по среднеширотным станциям были взяты усредненные вариации КВ излучения.

В связи с последним глубоким минимумом солнечной активности в 2008-2009 гг. представляет интерес сопоставление с предыдущими минимумами.

Глубокий и широко обсуждаемый минимум 2008-2009 гг. был, действительно, самым низким из 5 последних минимумов, как мы видим из Таблицы 1, сравнивая потоки КВ излучения и индексы солнечной активности. Минимум 1965 г. был самым высоким по уровню КВ излучения, хотя индекс $(F_{10.7})_{3\text{mon}}$ не был максимальным для этого минимума. Это - хорошо известная проблема: верно ли индексы $F_{10.7}$ описывают вариации КВ излучения [8, 1, 9]. Прямое сопоставление восстановленных потоков КВ излучения с $(F_{10.7})_{3\text{mon}}$ (Таблица 1 верхняя строка) указывает на отсутствие статистически значимой связи. Это имеет место как для $(F_{10.7})_{3\text{mon}}$, так и для $(F_{10.7\text{ mon}} + F_{10.7\text{ 3mon}})/2$ (индекс, используемый в модели EUVAC).

Таблица 1. Усредненные и модельные (EUVAC, италик) потоки (в 10^{10} кв см⁻² с⁻¹) для лет минимума солнечной активности. Даны также 3-х месячный индекс $F_{10.7}$ и индекс $(F_{10.7 \text{ мон}} + F_{10.7 \text{ 3мон}})/2$, используемый в модели EUVAC в качестве показателя уровня солнечной активности. Значения в скобках – средние за два года величины.

Годы	1964/1965	1975/1976	1985/1986	1996/1997	2008/2009
$(F_{10.7})_{3\text{мон}}$	68.5/76.5 (72.5)	72.3/69.6 (70.9)	78.3/70.1 (74.2)	70.3/72.5 (71.4)	66.7/69.1 (67.9)
Средние КВ	5.06/5.32 (5.19)	5.09/5.06 (5.07)	4.96/5.03 (4.99)	5.09/4.91 (5.00)	4.85/4.96 (4.90)
$(F_{\text{мон}} + F_{3\text{мон}})/2$	68.7/76.7 (72.7)	71.0/70.1 (70.5)	77.2/68.9 (73.0)	69.9/72.1 (71.0)	66.3/68.8 (67.5)
EUVAC	4.80/5.10 (4.95)	4.87/4.84 (4.85)	5.12/4.80 (4.96)	4.83/4.91 (4.87)	4.74/4.80 (4.77)

Изменение потока КВ излучения от минимума 1996/1997 к минимуму 2008/2009 гг. составляет ~2.0%, а модель EUVAC дает ~2.1% (Таблица 1). Это совпадение двух абсолютно независимых оценок представляется интересным. Следует отметить, что это различие в 2% между двумя минимумами значительно меньше отличия в 10%, полученного в [9, 5], $12 \pm 4\%$ различия по данным [2], а также последних оценок (6–13)% [4], однако это ближе к прежним оценкам (0-6)%, полученным в [3].

Интересно оценить эффект 10% изменения КВ излучения, предсказанного другими исследователями, сравнивая два последних минимума солнечной активности. С этой целью были проведены расчеты по восстановлению термосферных параметров для трех станций, сильно разнесенных по долготе: Слау, Москва и Вакканай (Таблица 2).

Таблица 2. Экзосферная температура T_{ex} и общая плотность на высоте 300 км для июня 2008 г. с уменьшенной на 10% интенсивностью КВ излучения по сравнению с 1996 г.

Станция	1996		2008	
	$T_{\text{ex}}, \text{ К}$	$\rho_{300}, 10^{-15} \text{ г см}^{-3}$	$T_{\text{ex}}, \text{ К}$ с -10% КВ	$\rho_{300} (10^{-15} \text{ г см}^{-3})$ с -10% КВ
Слау	776	6.773	856	10.50
Москва	769	6.160	819	8.334
Вакканай	787	6.997	816	7.852

Был получен ожидаемый результат: экзосферная температура T_{ex} и общая плотность атмосферы на 300 км ρ_{300} возросли по отношению к 1996 г. Такие изменения T_{ex} и ρ_{300} противоречат данным по торможению спутников [3, 4], указывающим на уменьшение T_{ex} и ρ_{300} в 2008 г. по отношению к 1996 г. Таким образом, можно заключить, что изменение КВ излучения в минимуме 2008 г. по сравнению с минимумом 1996 г. должно быть менее 10%. Удовлетворительные результаты получены при изменении на ~2%, что согласуется с предсказанием по модели EUVAC [7].

Литература

1. Chen Y., Liu L., Wan W. Does the $F_{10,7}$ index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007 – 2009 ? // *J. Geophys. Res.* V. 116. A04304. 2011. doi:10.1029/2010JA016301.
2. Didkovsky L., Wieman S. Ionospheric total electron contents (TECs) as indicators of solar EUV changes during the last two solar minima // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 119. P. 4175–4184. 2014. doi:10.1002/2014JA019977.
3. Emmert J. T., McDonald S. E., Drob D. P., Meier R. R., Lean J. L., Picone J. M. Attribution of interminima changes in the global thermosphere and ionosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 119. P. 6657–6688. 2014. doi:10.1002/2013JA019484.
4. Emmert J. T., Mannucci A. J., McDonald S. E., Vergados P. Attribution of interminimum changes in global and hemispheric total electron content. *J. Geophys. Res. Space Physics.* V.122. P. 2424–2439. 2017. doi:10.1002/2016JA023680.
5. Huang J., Hao Y., Zhang D., Xiao Z. Revisiting interminima solar EUV change using adjusted SOHO SEM data, *J. Geophys. Res. Space Physics.* V.122. P. 3420–3429. 2017. doi:10.1002/2016JA023664.
6. Mikhailov A.V. Perrone L. Geomagnetic control of the mid-latitude daytime f_0F_1 and f_0F_2 long-term variations: Physical interpretation using European observations. *J. Geophys. Res. Space Physics.* V.121. P. 7193–7203. 2016. doi:10.1002/2016JA022716.
7. Richards, P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 8981-8992. 1994.
8. Solomon, S.C., Qian L., Didkovsky L.V., Viereck R.A., Woods T.N. Causes of low thermospheric density during the 2007-2009 solar minimum. *J. Geophys. Res.* V. 116. 2011. A00H07, doi:10.1029/2011JA016508.
9. Solomon, S. C., Qian L., Burns A. G. The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24. *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 118, P. 6524–6535. 2013. doi:10.1002/jgra.50561.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ: ИСТОЧНИК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ИЛИ АНТРОПОГЕННЫЙ?

Михайлов¹ А.В., Перроне² Л.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²INGV, г. Рим, Италия

mikhailov71@gmail.ru

LONG-TERM VARIATIONS OF THERMOSPHERIC PARAMETERS: THEIR ORIGIN - NATURAL OR ANTHROPOGENIC?

Mikhailov¹ A.V., Perrone² L.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²INGV, Rome, Italy

A recently developed method to retrieve thermospheric parameters from ionospheric (critical frequency f_oF_1) observations has been applied to analyze long-term variations of exospheric temperature T_{ex} and neutral gas density ρ at 300 km height for the (1960-2015) period. Trends may be both positive (mostly at higher latitudes) and negative (at lower latitudes) but the majority of them are statistically insignificant during the rising phase (1960-1985) of solar activity. However trends are negative and significant during the falling phase (1985-2015) of solar activity. Geomagnetic activity variation as the governing process is proposed.

Земля находится в атмосфере Солнца, а потому ее верхняя атмосфера находится под полным контролем солнечной активности (геомагнитную активность можно рассматривать как часть солнечной), и причины всякого рода долговременных изменений в верхней атмосфере следует искать в изменениях солнечной активности. Однако в последние десятилетия под давлением экономических и экологических проблем стало общепринятым связывать указанные изменения в верхней атмосфере Земли с антропогенной деятельностью и прежде всего с увеличением содержания CO_2 в атмосфере. Несмотря на очевидные противоречия с наблюдениями, парниковая гипотеза остается весьма популярной. Согласно наблюдениям имеется постоянный ~5% рост содержания CO_2 в атмосфере (Рис. 1, верхняя панель), тогда как солнечная и геомагнитная активности демонстрируют фазы роста (1960-1985) и спада (1985-2010) (Рис. 1, нижняя панель). Отметим аналогичные долговременные изменения магнитного момента солнечного диполя [1]. Поэтому, если солнечная активность ответственна за долговременные изменения в термосфере Земли, то можно ожидать разные тренды в термосферных параметрах на фазах роста и спада солнечной активности.

CO2 parts per million (annual mean figures)

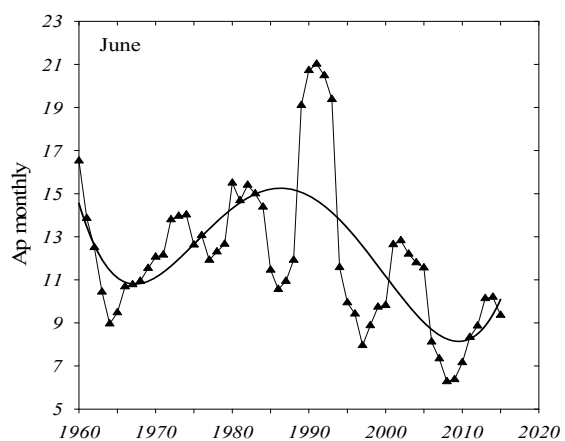
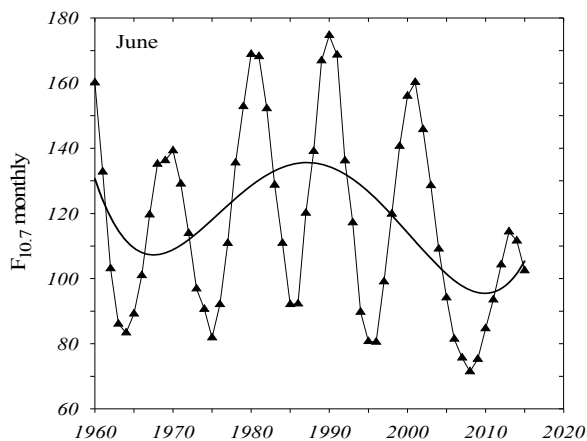
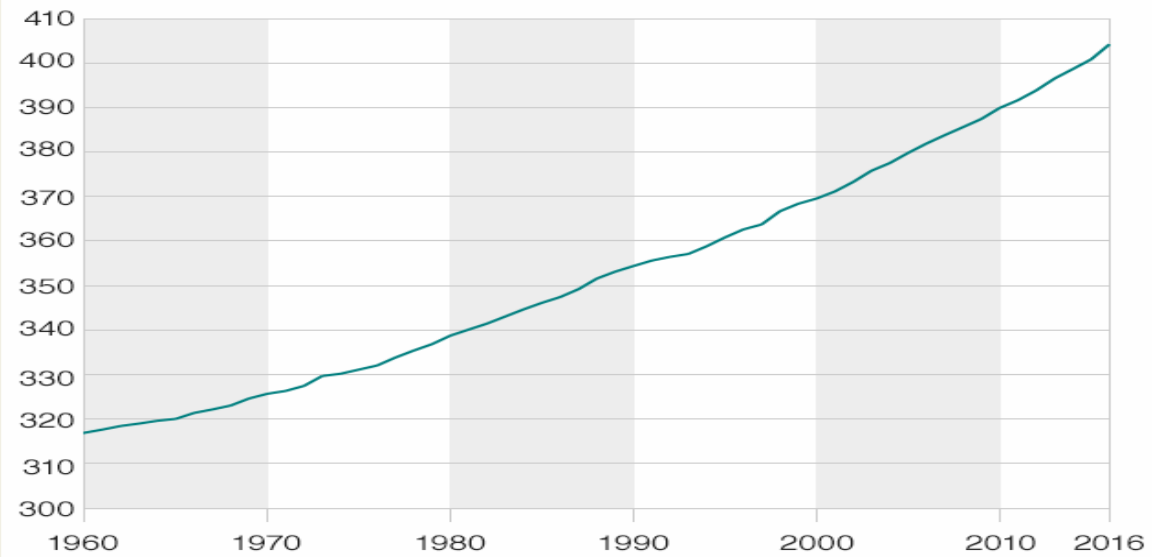


Рис. 1. Изменение содержания CO₂ в атмосфере Земли и сглаженные среднемесячные значения индексов солнечной (F_{10.7}) и геомагнитной (Ap) активности для июней 1960-2015 гг. Сплошной линией даны полиномиальные аппроксимации вариаций F_{10.7} и Ap.

Недавно разработанный метод по решению обратной задачи аэрoномии [2] позволяет из наблюдаемых вариаций f_oF_1 восстановить вариации нейтрального состава (O, O₂, N₂) и температуры T_{ex} и оценить долговременные тренды термосферных параметров для периодов с доступными f_oF_1 наблюдениями. В Таблице 1 приведены линейные тренды ($Y=b_1 \times \text{год} + b_0$) для восстановленных T_{ex} и общей плотности атмосферы на 300 км. Указан знак тренда (Pos, Neg), его статистическая значимость по t-критерию и коэффициент b_1 , определяющий этот тренд. Анализируемые станции находятся на разных геомагнитных широтах (цифры в скобках). Из Таблицы 1 видно, что на фазе роста солнечной активности тренды могут быть как положительными (в основном на высокоширотных станциях), так и отрицательными (на более низкоширотных станциях), но большинство из них статистически незначимы. На фазе спада солнечной активности все тренды отрицательны и,

как правило, значимы. Значимость соответствует более высоким значениям коэффициента b_1 (Таб. 1).

Таблица 1. Долговременные относительные тренды экзосферной температуры и плотности атмосферы на 300 км на фазах роста (1960-1985 гг.) и спада (1985-2015 гг.) солнечной активности. Указаны знак тренда, его величина и статистическая значимость. Рядом со станцией дана ее геомагнитная широта.

Station	1960-1985		1985-2015	
	T_{ex}	ρ_{300}	T_{ex}	ρ_{300}
Sodankylä (63.7)	Pos (Sign) 5.23e-4	Pos (Sign) 1.85e-3	Neg (Sign) -8.73e-4	Neg (Sign) -3.44e-3
Ottawa (56.8)	Pos (Insign) 4.13e-4	Pos (Sign) 1.66e-4		
Petersburg (56.2)	Pos (Insign) 6.92e-5	Pos (Insign) 6.98e-4		
Juliusruh (54.4)	Neg (Insign) -7.57e-5	Neg (Insign) -2.76e-4	Neg (Sign) -6.09e-4	Neg (Sign) -2.40e-3
Slough (54.2)	Neg (Insign) -1.50e-4	Neg (Insign) -7.58e-4	Neg (Sign) -6.59e-4	Neg (Sign) -1.24e-3
Moscow (50.8)	Pos (Insign) 1.23e-4	Pos (Insign) 1.32e-3	Neg (Insign) -2.01e-4	Neg (Sign) -3.44e-3
Ekaterinburg (48.4)	Neg (Insign) -4.28e-4	Neg (Insign) -8.82e-4		
Tomsk (45.9)	Neg (Sign) -5.99e-4	Neg (Sign) -1.47e-3		
Rome (42.5)	Neg (Sign) -6.05e-4	Pos (Insign) 1.27e-4	Neg (Sign) -7.35e-4	Neg (Sign) -2.11e-3
Irkutsk (41.1)	Neg (Insign) -4.07e-4	Neg (Insign) -7.92e-4		

Положительные тренды в T_{ex} и ρ_{300} на фазе роста солнечной активности противоречат концепции охлаждения термосферы за счет роста содержания CO_2 . С другой стороны, средний относительный тренд T_{ex} на фазе спада составляет $\sim 6 \times 10^{-4}$ за год (Таблица 1). За 30 лет имеем 1.8×10^{-2} , т.е. уменьшение T_{ex} на 1.8%, что при средней $T_{ex} = 1000K$ составляет 18K. При двукратном сценарии увеличения CO_2 ожидаемое охлаждение термосферы составит 50K [3]. За 5 десятилетий индустриального развития на сегодня мы имеем $\sim 28\%$ увеличение CO_2 , что в предположении линейной зависимости дает охлаждение на 14K или 2.8K за декаду. Соответственно, за 30 лет получаем охлаждение на 8.4K, что значительно меньше полученной выше оценки 18K. Это указывает на значительно более сильное охлаждение термосферы за последние 30 лет по сравнению с тем, что дает гипотеза увеличения CO_2 . Учитывая зависимость остаточных трендов (зависимость от $F_{10.7}$ была выбрана при получении трендов) от геомагнитной широты (Таблица 1), в качестве возможного механизма может выступать геомагнитная активность, непосредственно влияющая на T_{ex} . Параллельно с этим идет механизм охлажде-

ния термосферы за счет CO₂. На фазе роста солнечной активности (1960-1985) два процесса работают в противоположных направлениях, и геомагнитный нагрев доминирует лишь на высоких широтах, тогда как на фазе спада (1985-2015) оба процесса работают в одном направлении и тренды отрицательны и значимы (Таблица 1).

Литература

1. Obridko V.N., Shelting B.D. Anomalies in the evolution of global and large-scale solar magnetic fields as the precursors of several upcoming low solar cycles // *Astronomy Letters*, V. 35, P. 247-252. 2009.
2. Mikhailov A.V., Perrone L. Geomagnetic control of the mid-latitude daytime f_oF₁ and f_oF₂ long-term variations: Physical interpretation using European observations. *J. Geophys. Res. Space Physics*. V.121. P. 7193–7203. 2016. doi:10.1002/2016JA022716.
3. Rishbeth H.A Greenhouse effect in the ionosphere? *Planet. Space Sci.* V.38 P. 945-948. 1990.

ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ПОМЕХ НА КАМЧАТКЕ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Михайлов¹ Ю.М., Михайлова¹ Г.А., Капустина¹ О.В., Дружин² Г.И.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИКИР ДВО РАН, п. Паратунка, Камчатский край, Россия

yumikh@izmiran.ru

ATMOSPHERIC NOISE VARIATIONS IN KAMCHATKA DURING SOLAR FLARES AND GEOMAGNETIC DISTURBANCES

Mikhailov¹ Yu.M., Mikhailova¹ G. A., Kapustina¹ O. V., Druzin² G.I.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²IKIR DVO RAN, Paratunka, Kamchatka, Russia

Variations in atmospheric noises at a frequency of 5.3 kHz recorded in September-October 1999 in Kamchatka are considered. It is found that during solar flares, a sudden attenuation of atmospheric noises is observed only for X-ray fluxes of point M exceeding values of $\sim 10^{-5} \text{ W/m}^2$. There was also a decrease in the level of atmospheric noises during the day with increased geomagnetic activity ($\Sigma Kp \geq 29$).

Измерения во внешней ионосфере спектров частично-диспергированных свистящих атмосфериков (СА), т.е. сигналов молниевых разрядов, проходящих к уровню спутника из приземного волновода по короткому пути, показали следующее: во время геомагнитных возмущений (при $Kp \geq 5$) спектр СА сужается в область более низких частот по сравнению с фоновым, что свидетельствует о возрастании затухания электромагнитных волн на частотах $f > 3$ кГц [1]. Ниже приведены некоторые результаты анализа вариаций уровня атмосферных помех (АП) как совокупности атмосфериков, регистрируемых на Камчатке во время солнечных вспышек и геомагнитных возмущений. Используются регулярные записи магнитной компоненты АП на частоте 5,3 кГц с дискретностью 1 мин, полученные на ст. «Карымшина» ($\varphi = 52^\circ 20' \text{N}$; $\lambda = 158^\circ 08' \text{E}$, $L = 2,1$) в сентябре-октябре 1999 г.

Средний суточный уровень АП в относительных единицах в спокойных геофизических условиях в дни с $\Sigma Kp \leq 20$ показан тонкими линиями на рис. 1 и 2, соответственно. Статистические оценки этих кривых приведены в работе [2]. На этих же рисунках приведены суточные кривые АП в зависимости от величины Kp -индекса при повышенной геомагнитной активности ($\Sigma Kp \geq 29$). Видно ослабление уровня АП при $Kp \geq 4$.

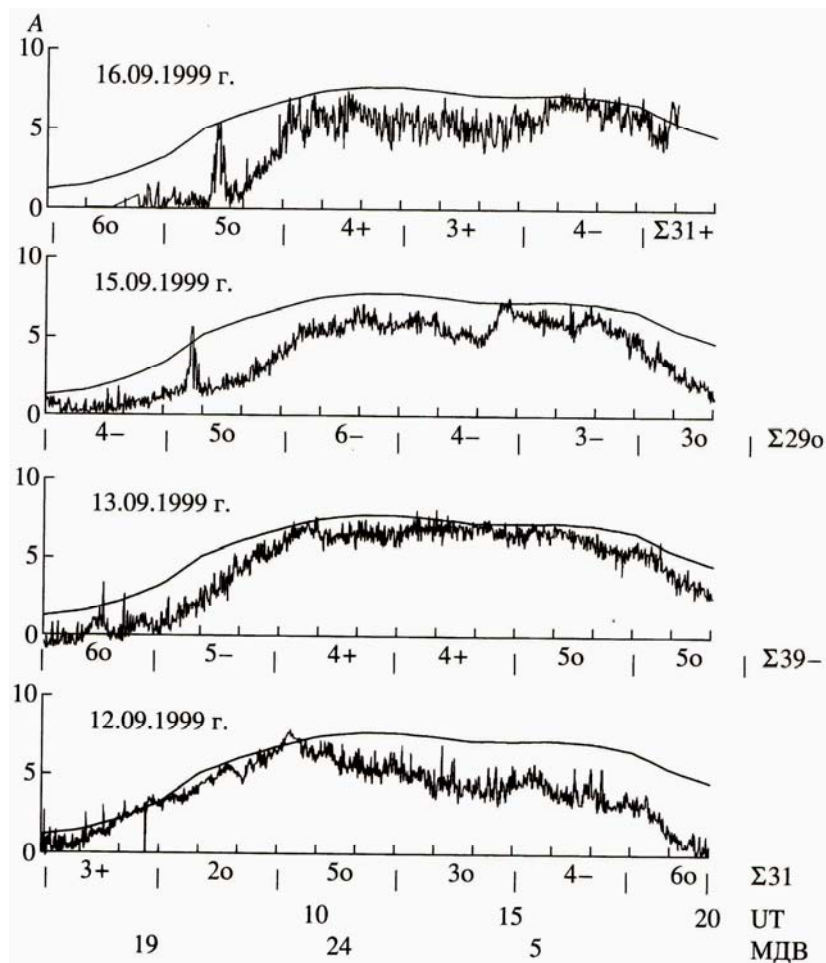


Рис. 1. Вариации суточных кривых от средних значений (тонкие линии) в зависимости от 3-часовых значений K_p в сентябре.

Солнечные вспышки, как известно, продолжаются очень короткое время: от 15-20 мин до 1,5-2 ч и сопровождаются потоками рентгеновского излучения от $1 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² (баллы C, M, X соответственно), проникающего глубоко в ионосферу до $h \sim 60$ км. Анализ записей атмосферных помех на частоте 5,3 кГц показал, что при серии вспышек средней интенсивности в течение суток наблюдаются слабые вариации, едва превышающие среднеквадратические отклонения. Существенное влияние на уровень атмосферных помех, уменьшая его, оказывают одиночные вспышки при значениях W, превышающих $1 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² (балл M). В качестве иллюстрации на рис.3 приведены случаи единичной слабой вспышки (C, $1,2 \cdot 10^{-6}$ Вт/м² в 13.50-14.10 UT) 7 сентября, серии вспышек средней интенсивности 17 сентября (11.52 - 12.19 UT C, $4,5 \cdot 10^{-6}$ Вт/м²; 01.30 - 02.00 UT M, $1,5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 14.30 - 14.45 UT C, $1,4 \cdot 10^{-6}$ Вт/м²) и единичной мощной вспышки 14 октября в 08.54 UT X $1,8 \cdot 10^{-4}$.

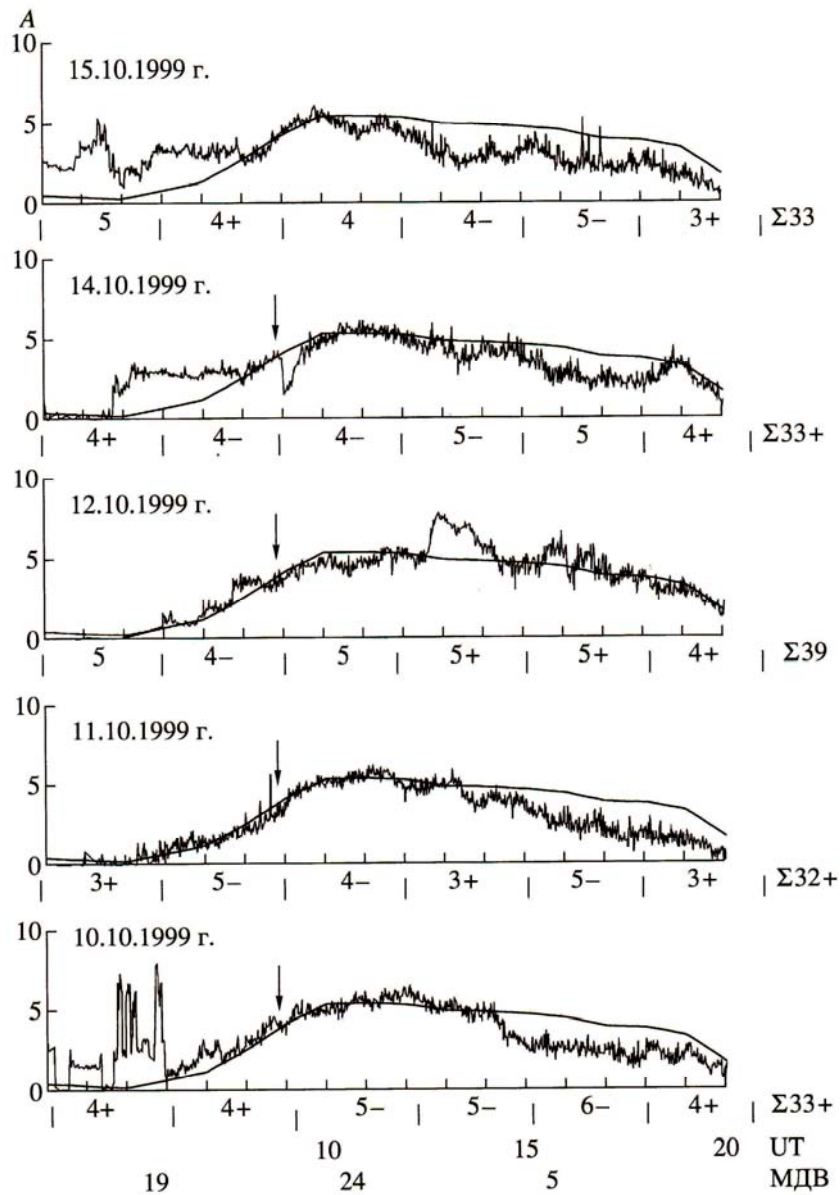


Рис. 2. То же, что на рис.1, но в октябре.

Полученные в работе экспериментальные результаты согласуются с результатами других исследований АП, а также с результатами теоретических расчетов распространения электромагнитных волн в диапазоне 0,5 - 10 кГц в волноводе Земля - нижняя ионосфера [3].

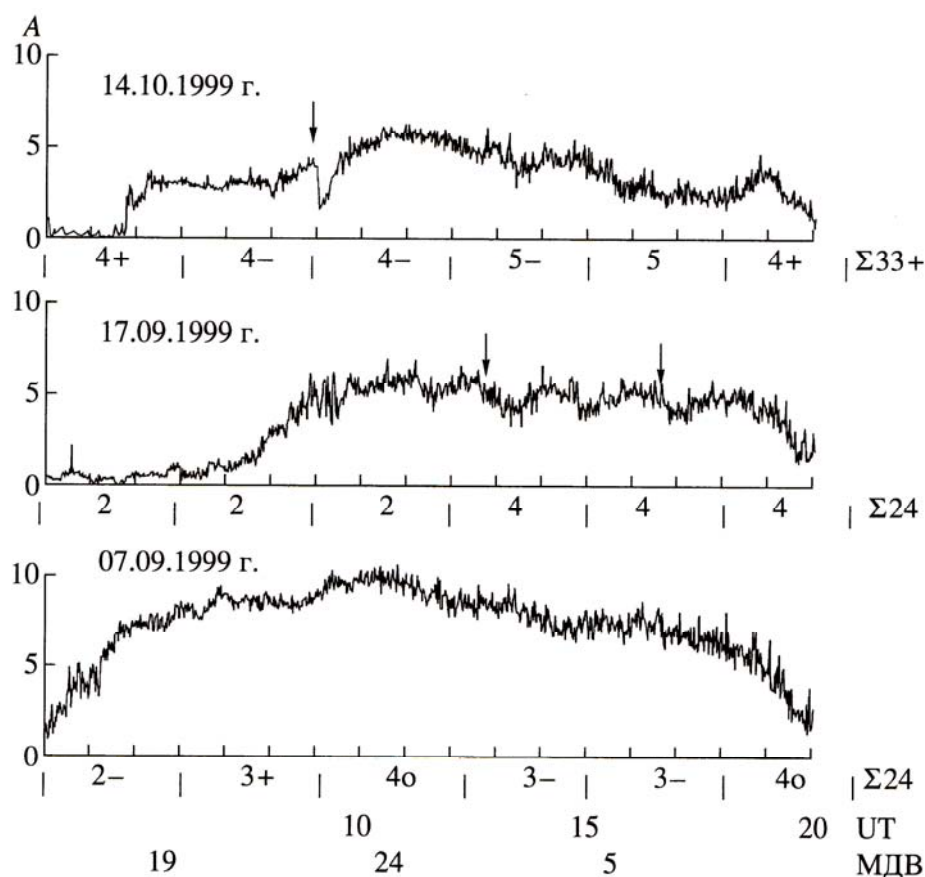


Рис. 3. Эффекты солнечных вспышек: слабых 7 сентября, средних 17 сентября и сильной 14 октября.

Таким образом, анализ суточных вариаций интенсивности атмосферных помех на частоте $f = 5,3$ кГц в сентябре-октябре 1999 г. на Камчатке показал следующее:

- Во время геомагнитных возмущений с $\Sigma Kp \geq 29$ в течение нескольких дней понижается уровень атмосферных помех.
- Во время солнечных вспышек уровень атмосферных помех внезапно понижается на период от нескольких минут до 2 ч.

Литература

1. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. КНЧ- и ОНЧ-электромагнитный фон во внешней ионосфере над сейсмоактивными районами (ИСЗ "Интеркосмос-24") // Геомагнетизм и аэрономия. Т.37. №4. С.78-85. 1997.
2. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Митрофанов В.Н., Вершинин Е.Ф., Дружин Г.И. Вариации атмосферных помех на Камчатке во время солнечных вспышек и геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т.41. №6. С.836-840. 2001.
3. Борисов Н.Д., Дубовой А.П., Флигель Д.С., Ярославцев А.А. Влияние солнечных вспышек на распространение низкочастотных волн (0,5 – 10 кГц) в волноводе Земля-ионосфера // Геомагнетизм и аэрономия. Т.31. №5. С.792-800. 1991.

**ВАРИАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ,
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ СПЕКТРОВ
МОЩНОСТИ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ
ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В НОЯБРЕ 2004 ГОДА**

Михайлов¹ Ю.М., Михайлова¹ Г.А., Капустина¹ О.В., Смирнов² С.Э.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИКИР ДВО РАН, п. Паратунка, Камчатский край, Россия

yumikh@izmiran.ru

**VARIATIONS IN THE QUASISTATIC ELECTRIC FIELD, METEOROLOGICAL
VALUES AND THEIR POWER SPECTRA IN THE NEAR EARTH ATMOSPHERE IN
KAMCHATKA DURING THE NOVEMBER 2004 GEOMAGNETIC STORMS**

Mikhailov¹ Yu.M., Mikhailova¹ G.A., Kapustina¹ O.V., Smirnov² S.E.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²IKIR DVO RAN, Paratunka, Kamchatka, Russia

The effects of the geomagnetic storms of November 8 and 10, 2004, in variations in the strength and power spectra of the electric field in the near Earth's atmosphere in Kamchatka were studied, together with the meteorological and geophysical values observed simultaneously. These effects were supposed to be associated with the action of cosmic rays on currents of the global electric circuit.

Результаты исследований эффектов мощных солнечных вспышек и сопровождающих их геомагнитных бурь в вариациях электрических и метеорологических величин в приземном слое атмосферы на средних широтах, очень ограничены и довольно противоречивы. Краткий обзор приведен в работе [1].

В отличие от предшествующих работ, для исследования эффектов геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. на Камчатке (обс. «Паратунка», $\varphi = 52.9^{\circ}$ N, $\lambda = 158.25^{\circ}$ E) нами использован более широкий набор различных геофизических и метеорологических величин, наблюдаемых одновременно. В стандартных обозначениях они показаны на рис.1. (Более детально хронологическая последовательность солнечных событий описана в статье [2]). Как видно на рисунке, в период 4-15 ноября выделяются явления со следующими индивидуальными особенностями:

- дни «хорошей погоды» (4-5 ноября). При слабой геомагнитной активности ($K_p \leq 3$) солнечная активность в оптической области спектра была слабой (SF) [2]. В этих условиях суточный ход температуры атмосферы (кривая 3) изменялся регулярным образом, т.е. максимум температуры $T = +4^{\circ}$ С отмечался в местный полдень (01:30 UT), а минимум $T = -13^{\circ}$ С – перед восходом Солнца. Соответственно, в противофазе с температурой влажность воздуха составляла $\sim 40\%$ и $\sim 75\%$. В этих условиях напряженность электриче-

ского поля имела характерный суточный ход с типичным возрастанием на восходе и заходе Солнца [3];

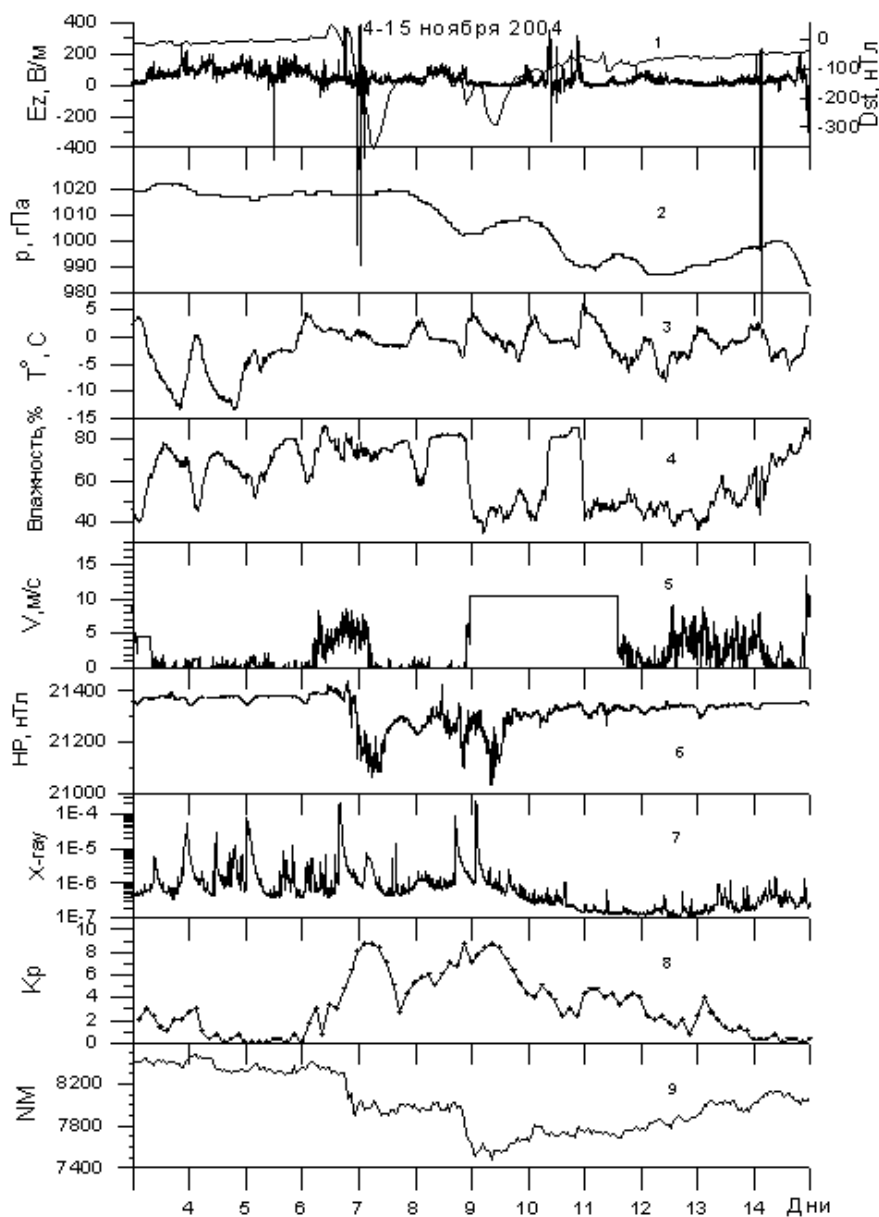


Рис. 1. Суточные вариации напряженности электрического поля, метеорологических, геофизических и солнечных величин в период 4-15 ноября 2004 г.

- дни с аномальным суточным ходом температуры и влажности атмосферы (6-7 ноября). В $t = 01:00$ UT 6 ноября произошла солнечная вспышка, в оптической области спектра которой яркость усилилась до $2N$. Одновременно произошло резкое искажение суточного хода температуры и влажности атмосферы. 7 ноября в $t \sim 16:00$ UT произошла следующая мощная вспышка ($X2.0/2B$), которая привела к дальнейшему повышению температуры в полдень до $+5^{\circ}C$ и росту влажности до 85%, а также к усилению ветра до ~ 7 м/с. Эти резкие изменения атмосферных процессов в нижней атмо-

сфере, сопровождаемые усилением турбулентных и конвективных потоков воздуха, привели к формированию грозových процессов;

- период главной фазы бури 8 ноября с наложенными грозowymi процессами в атмосфере (12:00 UT 7 ноября – 12:00 UT 8 ноября);

- период бури 10 ноября;

- период с последующим развитием грозových процессов в атмосфере (11 ноября).

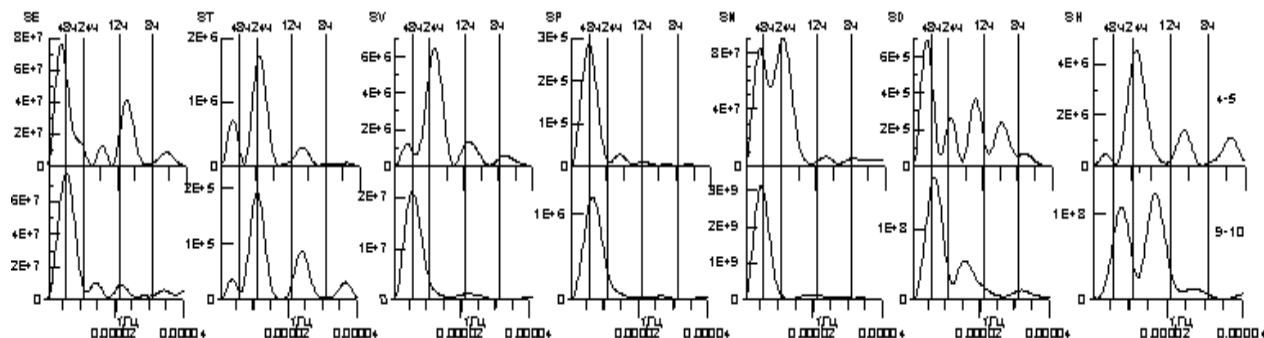


Рис. 2. Спектры мощности электрического поля и геофизических величин, приведенных на рис. 1.

Для анализа взаимосвязи различных геофизических процессов в приземной атмосфере с солнечными и геомагнитными явлениями оценена спектральная плотность мощности (кратко спектр мощности) всех рассмотренных нами величин в интервале периодов 4-48 ч. Динамика спектров в период 4-15 ноября приведена в работе [1], а на рис. 2 показаны спектры мощности только для дней 4-5 ноября (с «хорошей погодой») и 9-10 ноября с бурей 10 ноября. Как видно на рисунке, 4-5 ноября в спектре мощности электрического поля выделяются компоненты с периодами $T \leq 8, 12, 48$ ч с преобладающей интенсивностью на $T \sim 48$ ч, а в период 9-10 ноября – только компонента с $T \sim 48$ ч. 4-5 ноября во всех спектрах (SP, SN, SD), кроме спектров температуры (ST), влажности (SV) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SH), также преобладают компоненты с $T \sim 48$ ч. В период бури в спектрах влажности, давления и ГКЛ интенсивность этой компоненты возросла почти на два порядка по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды». Подобный характер спектра мощности электрического поля в этой полосе периодов наблюдался на Камчатке во время геомагнитной бури 22 сентября 1999 г. [4].

Таким образом, анализ временных вариаций напряженности квазистатического электрического поля, метеорологических величин и их спектров мощности в приземной атмосфере во время солнечных событий в ноябре 2004 г. показал следующее:

В спокойных геомагнитных условиях электрическое поле испытывает наибольшее влияние вариаций относительной влажности атмосферы, усиливающее компоненту в его спектре с периодом $T \sim 24$ ч.

Последовательность сильных солнечных вспышек сопровождалась аномальным повышением температуры и влажности атмосферы, что привело к возбуждению аномально мощных грозových процессов.

Обнаружено усиление напряженности и интенсивности спектров мощности электрического поля накануне геомагнитной бури 10 ноября с последующим ослаблением этих величин в день бури. Качественно этот эффект может быть связан с действием космических лучей на токи глобальной электрической цепи, которые способны изменить ионизацию атмосферы на различных участках этой цепи (солнечные протоны на высотах ~ 50 км, а ГКЛ на высотах $\sim 15-20$ км).

Во время Форбуш-эффекта наблюдается одновременное усиление интенсивности атмосферных волн планетарного масштаба ($T \sim 48$ ч) в спектрах мощности ГКЛ и электрического поля.

Литература

1. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т.53. № 4. С.532-546. 2013.
2. Ермолаев Ю.И. и 48 соавторов. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т.45. №6. С.723-763. 2005.
3. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке. 1. Временные вариации электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т.52. № 4. С.535-540. 2012.
4. Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Спектры мощности тепловых приливных и планетарных волн в приземной атмосфере и в D-области ионосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т.49. № 5. С.639-652. 2009.

ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СПЕКТРАХ МОЩНОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН В ДИНАМО-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Михайлов¹ Ю.М., Михайлова¹ Г.А., Капустина¹ О.В., Смирнов² С.Э.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИКИР ДВО РАН, п. Паратунка, Камчатский край, Россия

yumikh@izmiran.ru

EFFECTS OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN POWER SPECTRA OF ATMOSPHERIC WAVES IN THE DYNAMO REGION OF THE IONOSPHERE

Mikhailov¹ Yu.M., Mikhailova¹ G.A., Kapustina¹ O.V., Smirnov² S.E.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²IKIR DVO RAN, Paratunka, Kamchatka, Russia

The dynamics of wave disturbances in the ionospheric E region in the band of periods of thermal tidal waves ($T = 4-24h$) and waves of planetary scales ($T = 48, 72, \text{ and } 192 h$) has been studied based on the variations in the horizontal component of the geomagnetic field, observed at Paratunka and Barrow observatories in September–October 1999. It has been found that, at mid latitudes and in the polar ionosphere the variations in the 48–192 h band of periods (especially with $T \sim 192 h$) intensify simultaneously with increasing geomagnetic activity.

Для анализа волновых процессов в E -области ионосферы традиционно используются вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля, наблюдаемые у поверхности Земли. Это Sq -вариации, в спектрах которых выделены три отдельные полосы периодов колебаний: периоды $T > 24$ ч, $T = 4-24$ ч и $T < 4$ ч [1]. Авторы работы [2] в суточных вариациях горизонтальной компоненты геомагнитного поля на Камчатке также выделили полный набор колебаний с периодами $T = 24, 12, 8, 4$ ч и $T < 4$ ч и обнаружили, что при высокой геомагнитной активности частота и интенсивность максимумов этих колебаний смещаются относительно их устойчивых значений в спокойных условиях. Далее эти исследования были расширены, включая колебания с $T > 24$ ч [3].

В качестве исходных данных использованы записи суточных вариаций горизонтальной компоненты (H) геомагнитного поля с дискретностью по времени 1 мин, полученные на Камчатке (обс. “Паратунка”, ИКИР ДВО РАН, $\varphi=52.97^\circ\text{N}$; $\lambda=158.25^\circ\text{E}$) и в полярной обсерватории Barrow ($\varphi=71.32^\circ\text{N}$; $\lambda=203.38^\circ\text{E}$) в сентябре–октябре 1999 г. Состояние геомагнитной активности оценено через параметры Kp и ΣKp (рис.1). Для оценки спектральной плотности мощности S^2 нТл²/Гц (для краткости, спектры мощности) исходных записей $H(t)$ выбрано прямоугольное “окно” длительностью $t_i = 8$ сут., которое смещалось на одни сутки вдоль двухмесячного временного ряда.

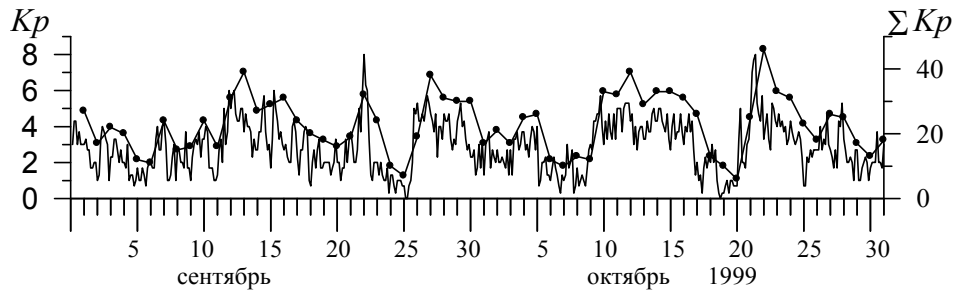


Рис. 1. Вариации индексов Kp и ΣKp (точки).

В качестве примера на рис. 2 (обс. “Паратунка”) и на рис. 3 (обс. Bagow) приведены два фрагмента. Фрагменты (а) представляют собой последовательность спектров мощности в спокойный период, когда $Kp < 4$ и $\Sigma Kp < 25$.

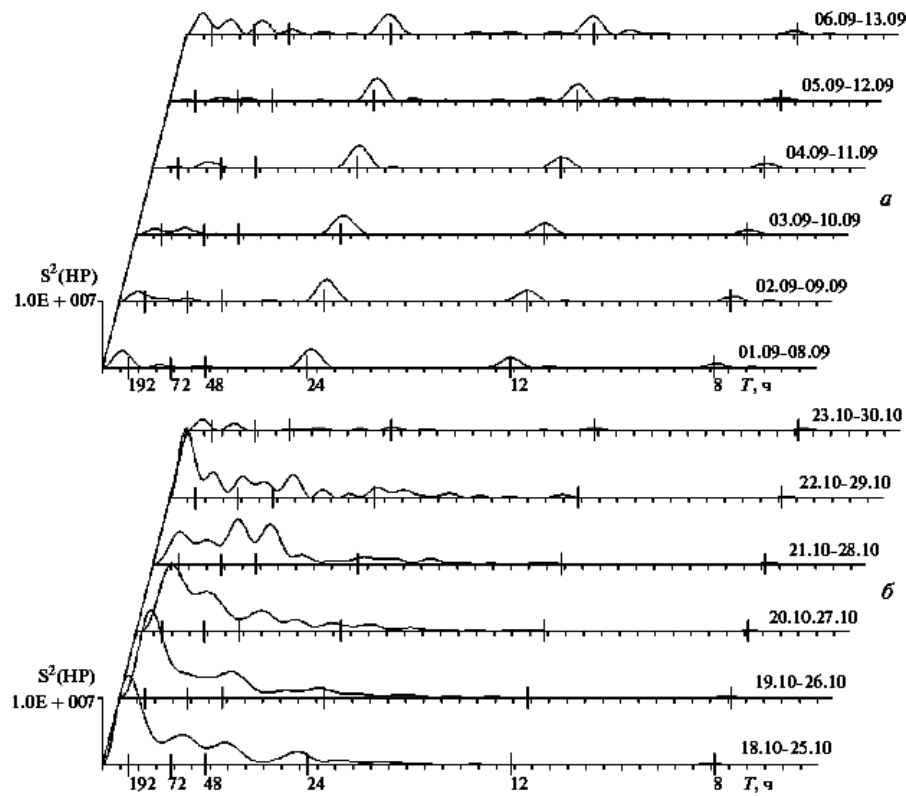


Рис. 2. Динамические спектры мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля $H(t)$ в обс. “Паратунка” в спокойных геомагнитных условиях (а) и при высокой геомагнитной активности (б).

При высокой геомагнитной активности: $Kp \sim 7$ и $\Sigma Kp \sim 50$ (фрагменты б) спектры мощности $H(t)$ в обеих обсерваториях сильно изменились. В обс. “Паратунка” исчезли колебания с $T \sim 8, 12$ ч, уменьшилась интенсивность колебаний с $T \sim 24$ ч, но заметно усилились колебания в полосе периодов 48-192 ч, особенно на $T \sim 192$ ч (интенсивность этой гармоник в несколько раз превышает интенсивность на $T \sim 24$ ч). В этот же период наблюдений в обс.

Варго возросла интенсивность гармоник с $T \sim 24$ ч, и усложнился спектр во всем диапазоне. В частности, появились заметные максимумы в полосе 48-192 ч, но их интенсивность значительно меньше интенсивности основной гармоник.

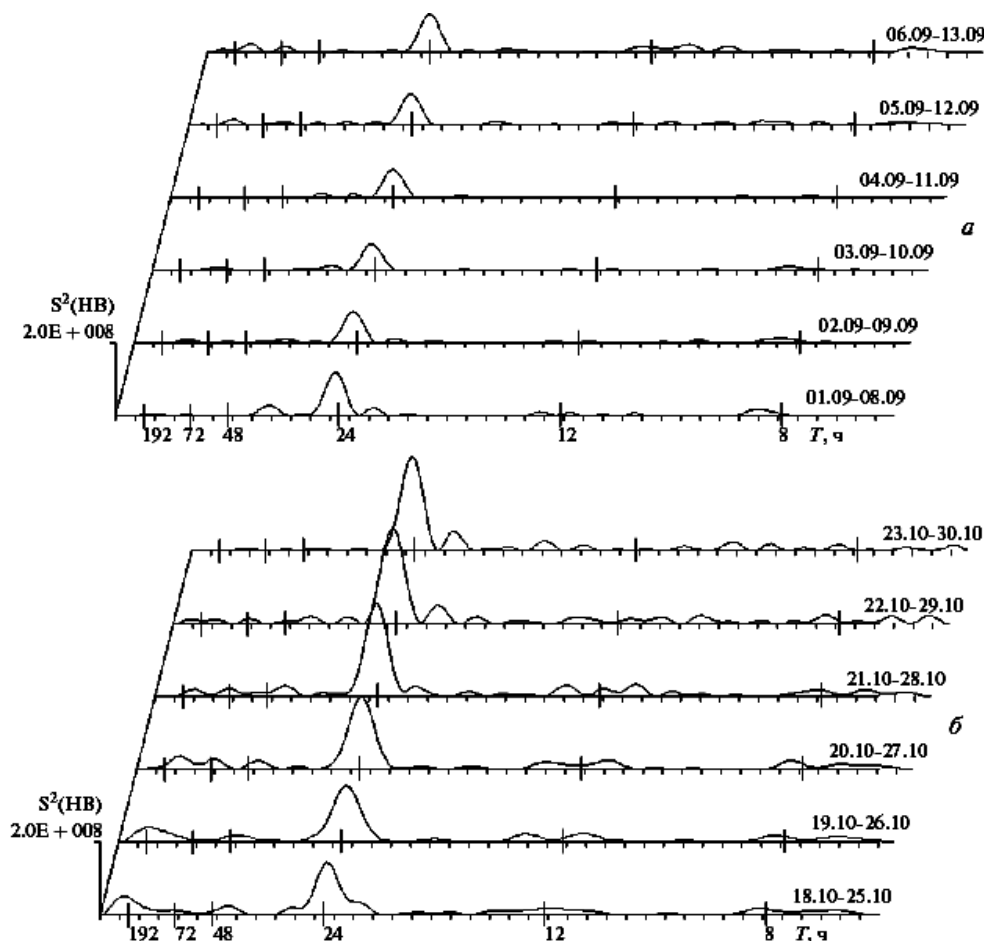


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но по данным $H(t)$ в obs. Варго.

Более детальный анализ вариаций интенсивности максимумов спектров и значений их периодов, наблюдаемых одновременно в obs. “Паратунка” и obs. Варго, выполнен в работе [3].

Таким образом, анализ динамики спектров мощности суточных вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля, наблюдаемых на Камчатке и в полярной области, показал следующее:

- в спокойных геомагнитных условиях в спектрах мощности выделены устойчивые колебания со стабильными значениями периодов $T \cong 8, 12, 24$ ч (в среднеширотной ионосфере) и с единственным периодом $T \sim 24$ ч в полярной ионосфере;

- эффекты высокой геомагнитной активности в среднеширотной E -области ионосферы проявлялись в изменении интенсивности колебаний с $T \sim 12$ и 24 ч с периодичностью 16 сут., не совпадающей с периодичностью изменения ΣKp -индекса;

- в полярной ионосфере эффект высокой геомагнитной активности проявлялся в усилении интенсивности колебаний с $T \sim 24$ ч;

- в период высокой геомагнитной активности и в среднеширотной, и в полярной ионосфере одновременно усиливались колебания с периодами планетарных волн ($T \sim 48-192$ ч), особенно с $T \sim 192$ ч. Интенсивность этой гармоника в среднеширотной ионосфере в несколько раз превышает интенсивность гармоника на $T \sim 24$ ч.

Литература

1. Vincent R.A. Planetary and gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere // Handbook for MAP / Eds. K. Labitzke, J.J. Barnett, B. Edwards. V. 16. P. 269–277. 1985.
2. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Спектры атмосферных волн в динамо-области ионосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 48. № 1. С. 122–128. 2008.
3. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферных волн в динамо-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 49. № 2. С. 26–266. 2009.

**ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЕЙ
В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН И ИХ СПЕКТРОВ МОЩНОСТИ В ПРИЗЕМНОЙ
АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ
В ОКТЯБРЕ 2003 г.**

Михайлов¹ Ю.М., Михайлова¹ Г.А., Капустина¹ О.В., Смирнов² С.Э.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИКИР ДВО РАН, п. Паратунка, Камчатский край, Россия

yumikh@izmiran.ru

**EFFECTS OF SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITIES IN VARIATIONS OF
ELECTRIC AND METEOROLOGICAL VALUES AND THEIR POWER SPECTRA
IN THE NEAR EARTH'S ATMOSPHERE IN KAMCHATKA
DURING OCTOBER 2003 SOLAR EVENTS**

Mikhailov¹ Yu.M., Mikhailova¹ G.A., Kapustina¹ O.V., Smirnov² S.E.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²IKIR DVO RAN, Paratunka, Kamchatka, Russia

The diurnal variations in the electric conductivity of air, electric field strength, and meteorological values and its power spectra in the near Earth's atmosphere during October 21–31, 2003 solar events, have been studied. During strong solar flares and geomagnetic storm of October 29–31 with a prevailing component of $T \sim 24$ h, their spectra involve an additional component of $T \sim 48$ h. These components were dominant in the power spectra of galactic cosmic rays, electric conductivity and electric field.

Ранее авторами были рассмотрены эффекты слабой [1] и экстремальной (в ноябре 2004 г [2]) геомагнитных бурь в вариациях напряженности электрического поля и метеорологических величин, а также в вариациях их спектров мощности. Настоящая работа является продолжением этих исследований, выполняемых на Камчатке (обс. «Паратунка», $\varphi = 52,90^\circ\text{N}$; $\lambda = 158,25^\circ\text{E}$), и посвящена изучению солнечных событий в октябре 2003 г. Но в отличие от работы [2], исходные экспериментальные данные дополнены одновременными записями электропроводности воздуха.

На рис. 1 приведены результаты наблюдений различных геофизических и метеорологических величин в стандартных обозначениях (электропроводность в произвольных единицах) в период с 21 по 31 октября 2003 г. Хронологическая последовательность солнечных событий подробно описана в [3,4]. В вариациях напряженности электрического поля и электропроводности воздуха отчетливо прослеживается зависимость от солнечной и геомагнитной активности: начиная с условий «хорошей погоды» (21-22 октября) до мощных всплесков геомагнитной активности $K_p \sim 9$, сопровождаемой Форбуш-понижением ГКЛ 29-30 октября [5]. Эффект Форбуш-понижения ГКЛ в удобном масштабе показан на рис. 2.

Для оценки спектральной плотности мощности (кратко спектра мощности) геофизических величин, показанных на рис.1, в полосе периодов $T = 4-24$ ч и $T > 24$ ч использован метод периодограмм. Динамика спектров мощности для всего периода наблюдений приведена в [6], а на рис. 3 - спектры мощности только 21-22 октября (дни «хорошей погоды») и 28-29 октября, когда произошли две мощные солнечные вспышки с одновременно высокой геомагнитной активностью ($K_p \sim 9$) и Форбуш-понижением ГКЛ. Анализ всей совокупности этих спектров показал следующее:

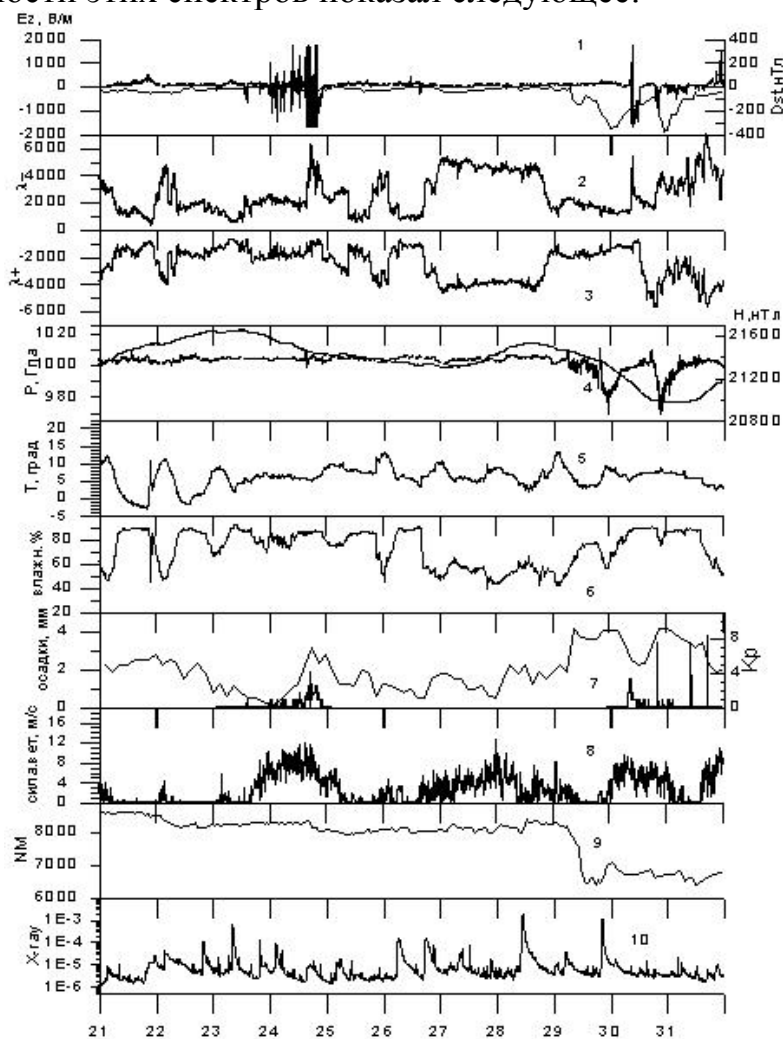


Рис. 1. Суточные вариации напряженности электрического поля, электропроводности воздуха, метеорологических, геофизических и солнечных величин в период 21-31 октября 2003 г.

В условиях «хорошей погоды» в спектрах мощности температуры и влажности атмосферы наблюдались колебания с периодами $T \sim 12, 24$ ч.

Во время сильных солнечных вспышек нарушились суточный ход и связь между температурой и влажностью атмосферы. При наличии преобладающей компоненты с $T \sim 24$ ч в спектре влажности появилась дополнительная компонента с $T \sim 48$ ч.

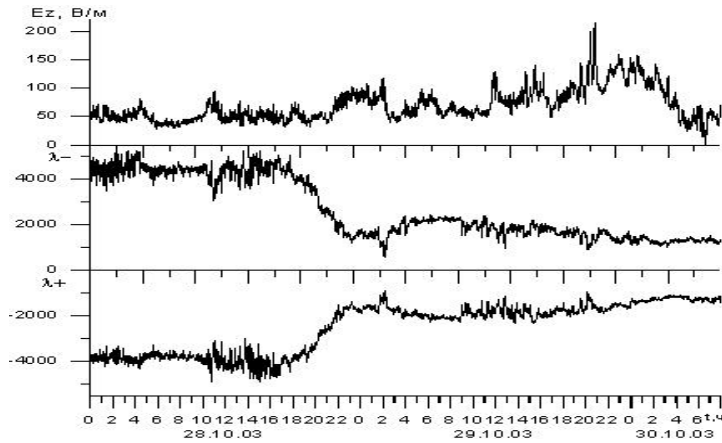


Рис. 2. Суточные вариации напряженности электрического поля и электропроводности воздуха в выделенный интервал наблюдений.

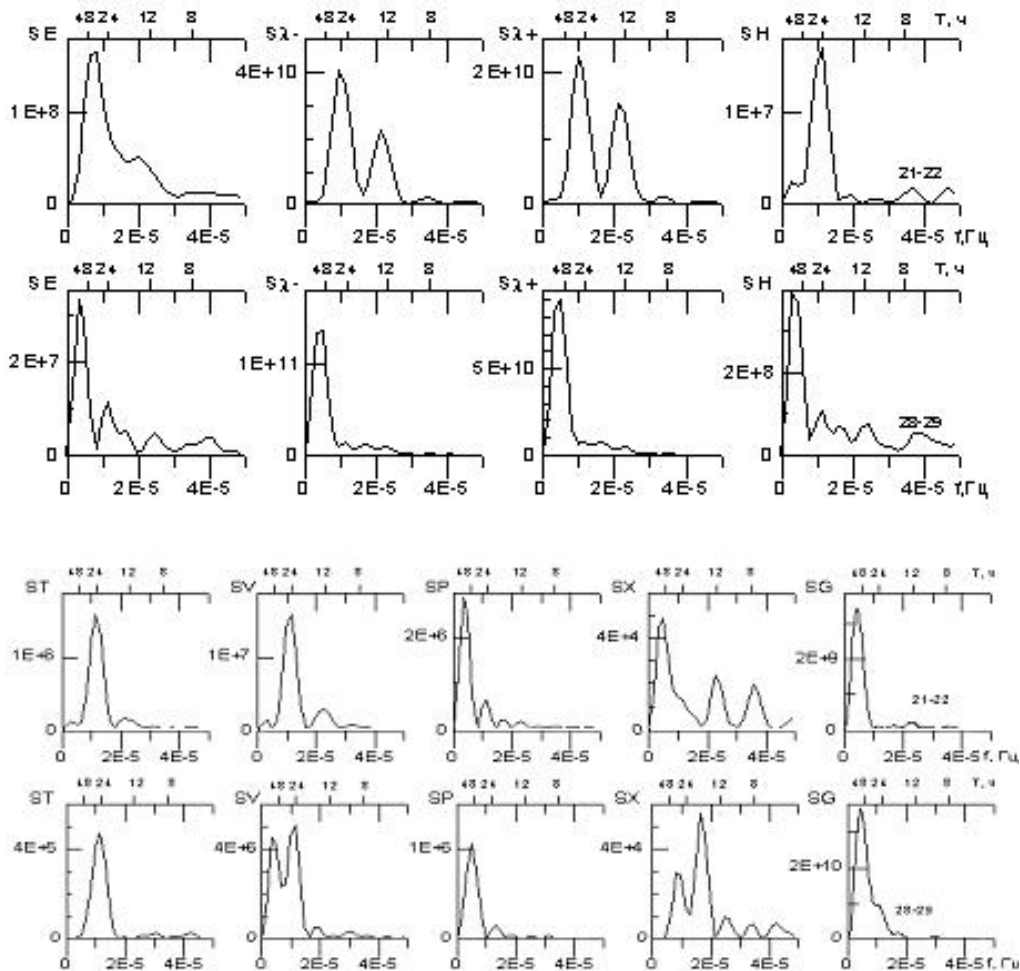


Рис. 3. Последовательность кривых спектральной плотности мощности величин, приведенных на рис.1, для событий 21-22 и 28-29 октября. На нижней оси абсцисс показана частота f , Гц, а на верхней - соответствующие периоды T .

В спектрах мощности атмосферного давления в условиях «хорошей погоды» наблюдался широкий спектр колебаний 12, 24, 48 ч, но преобладала

компонента с $T \sim 48$ ч., интенсивность которой во время геомагнитной бури возросла на порядок по величине.

В спектрах мощности электропроводности атмосферы в условиях «хорошей погоды» присутствовали компоненты с $T \sim 12$ и 24 ч. В спектре мощности электрического поля, кроме слабо выраженных этих компонентов, преобладала компонента с $T \sim 48$ ч.

При сильных солнечных вспышках и магнитной буре в спектрах мощности электропроводности отчетливо проявились компоненты почти равной интенсивности на $T \sim 24$ и 48 ч. Спектр электрического поля был более сложный (за счет влияния грозových процессов), но с преобладающей компонентой с $T \sim 48$ ч, интенсивность которой возросла на порядок по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды».

В спектрах мощности потоков галактических космических лучей преобладала компонента с $T \sim 48$ ч, которая усилилась на порядок по величине во время Форбуш-понижения 29 октября.

Литература

1. Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Спектры мощности тепловых приливных и планетарных волн в приземной атмосфере и в D-области ионосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрoномия. Т.49. № 5. С.639-652. 2009.
2. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрoномия. Т.53. № 4. С.532-546. 2013.
3. Веселовский И.С. и + 52 соавтора. Солнечные и гелиосферные явления в октябрь-ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т.42. № 5. С. 453-508. 2004.
4. Панасюк М.Н. и + 55 соавторов. Магнитные бури в октябре 2003 года // Космич. исслед. Т.42. №5. С.509-554. 2004.
5. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации электрических и метеорологических параметров в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 54. №2. С. 257–265. 2014.
6. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Эффекты солнечной и геомагнитной активностей в вариациях спектров мощности электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 54. №5. С. 691–700. 2014.

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ И ПРОЦЕССОВ СЛИЯНИЯ И СЖАТИЯ МАГНИТНЫХ ОСТРОВОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Молотков И.А.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк
e-mail: iamolotkov@yandex.ru*

ANALYSIS OF MAGNETIC RECONNECTION AND MAGNETIC ISLANDS MERGING AND COMPRESSION IN THE SOLAR WIND

Molotkov I.A.

*N.V.Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

Magnetic reconnection and magnetic islands merging and compression are investigated. Two methods based on the solutions both transport equation and magnetohydrodynamics equations are used.

1. Введение

Процессы в бесстолкновительной плазме солнечного ветра – турбулентность, магнитное пересоединение, формирование мелкомасштабных магнитных островов (МО), слияние и сжатие этих МО—создают дополнительные электрические и магнитные поля. Эти дополнительные поля вызывают мощные ускорения заряженных частиц плазмы, см., например, публикации [1 - 3]. Данная работа продолжает и развивает указанные публикации.

На базе решения стационарного уравнения переноса аналитически исследованы процессы слияния и сжатия МО, приводящие к ускорению заряженных частиц солнечного ветра. На основе решения системы уравнений магнитной гидродинамики (МГД) в окрестности фронта межпланетной ударной волны (ФУВ) произведен расчет магнитного пересоединения, также ускоряющего частицы солнечного ветра. Проанализировано одновременное воздействие пересоединения и сжатия МО.

2. Решение стационарного уравнения переноса

Одномерное стационарное уравнение переноса для функции распределения $f(x, \xi)$ возбужденных частиц по скоростям в отсутствие магнитных пересоединений имеет вид:

$$K \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - U \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{2\eta}{3} \frac{\partial f}{\partial \xi} - 2\eta f = 0, \quad (1)$$

см. [1]. Координата x направлена по нормали к ФУВ, $x=0$ на ФУВ. Вторая переменная $\xi = \ln \frac{c}{c_0}$ связана с распределением по скоростям c , c_0 – пороговая скорость, ниже которой частицы ведут себя диффузно. При $c > c_0$ частицы ускоряются. Другие обозначения в (1): K – коэффициент пространственной диффузии, U – скорость течения плазмы, η – коэффициент магнитной диффузии.

Основной интерес представляют механизмы ускорения частиц до энергий, превышающих 1 MeV. При приближении к зоне МО (вблизи фронта межпланетной ударной волны (ФУВ)) частицы могут иметь предварительное ускорение, соответствующее энергии 400 KeV [2]. Такая энергия отвечает разным скоростям для различных частиц. Исключая рассмотрение различных типов частиц, полагаем

$$c_0 = 10000 \text{ км/с} . \quad (2)$$

В случае слияния МО в уравнении (1) считаем, что $\eta = 0$. Элементарное решение такого уравнения дает явный вид функции распределения $f(x, \xi)$, в частности получаем, что $f(0, \xi) = (c_0/c)^3$, см. [3]. Тогда число p частиц с энергией превышающей 1 MeV (или со скоростью, превышающей 13000 км/с), равно

$$p = \frac{1}{c_0} \int_{1.3c_0}^{\infty} \left(\frac{c_0}{c}\right)^3 dc \approx 0.29 \quad (3)$$

Переходим к случаю процесса сжатия МО, происходящего при $x \geq 0$ [1]. Решение уравнения (1) для этого случая также найдено в [3]. Итоговый вид решения зависит от соотношения между энергией ударной волны и энергией диффузионного процесса.

Пусть энергия ударной волны является преобладающей. Тогда для числа p_1 ускоренных частиц вместо (3) получаем:

$$p_1 = \frac{1}{c_0} \int_{1.3c_0}^{\infty} \left(\frac{c_0}{c}\right)^3 \left(\ln \frac{c}{c_0} + 0.05\right)^{-3/2} dc = \int_{1.3}^{\infty} q^{-3} (\ln q)^{-3/2} dq. \quad (4)$$

Очевидно, что $p_1 > p$. Этот факт объясняется тем, что ускоряемые частицы при сжатии МО находятся гораздо ближе к ФУВ, чем при слиянии.

3. Решение уравнений МГД для окрестности ФУВ

В двумерном стационарном случае в тонком примыкающем к ФУВ слое

$$0 \leq x \leq h, \quad -\infty < y < \infty \quad (5)$$

система МГД уравнений принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0, \quad \frac{\partial B}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(v B - \eta \frac{\partial B}{\partial x} \right) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \zeta \rho \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial (B^2)}{\partial x} + F(x, y). \quad (7)$$

Считаем, что толщина слоя h в (5) мала по сравнению с другими величинами размерности длины. Полагаем, что на ФУВ $x=0$. В (6) и (7) обозначено: $B = B_y$ —горизонтальная компонента магнитной индукции, p —давление, ρ —плотность, μ —магнитная проницаемость, ζ —коэффициент кинематического сдвига. Возможное дополнительное воздействие на плазменную среду учитывается в уравнении (7) слагаемым $F(x, y)$.

При магнитном пересоединении освобождается дополнительная энергия, которой соответствует количество движения

$$F(x, y) = -\frac{\rho_0 B^2}{2\mu \rho L}, \quad (8)$$

см. [4], гл. 4, играющего роль дополнительного воздействия в уравнении (7). Здесь L — характерный масштаб длины. В случае слоя (5), $L=h$

Решение МГД уравнений (6), (7) для слоя (5) с учетом слагаемого (8) приводит к следующим результатам, см. [5]. Скорость плазменного потока за счет пересоединения практически удваивается, а индукция магнитного поля остается почти неизменной. В работе [5] был произведен расчет одновременного воздействия на ускорение частиц и пересоединения, и сжатия МО. Этот расчет показал, что дополнительный учет сжатия МО вносит лишь малые поправки в величину B^2 и в скорость потока плазмы.

4. Заключение

Настоящая работа основана на применении двух разных способов анализа процессов воздействия на ускорение частиц солнечного ветра. Два главных вывода следующие. 1) Установлено, что среди процессов в окрестности ФУВ именно магнитное пересоединение является главным фактором ускорения частиц. 2) Основной эффект изменения параметров солнечного ветра состоит в резком увеличении скорости плазмы вблизи ФУВ.

Литература

1. Zank G.P., Hunana P., Mostafavi P., Le Roux J.A., Gang Li, Webb G.M, Khabarova O., Cummings A., Stone E., and Decker R. Diffusive shock acceleration and reconnection acceleration processes. //The Astrophys. J, Vol.814:137, 2015.
2. Khabarova O.V., Zank G.P., Li G. Malandraki O.E., Le Roux J.A., Webb G.M..Small-scale magnetic islands in the solar wind and their role in particle acceleration.// The Astrophys. J, Vol.827:122, 2016.
3. Молотков И.А., Рябова Н.А. Анализ мощного локального ускорения частиц в солнечном ветре.// Геомагнетизм и аэрономия, т.57, №4, 418-422, 2017.
4. Прист Э., Форбс Т. Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения. М., Физматлит, 2005.
5. Molotkov I.A. Analysis of magnetic reconnections and compression of magnetic islands in the solar wind. // RJMP, Vol.25, N2, 233-238, 2018.

ПРОЦЕССЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

Муртазов А.К.

РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия
a.murtazov@rsu.edu.ru, akmurtazov@gmail.com

PROCESSES IN CIRCUMTERRESTRIAL SPACE AND GEOECOLOGY

Murtazov A.K.

Ryazan State University, Ryazan, Russia

Современная геоэкология в настоящее время превратилась в науку о геосферах, прежде всего литосфере, атмосфере и гидросфере, как среде обитания живых организмов, человека, социума и сфере антропогенной деятельности (их жизнедеятельности).

Геосферы подвергаются многочисленным внешним воздействиям, среди которых наиболее глобальным является воздействие Солнца, осуществляемое через процессы в околоземном пространстве (ОКП).

ОКП можно представить как систему вложенных друг в друга подсистем различной сложности и свойств, взаимодействующих между собой, с системой в целом, с биосферой. На рис. 1 представлено подразделение ОКП по распределению и плотности заряженных частиц. Часть систем связывают с нейтральными частицами, а часть - с заряженными ионами и электронами, образовавшимися в результате ионизации атомов и молекул солнечным излучением и/или высокоэнергичными частицами.

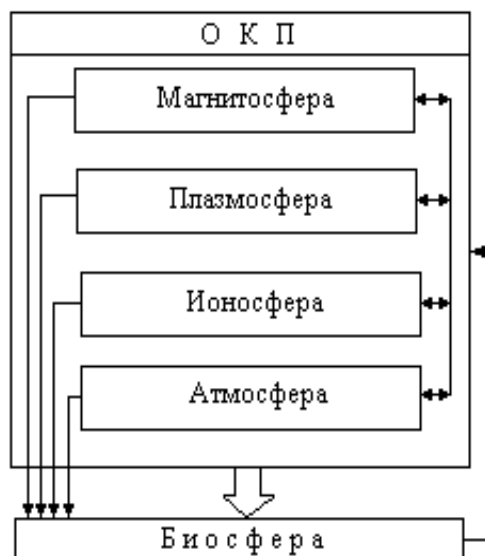


Рис. 1. Подсистемы ОКП, описываемые взаимодействием нейтральных и заряженных частиц.

Построен целый ряд схем воздействия солнечной активности на эпигеосферу через компоненты околоземного пространства [3]. Они показывают, что солнечная активность может оказывать влияние на биосферу, как через возмущения природного геомагнитного поля, так и посредством других физических агентов.

Хорошо проработанным является физический механизм солнечно-атмосферных связей, связанный с эффектом разрушения озона окислами азота и водорода, образованными в полярной атмосфере космическими лучами и энергичными электронами. Теоретическое обоснование этого эффекта было сделано в 70–80-е годы XX столетия для объяснения наблюдаемого после протонной вспышки 1972 г. уменьшения озона в северной полярной области [9].

УНЧ электромагнитные волны возбуждаются магнитосферными процессами в коре Земли [5].

Существует некоторая изменчивая связь между уровнем активности Солнца в 22-летнем цикле и водностью рек, что отражается в прогнозах водного режима рек на основании анализа и прогноза солнечной активности [8].

Обнаруживается сложная цепь взаимосвязанных явлений, обуславливающих влияние 11-летнего цикла солнечной активности на рост кристаллов минералов в поверхностном слое земной коры. Вероятно, изменение метеорологических условий под действием солнечного корпускулярного излучения проявляется, в частности, в колебаниях обводненности верхних участков земной коры [7].

Поскольку гелиофизические факторы влияют на ход важных и широко распространенных физико-химических процессов (в частности, протекающих в водных растворах), они должны воздействовать на многие стороны биологических явлений, что находит отражение в соответствующих изменениях показателей жизнедеятельности большинства живых организмов [4].

Во время геомагнитных бурь непосредственным фактором влияния на среду обитания являются не возмущения геомагнитного поля, а высыпания в ионосферу Земли высокоэнергичных электронов, которые изменяют низкочастотные электромагнитные поля в среде обитания. Поскольку эти поля проникают во внешнюю ионосферу, то следует ожидать их влияния на организм человека, дополнительно к прямому воздействию корпускулярных потоков [10].

В биосфере Земли последствия взаимодействия связаны с динамикой популяций животных, эпидемий, эпизоотий, количеством сердечно-сосудистых заболеваний [1]. Очевидно, что погодные условия, связанные как с космической, так и с земной погодой, оказывают на организм человека многофакторное воздействие, порой для групп риска приводящее даже к летальному исходу, несмотря на их малую амплитуду и кажущуюся малозначимость по сравнению с другими факторами, в том числе социальными, вызывающими сильные стрессы в современном мире.

Сравнительный анализ данных измерения электропроводности биологически активных точек кожи, артериального давления, пульса с вариациями значений различных параметров внешней среды, таких как локальный А-индекс, атмосферное давление, температура, индексы космических лучей показывает совпадение их основных периодов [6].

Параметры среды обитания с разными временными масштабами регулярно изменяются в цикле солнечной активности.

При вспышках на Солнце, сопровождающихся мощными потоками электромагнитного излучения, протонов и электронов, вызывающих магнитные и ионосферные бури, изменяются электромагнитные свойства нижней ионосферы. Это приводит к изменению резонансных частот шумановской резонансной полости в ОКП и, следовательно, к нарушению равновесия связанных колебательных систем «человек – среда обитания» [3]. Люди с нарушенной системой адаптации (в основном дети и пожилые люди) могут испытывать физический и психический дискомфорт.

Сейчас практически нет сомнений в том, что основным агентом – переносчиком перепадов космической погоды в биосферу, являются электромагнитные поля низких и крайне низких частот.

Не исключено, что близость α -ритма мозга человека к фундаментальной частоте ионосферного волновода (8 Гц) не является случайной [12].



Рис. 2. Сценарий образования инфразвука в атмосфере под действием солнечного излучения, СКЛ и ГКЛ (Сорока, Калита, 2004).

Наиболее энергетически заметным является процесс генерации инфразвуковых колебаний в атмосфере как следствие взаимодействия солнечного ветра с плазмой ОКП и атмосферой [11].

Сценарий связи солнечной активности с инфразвуком в атмосфере сводится здесь к схеме на рис. 2.

Литература

1. Бреус Т.К. Влияние «космической погоды» на биологические объекты // Земля и Вселенная. – 2009. № 3.
2. Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного космического пространства. Учебное пособие. - М.: Университетская книга, 2010. – 112 с.
3. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А., Мартынюк В.С. Космическая погода и наша жизнь. – Фрязино. «Век-2», 2004. – 224 с.
4. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. – М: ВИНТИ, 1995. - 470 с.
5. Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и магнитосфере Земли // УФН/ - 2007, том 177. – С. 1257-1276.
6. Дмитриева И.В., Обридко В.Н., Рагульская М.В., Резников А.Е., Хабарова О.В. Реакция организма человека на факторы, связанные с вариациями солнечной активности // Биофизика. - 2001. Т. 46, вып.5. - С.940-945.
7. Жабин А.Г. Космические процессы и минералообразование // Все о геологии. - 6.06.2006. – 6 с.
8. Кононова М.Ю., Морозова А.Л. Геоэкологический мониторинг водосборной территории гидроузлов. Учет влияния солнечной активности // Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. – 2002. Т. 240. – С. 116-120.
9. Криволюцкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. — М.: ГЕОС, 2009. — 384 с.
10. Муртазов А.К. Экология околоземного космического пространства. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
11. Негода А.А., Сорока С.А. Акустический канал космического влияния на биосферу Земли // Космічна наука і технологія. – 2001. Т. 7, №5/6. - С.85-93.
12. Хабарова О.В. Влияние космофизических факторов на биосферу // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. №2. С. 25-39.

НАБЛЮДЕНИЕ НЕОБЫЧНОГО СВЕТОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ТЕНИ ПЯТНА NOAA 12109

Ожогина¹ О.А.

¹ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия
ozhog@iszf.irk.ru

OBSERVATION OF UNUSUAL LIGHT STRUCTURE IN NOAA 12109 SUNSPOT UMBRA

Ozhogina¹ O.A.

¹ISZF SB of RAS, Irkutsk, Russia

On July 12, 2014, an unusual light structure was observed in the NOAA 12109 sunspot umbra. Unlike the well-known light bridges, it did not have an outlet to the penumbra. Spectrograms were obtained in two spectral ranges: infrared (8490 - 8550 Å) and ultraviolet (3930 - 3970 Å). Images are constructed in continua, in spectral lines and light of sight velocities. Comparison with SDO data has been made.

Общеизвестно, что тень пятна неоднородна по своей структуре и включает в себя участки с различной интенсивностью. Светлые элементы тени бывают двух видов: короткоживущие (~10-30 мин.), мелкомасштабные (~300 км.) яркие точки (bright umbral dots) и долгоживущие (более суток), крупномасштабные световые мосты (light bridges). Световые мосты описывают как протяженные светлые полосы, внедряющиеся в тень пятна из полутени и часто пересекающие её, протягиваясь с одной стороны тени на другую. 11-12 июля 2014 в тени пятна NOAA 12109 наблюдалось необычное световое образование, аналогичное световому мосту, но находящееся целиком внутри тени, без выхода в полутень. Найти похожие структуры по литературным данным не удалось.

Наблюдения проводились 12-го июля около 00 UT на горизонтальном солнечном телескопе Саянской обсерватории, оборудованном двухкамерным спектрографом, одновременно в двух спектральных диапазонах: ультрафиолетовом, содержащем линии H (3968 Å) и K (3933.6 Å) Ca II, и инфракрасном: область двух ИК линий Ca II (8498 Å и 8542 Å). Было выполнено сканирование пятна с шагом приблизительно 1 угл. сек. По полученным спектрограммам были построены его изображения в двух континуумах (ультрафиолетовом и инфракрасном), в сильных линиях ионизованного кальция и в нескольких, более слабых линиях обоих диапазонов. На рисунке 1 приведены изображения пятна NOAA 12109 в УФ и ИК континуумах и по данным SDO\HMI. Можно заметить, что световое образование в тени пятна в инфракрасном диапазоне и в ультрафиолете существенно различаются. В первом случае оно выглядит

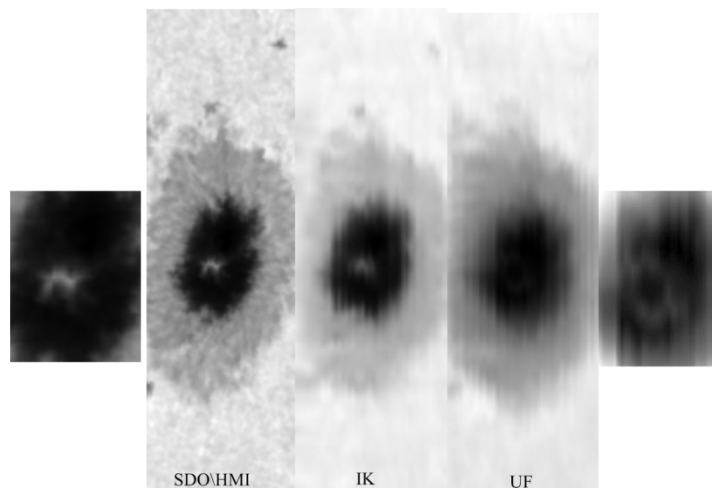


Рис. 1. Изображение пятна NOAA 12109 12 июля 2014 г. около 00 UT в континууме SDO\HMI и по наблюдениям на горизонтальном солнечном телескопе Саянской обсерватории в ИК и УФ континуумах.

как яркий изолированный остров, а во втором, - как слабое световое кольцо. Интенсивность «острова» относительно интенсивности спокойного Солнца в ИК диапазоне составляет - 0.5, интенсивность «кольца» в УФ диапазоне составляет - 0.13. На снимке SDO\HMI, полученном вне земной атмосферы и с лучшим пространственным разрешением (0.5 угл. сек.) также видно, что это образование является кольцевой структурой и внешне похоже на подкову с интенсивностью в «верхней» части 0.57.

На рисунке 2 приведены изображения, построенные по линиям Ca II (3933 Å и 8498 Å) и по двум линиям каждого диапазона с известными, хоть и для спокойного Солнца, высотами образования: 3963.7 Å Cr I, 3969.3 Å Fe I - высоты образования составляют 250 км и 600 км соответственно, и 8514.1 Å Fe I и 8556.8 Å Si I - высоты образования составляют 550 км и 250 км, соответственно. Для устранения влияния континуума в эти изображения, они строились для разности интенсивности континуума и интенсивности линии, нормированной на аналогичную разность спокойного Солнца, причем в УФ-диапазоне, ввиду того что все линии лежат в крыльях H и K Ca II и на спектрограммах отсутствует континуум, вместо него бралась интенсивность соответствующего участка огибающей спектра. На снимках SDO\AIA это образование хорошо видно в континууме 4500 Å (интенсивность - 0.51), в континууме 1700 Å оно значительно слабее ($I=0.17$), в полосе 1600 Å и в ультрафиолетовых линиях 304 Å, 171 Å и 193 Å, - отсутствует. На высотах верхней переходной области и короны (линии 171 Å и 193 Å) из этого места начинается мощная струя.

На рисунке 3 показан средний контраст образования: разница между интенсивностями образования и тени. По оси X длины волн приведены в

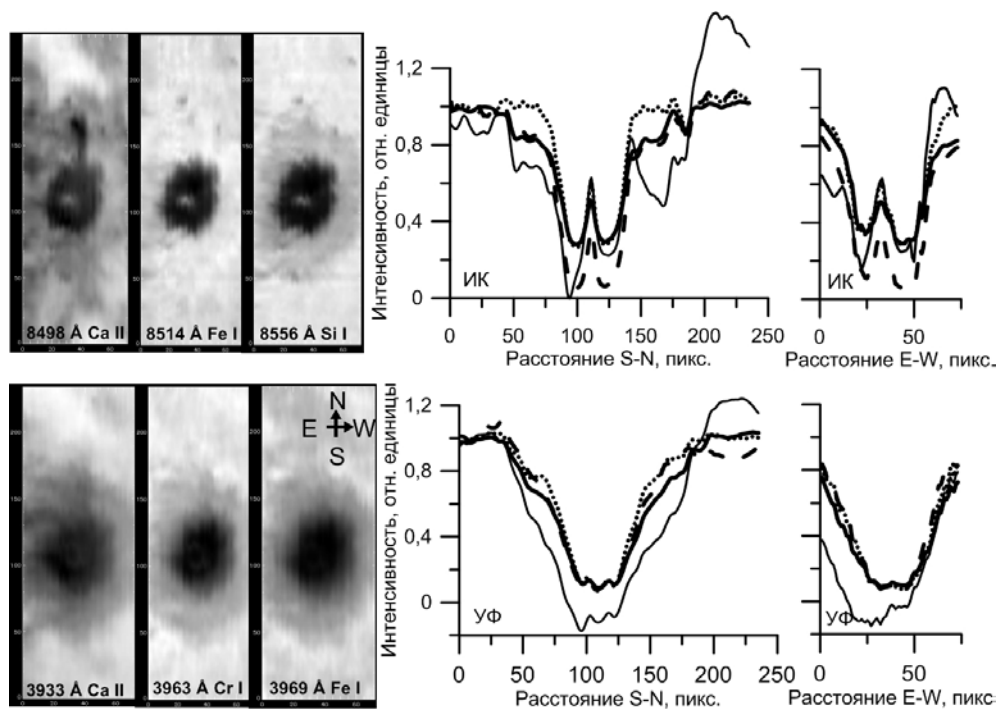


Рис. 2. Изображение пятна NOAA 12109 в линиях и соответствующие графики интенсивностей по двум разрезам, проходящим через световое образование. Обозначения: сплошная линия – Ca II 8498 Å (верх) и 3933 Å (низ), толстая сплошная линия – ИК континуум (верх) и УФ континуум (низ), штриховая линия – Si I 8556 Å (верх) и Cr I 3963 Å (низ), пунктирная линия – Fe I 8514 Å (верх) и Fe I 3969 Å (низ). В 1 пикселе – 0.5 угл. секунды.

порядке возрастания высоты для каждого диапазона отдельно. Поскольку, на нашем ультрафиолетовом спектре присутствует только квазиконтинуум, и изображение строилось в нем (3954 Å), то логично, что высота образования этого участка спектра больше, чем в инфракрасном континууме. Видно, что почти везде, с увеличением высоты средний контраст имеет тенденцию к падению.

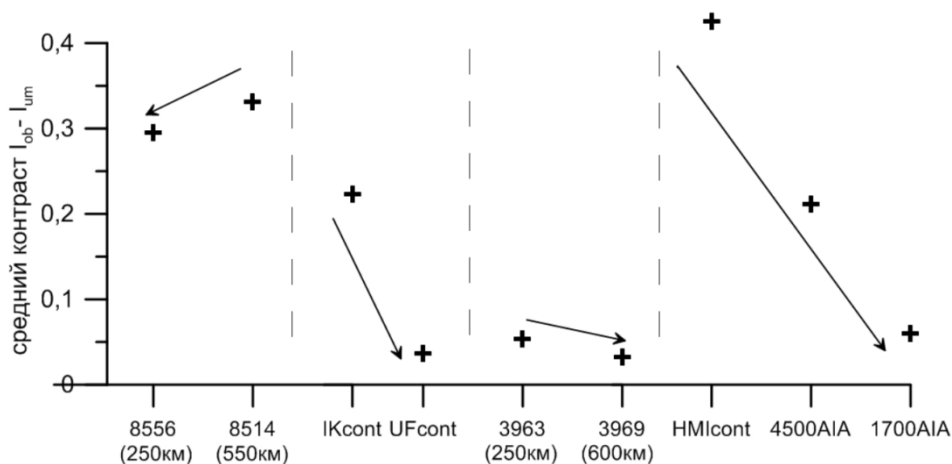


Рис. 3. Средний контраст – разница между интенсивностью образования и интенсивностью тени для разных спектральных диапазонов.

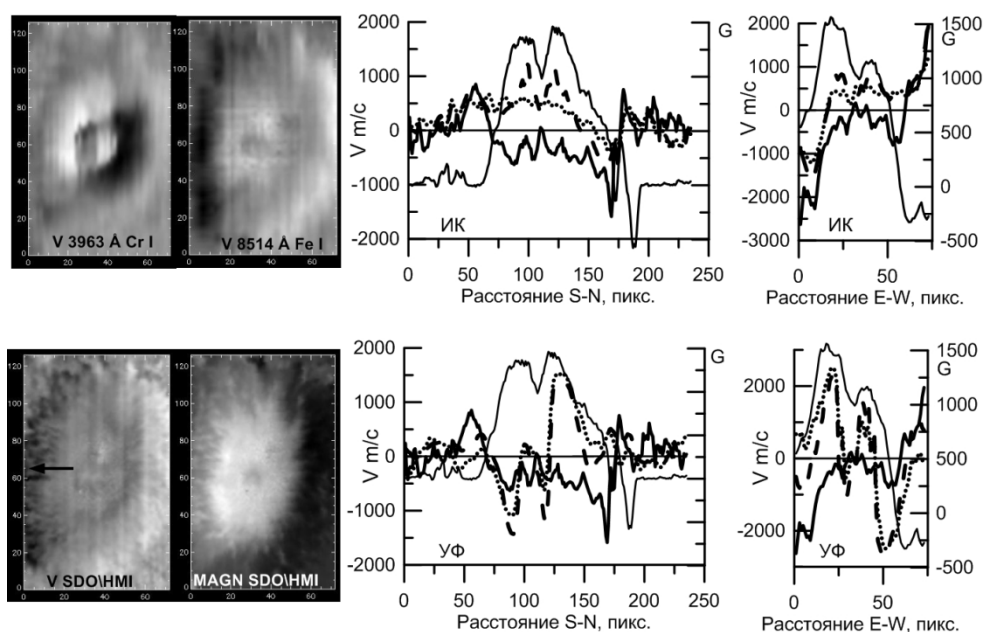


Рис. 4. Изображение пятна в лучевых скоростях в линиях 3963 Å и 8514 Å (верх). Внизу доплерограмма и магнитограмма по SDO\HMI. Справа соответствующие графики скоростей, вверху для линий 8556Å (штрихи) и 8514Å (пунктир), внизу - линии 3963Å(штрихи) и 3969Å(пунктир). сплошная линия и толстая сплошная линия – напряженность магнитного поля и лучевые скорости по данным SDO\HMI, соответственно.

Для 8 инфракрасных и 16 ультрафиолетовых линий были вычислены доплеровские скорости. Получено, что скорости Эвершеда в полутени в ИК линиях составляют около 1-1.5 км/с и близки к значениям по SDO\HMI (1.5 - 2.0 км/с). В ультрафиолете они меньше 0.5 - 1.0 км/с, а для линии 3969 Å практически нулевые на западе, и даже другого знака (+0.5 км/с) - на востоке. В тени пятна по ИК линиям идет устойчивое опускание вещества со скоростями 0.5-1.1 км/с, с замедлением на величину до 50% в месте нахождения светового «острова». В УФ диапазоне картина более контрастна: максимальные скорости в тени пятна находятся ближе к границе с полутенью (+2.2 км/с - опускание) на востоке, и -2.5 км/с на западе (подъем). В области кольца происходит резкое изменение знака скорости - подъем со скоростью до 1.0 км/с. На рисунке 4 приведены изображения в лучевых скоростях по одной из линий каждого диапазона, доплерограмма и магнитограмма по SDO\HMI. Справа приведены графики скоростей по двум разрезам для двух, ранее выбранных линий каждого диапазона вместе с соответствующими данными SDO\HMI.

Автор благодарен группе SDO за возможность доступа к данным. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16, с использованием оборудования ЦКП «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

ИНДЕКСЫ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ИХ РОЛЬ В ИССЛЕДОВАНИИ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Петров В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

vpetrov@izmiran.ru

INDICES OF GEOMAGNETIC ACTIVITY AND THEIR ROLE IN THE SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS STUDY

Petrov V.G.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The main indices of geomagnetic activity and their features are considered. The main attention is paid to the most widespread K index of local activity and features of calculating this index at Russian observatories. It is shown that the most widely used calculation technique based on the use of the Sq variation does not correspond to the classical Bartels technique and leads to a systematic error.

Влияние геомагнитной активности (ГА) на практическую деятельность известно более 250 лет. В настоящее время с геомагнитными возмущениями связывают множество природных, технологических и биологических процессов. Однако для изучения и использования какого-либо явления необходимо иметь его определение и способы оценки интенсивности, т.е. научный подход невозможен без определения понятия геомагнитной возмущенности (ГА) и количественной оценки её интенсивности – индексов геомагнитной активности. В [1] дано следующее определение ГА – магнитная активность или возмущённость - это совокупность изменений магнитного поля Земли, вызываемых корпускулярным излучением Солнца. При расширенном толковании термина «корпускулярное излучение» с учетом переносимого солнечным ветром магнитного поля это определение справедливо и с современной точки зрения.

В прошлом оценка геомагнитной возмущенности делалась просто по внешнему виду магнитограмм. Она оценивалась за сутки по 3-х бальной шкале: С = 0, если день спокойный, 1 если он умеренно и 2 если сильно возмущенный. В дальнейшем суточный индекс С стал вычисляться более объективно по значениям К-индекса и получил название Ср- индекс. В настоящее время этот индекс перестал использоваться и самым долговременным доступным индексом является aa-индекс, доступный с 1868 г (http://isgi.unistra.fr/data_download.php). Он является средним значением а-индексов двух обсерваторий - Canberra и Hartland.

Самым распространённым индексами сейчас являются К-индексы отдельных обсерваторий для исследования локальных эффектов и планетарный Кр индекс для исследования глобальных проявлений ГА. Кр был предложен в 1939 году Бартельсом [2,3] как мера воздействия солнечной корпус-

кулярной радиации на вариации магнитного поля Земли. К-индекс характеризует вариации горизонтальной составляющей (разность между максимальным и минимальным значением геомагнитного поля после исключения регулярной вариации) за 3-часовой интервал времени на конкретной обсерватории. Он принимает значения от 0 до 9, а шкала для перевода вариации в индекс почти логарифмическая – индекс увеличивается на единицу при увеличении амплитуды примерно в два раза. Эта шкала строится так, чтобы значения К для разных обсерваторий за длительные интервалы времени, т.е. частоты появления конкретного значения К примерно совпадали и распределение значений К не зависело от расположения обсерватории. Поскольку шкала К-индекса квазилогарифмическая, операции сложения и усреднения значений К смысла не имеют, однако исторически сложилась так, что суммирование широко используются для получения оценок ГА за большие интервалы (среднесуточная, среднемесячная). Правильно для таких оценок использовать средние значения а-индекса. А-индекс – это переведенное обратно в вариацию магнитного поля значение К с использованием для любой станции единой специальной шкалы:

К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
а _к	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

Поскольку проявления ГА очень разнообразны, существует ряд индексов, отражающих те или иные аспекты ГА. Для описания активности в авральной зоне используются минутные AU и AL индексы, отражающие величины токов восточной и западной электроструй (имеются с 1957). Их разность (AE) и среднее значение (AO) физического смысла не имеют и не рекомендуются к использованию. Интенсивность кольцевого тока, токов в хвосте магнитосферы и токов на магнитопаузе описывают Dst (среднечасовой, с 1957 г.) и ASY/SYM (минутный, с 1981 г.) индексы. Интенсивность передачи энергии из солнечного ветра в магнитосферу описывает PC индекс (15-мин., с 1975 г.). Следует иметь в виду, что наземные наблюдения регистрируют суммарный эффект от всех источников ГА, поэтому разделение индексов по источникам является не полным, и индексы достаточно хорошо коррелируют друг с другом [4]

ГА является явлением глобальным, однако её проявления зависят от места и местного времени и поэтому наряду с глобальными индексами ГА широко используются и локальные индексы. Рассмотрим особенности наиболее распространённого локального К-индекса по данным Российских магнитных обсерваторий. Методика вычисления индекса была описана в [2] и позднее в инструкции [5]. При вычислении К-индекса имеются две проблемы - удаление вариации не связанной с К-индексом (Sr-вариации) и определение шкалы К-индекса. При ручном определении К-индекса по данным аналоговых магнитограмм оператор должен на основании своего опыта корректировать полученные вариации, убирая из него длиннопериодные тренды Sr. На российских обсерваториях применялась методика [6] основанная на

использовании вместо Sr-вариации Sq-вариацию, построенную по спокойным дням. Все авторы, внедрявшие K-индекс отмечали, что использование единой кривой Sr для всего месяца является грубой ошибкой и недопустимо. Это приводит к существенным искажениям значений K, особенно при малых уровнях ГА. Тем не менее, на российских обсерваториях её продолжают применять и часто ссылаются на неё как на методику Бартельса.

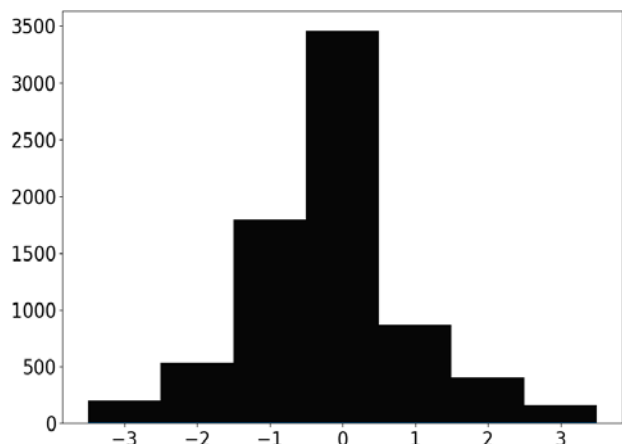


Рис 1. Гистограмма распределения разности K-индексов обсерватории Москва.

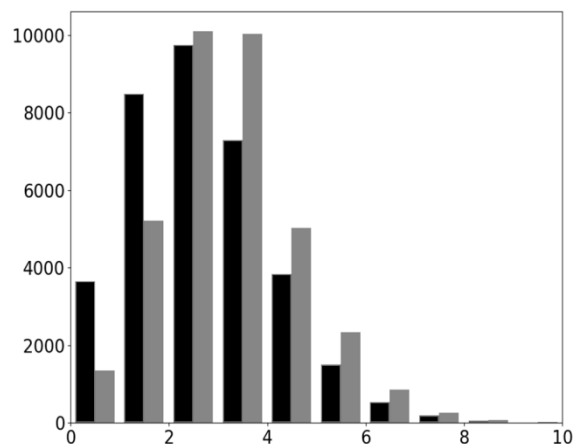


Рис.2. Гистограмма распределения значений Kp (черный) и K obs. Якутск (серый)

На рис 1 представлена разность значений K-индекса обсерватории Москва, вычисленного по цифровым данным по одной из утверждённых IAGA программ [7] и упрощенным методом, основанным на использовании Sq вариации. Видно, что ошибка может достигать 3 баллов и ошибка не симметрична, K_{sq} чаще превышает K_{fmi} , т.е. в среднем использование упрощенного метода приводит к систематическому завышению K-индекса. Такой же результат получен и в [8]. Использование Sq вариаций неизбежно при вычислении индекса в реальном времени, но его не стоит считать K-индексом по методике Бартельса и можно использовать только как предварительный. В ИЗМИРАН такие индексы представляются вместе с данными в реальном времени (<http://serv.izmiran.ru>), но с задержкой в 3-6 часов пересчитываются по утверждённым IAGA методике и только эти индексы идут в архив для использования в дальнейшем (http://serv.izmiran.ru/WEBFF/MOS_kind/Kfile_list.html).

Шкалы для расчётов K-индекса большинства российских обсерваторий были определены в 1930-40-х годах и приведены в [1]. Сопоставление K-индексов, вычисленных по этим шкалам, с Kp индексом показывает, что эти шкалы нуждаются в уточнении, а иногда выбраны просто неверно. На рис. 2 приведена гистограмма распределения значений K obs. Якутск. Видно, что значения $K \geq 3$ в Якутске наблюдаются существенно чаще, чем в Kp. Это свидетельствует о том, что шкала в Якутске занижена. На рис. 3 и 4 приведено значение K индекса для обсерваторий Новосибирск и Диксон по данным отдела геофизики ААНИИ (<http://www.aari.ru/>)

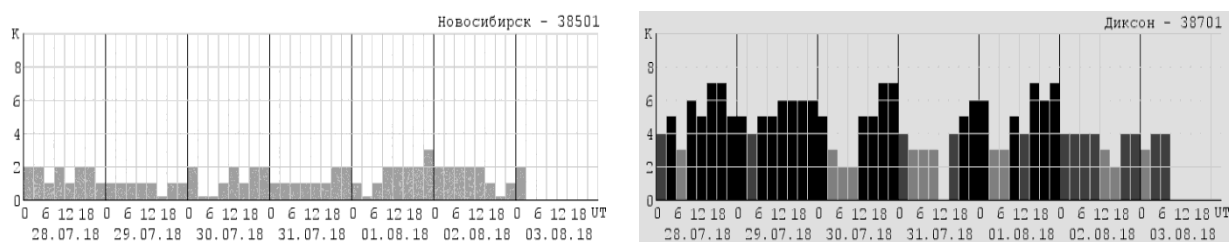


Рис. 3. К-индекс обсерваторий Новосибирск и Диксон

Если К-индекс обс. Новосибирск, как и планетарный К_p индекс, показывают за этот интервал в основном спокойную и слабо возмущенную ГА, то К Диксона показывают в основном возмущенную и сильно возмущенную. Это говорит о том, что шкала К-индекса для этой обсерватории выбрана неверно – предел для К=9 должен быть существенно увеличен.

Таким образом, для обеспечения сопоставимости К-индекса российских обсерваторий с мировой сетью необходимо перейти на стандартную методику IAGA и уточнить значение предела К=9, а индексы вычисленные на основе Sq вариации считать только предварительными.

Литература

1. Справочник по переменному магнитному поля СССР под ред. В.И. Афанасьевой, НИИЗМ, Ленинград 1954.
2. Bartels J., Heck N., Johnston H. The Three-Hour-Range Index Measuring Geomagnetic Activity. // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, v. 44, p. 411–454, 1939.
3. IATME Bulletin, 11, 1940, p. 550, resolution 2.
4. Verbanac G., Manda, M., Vršnak, S., Sentic S. Evolution of Solar and Geomagnetic Activity Indices, and Their Relationship: 1960–2001. // *Sol Phys* v. 271: p.183. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9801-y>, 2011.
5. Mayaud P. Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. // *Geophysical monograph* v.22, American Geophysical Union, 1980.
6. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности. М. 2007. 88 с.
7. Menvielle M., Papitashvili N., Häkkinen L., Sucksdorff C. Computer production of K indices: review and comparison of methods. // *Geophys. J. Int.* v. 123. p. 866-886, 1995.
8. Анисимов. С. В., Дмитриев Э. М., Гурьев А. В., Филиппов В. А. Вычисление К-индексов геомагнитной активности в режиме реального времени. // *Гелиогеофизические исследования*, выпуск 13, 62-72, 2015.

ГЕНЕРАЦИЯ ТОКОВОГО СЛОЯ В КОРОНЕ, АККУМУЛИРУЮЩЕГО ЭНЕРГИЮ ДЛЯ ВСПЫШКИ

Подгорный¹ А.И., Подгорный² И.М.

¹ФИАН, г. Москва, Россия

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

podgorny@lebedev.ru

CURRENT SHEET GENERATION IN THE CORONA, WHICH ACCUMULATES ENERGY FOR A FLARE

Podgorny¹ A.I., Podgorny² I.M.

¹Lebedev Inst., Moscow, Russia

²INASAN, Moscow, Russia

The flare mechanism based on the energy accumulation in the magnetic field of a current sheet explains the slow energy accumulation in corona and then its explosive release. The position of the current sheet obtained by numerical MHD simulation above a real active region coincides with the position of source of flare thermal X-ray emission. Flare energy accumulation is demonstrated by positions of 2D magnetic field lines in the plane perpendicular to the magnetic vector in the point of the current density maximum.

Предлагается механизм вспышки, согласно которому магнитная энергия накапливается в поле токового слоя, образующегося в окрестности особой магнитной линии X-типа под воздействием возмущений, распространяющихся от солнечной поверхности [1]. Движение плазмы под действием магнитных сил $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$ к особой линии и от нее деформирует магнитное поле в конфигурацию токового слоя. В результате квазистационарной эволюции токовый слой переходит в неустойчивое состояние [2], и неустойчивость вызывает взрывное освобождение магнитной энергии. Предлагаемый механизм солнечной вспышки, основанный на запасании энергии в магнитном поле токового слоя, объясняет как медленное накопление магнитной энергии в такой форме, чтобы она могла освободиться взрывным образом, так и позволяет проанализировать путем численного МГД моделирования вспышечную ситуацию над реальной активной областью, найдя положение вспышки, которое совпадает с положением источника наблюдаемого вспышечного теплового рентгеновского излучения. Провести такой анализ, основываясь на других механизмах вспышки, невозможно.

Наиболее распространенный альтернативный механизм вспышки основан на запасании энергии в поле магнитного жгута. В большинстве работ по этому механизму магнитный жгут в неустойчивом, или даже в неравновесном, состоянии задается с самого начала. Образование жгута рассматривается [3] в простом поле двух магнитных зарядов в результате неестественно сложного движения плазмы на фотосфере. При этом происходит деформация простого поля короны в сложную конфигурацию. Такое движение в реаль-

ном предвспышечном состоянии никогда не наблюдается. Образование жгута не удалось получить путем моделирования в короне над реальной активной областью.

Наблюдения дают достаточно сильные доказательства, что первичное освобождение энергии вспышки происходит в солнечной короне на высотах 15 – 30 тыс. км. Помимо совпадения положения вспышечного источника теплового рентгеновского излучения с положением токового слоя в короне, полученного численным МГД моделированием над реальной АО, вспышечное освобождение энергии в короне подтверждается возникновением ярких эмиссий спектральных линий высокоионизованного железа рентгеновскими [4] и ультрафиолетовыми ([5]; доклад И.М. Подгорного на настоящей конференции Астрономия-2018), а также отсутствием сколько-нибудь значительных изменений магнитного поля активных областей во время вспышек [6]. Наблюдаемые проявления вспышек в хромосфере в виде свечения спектральных линий с низким потенциалом возбуждения является вторичным, они вызваны высыпанием попаданием в хромосферу электронов и протонов, ускоренных в короне электрическим полем Лоренца. В отдельных работах делаются попытки разработать механизм солнечной вспышки в хромосфере, вспышка объясняется неустойчивостью (желобковой, Релея-Тейлора), однако основной вопрос - как энергия вспышки может накопиться для такой ситуации и каким образом в желобковой неустойчивости ускоряются электроны - не рассматривается.

Для изучения механизма солнечной вспышки МГД моделирование в короне было выполнено при задании начальных и граничных условий из измерений в активной области. При постановке условий для численного моделирования никаких предположений о механизме вспышки не делается. Все условия берутся из наблюдений. Такое моделирование позволило установить, что механизм солнечной вспышки основан на запасании магнитной энергии в токовом слое и ее взрывном выделении при вспышке.

Несмотря на использование численных методов, разработанных максимального увеличения скорости расчета, моделирование осуществляется достаточно медленно. Поэтому моделирование вспышечной ситуации в короне над активной областью 10365 удалось провести только в сильно сокращенном масштабе времени (в 10^4 раз). Неестественно быстрое изменение поля во времени на границе расчетной области вызывает появление численной неустойчивости вблизи фотосферной границы, однако благодаря использованию разработанным методам, ее удалось ограничить и предотвратить распространение внутрь области. Даже в таком приближенном решении положение найденного токового слоя на диске Солнца (96", -56") достаточно хорошо совпадает с положением наблюдаемого источника вспышечного теплового рентгеновского излучения (99", -64"). Моделирование в короне над активной областью AR12192 в близкой постановке задачи китайско-американского МГД эксперимента [7] подтвердило выводы настоящей работы – генерацию токового слоя, положение которого совпадает с положением источника

вспышечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Магнитный жгут, как и в наших работах, не появлялся перед вспышкой. Эти результаты вместе с результатами наблюдений в короне, в которых аккумуляция энергии происходит в магнитном поле токового слоя, не оставляют сомнения в корональном происхождении вспышки. В дальнейшем необходимо более аккуратно исследовать конфигурацию магнитного поля не только вблизи токового слоя, но и в значительной области, содержащей токовый слой и установить количество запасаемой для вспышки энергии. При этом поле вблизи фотосферной границы не должно быть искажено, чтобы правильно отыскать места пересечения с фотосферой выходящих из слоя магнитных линий, которые, согласно электродинамической модели токового слоя, должны совпадать с источниками жесткого пучкового рентгеновского излучения. Для этой цели необходимо провести моделирование в реальном масштабе времени, при котором не возникнет численная неустойчивость вблизи фотосферной границы, как показали проведенные расчеты в реальном масштабе времени в течение первых 7 минут эволюции активной области.

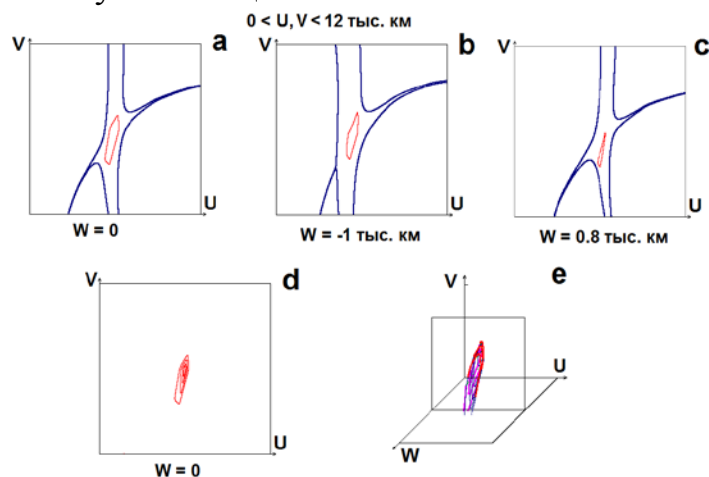


Рис. 1. Конфигурация магнитного поля в плоскостях, пересекающих токовый слой, (а-с), линии (d) и поверхность (е) равной плотности тока в окрестности токового слоя. Локальная координата W направлена вдоль вектора магнитного поля в точке максимума плотности тока (вдоль особой линии). Линии поля в плоскости конфигурации токового слоя (а) и в параллельных ей плоскостях (b) и (с).

Конфигурация магнитного поля вблизи токового слоя в солнечной короне может быть достаточно сложной. Поэтому для нахождения положения токового слоя разработана специальная графическая система поиска, основанная на свойстве токового слоя, согласно которому, максимум абсолютной величины плотности тока находится в середине слоя. Ищутся все локальные максимумы плотности тока, а затем анализируется конфигурация магнитного поля в окрестности каждого из них. Прежде всего, анализ проводится в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля в точке максимума, в которой конфигурация токового слоя наиболее ярко выражена (плоскость конфигурации токового слоя). На Рис. 1 показаны двумерные конфигурации

магнитного поля в различных плоскостях, пересекающих токовый слой, а также линии и поверхность равной плотности тока в окрестности токового слоя, найденного при помощи разработанной системы поиска.

Ток, вызывающий магнитные силы $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$, которые деформируют магнитное поле в конфигурацию токового слоя, направлен вдоль особой линии перпендикулярно плоскости конфигурации токового слоя, поэтому компонента магнитного поля, перпендикулярная к плоскости конфигурации, параллельна току и не вносит вклад в магнитную силу. Поэтому направления магнитных сил, создающих токовый слой, легко представить визуально по расположению линий, касательных проекциям магнитных векторов.

Выводы. Результаты численного МГД моделирования, выполненные над реальной активной областью, показали образование перед вспышкой токового слоя в короне. Положение этого токового слоя совпадает с положением резкого возрастания эмиссии спектральных линий высокоионизованного железа при вспышке. При этом сколько-нибудь заметных изменений магнитного поля активной области не наблюдается. Таким образом, механизм вспышки, основанный на накоплении энергии в корональном токовом слое, можно считать доказанным.

Литература

1. Сыроватский С.И. Характеристики токового слоя и тепловой триггер солнечных вспышек // Письма АЖ. Т. 2. С. 293-299. 1976.
2. Podgorny A.I. On the possibility of the solar flare energy accumulation in the vicinity of the singular line // Solar Phys. V. 123. P. 285-308. 1989.
3. Zuccarello F.P., Aulanier G., Dudik J. *et al.* Vortex and sink flows in eruptive flares as a model for coronal implosions // Astrophys. J. V. 837. (2), 115, 14 pp. 2017.
4. Lin R.P., Krucker S., Hurford, G.J. *et al.* RHESSI observations of particles acceleration and energy release in an intense gamma-ray line flare // Astrophys. J. V. 595. P. L69-L76. 2003.
5. Podgorny I.M., Podgorny A.I. Solar flares dynamics investigation using UV diagnostics // Sun and Geosphere. V. 13. P. 69-76. 2018. <http://www.sungeosphere.org/>
6. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Динамика магнитного поля активных областей в предвспышечном состоянии и во время солнечных вспышек // Астрон. журн. Т. 92. С. 669-680. 2015.
7. Jiang C., Wu S.T., Yurchyshyn V. *et al.* How did a major confined flare occur in super solar active region 12192? // Astrophys. J. V. 828. (1), 62, 12 pp. 2016.

ПРОТОННАЯ СОЛНЕЧНАЯ ВСПЫШКА НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ АО12673 НА ОБРАТНОЙ СТОРОНЕ СОЛНЦА

Подгорный¹ И.М., Подгорный² А.И.

¹ИНАСАН, г. Москва, Россия

²ФИАН Россия

podgorny@inasan.ru

THE PROTON SOLAR FLARE ABOVE ACTIVE REGION AR12673 ON THE SOLAR BACK SIDE

Podgorny¹ I.M., Podgorny² A.I.

¹INASAN, Moscow, Russia

²FIAN, Russia

The active region AR12673 is appeared near the solar activity minimum and X8.2 flare on the back side of the Sun is produced. The energy for the flare is stored in the magnetic field of a current sheet and released in the corona above the active area. The flare is accompanied by a stream of solar cosmic rays that arrive to the Earth along the interplanetary magnetic lines with a delay equal to the time of free flight. Proton acceleration occurs in the flare current sheet. A similar mechanism seems to be responsible for galactic cosmic rays generation.

Вспышка представляет собой уникальное явление выделения энергии. При мощной солнечной вспышке выделяется до 10^{32} эрг энергии. В настоящее время на звездах зарегистрированы вспышки с энергией до 10^{36} эрг [1, 2]. Только Солнце позволяет получать информацию о механизме вспышек [3, 4]. Выделение энергии солнечной вспышки происходит в короне над активной областью. Численное МГД моделирование конкретных вспышек показало, что магнитная энергия, выделяющаяся при вспышке, запасается в магнитном поле токового слоя, развивающегося в предвспышечном состоянии за счет возмущений, приходящих от фотосферы [5, 6]. Распад токового слоя при вспышке практически не вносит возмущений в магнитное поле активной области, т. к. затухание токов слоя происходит высоко в короне. При вспышке обнаруживаются лишь совершенно ничтожные флуктуации магнитного поля активной области [7]. Вспышечные токовые слои возникают, как правило, в периоды высокой солнечной активности, и их генерация может быть обнаружена по появлению эмиссии спектральной линии 94 \AA FeXVIII [8]. При вспышке в короне над активной областью появляется облачко плазмы, излучающее спектральные линии 193 \AA и 131 \AA , которые излучаются при температурах 20 МК и 16 МК, соответственно [9]. Это облачко плазмы является также источником теплового рентгеновского излучения вспышки [10]. Многие большие солнечные вспышки сопровождаются солнечными космическими лучами с энергией протонов не менее 20 ГэВ, ускоряемыми в токовом слое. В работе [11] показано, что во вспышечном токовом слое формируется экспоненциальный спектр протонов.

Нет никаких оснований полагать, что механизмы ускорения частиц на Солнце и на других звездах имеют различную природу. Однако энергия галактических космических лучей на несколько порядков величины превышает максимальную энергию протонов, ускоренных на Солнце. Этот факт долгое время не позволял однозначно утверждать, что ускорение звездных и солнечных космических лучей происходит одним и тем же механизмом. Обнаружение гигантских вспышек на звездах [1, 2] с энергией, значительно превышающей энергию солнечной вспышки, указывает на возможность ускорения протонов за пределами солнечной системы до энергий, значительно больших, чем энергия солнечных космических лучей. Результаты работ [1, 2] можно рассматривать, как новый независимый аргумент в пользу генерации галактических космических лучей во вспышках, а не в ударных волнах. Возникновение “супервспышек” с энергией значительно большей, чем энергия, регистрируемая при солнечных вспышках максимальной величины, обнаружено аппаратом Кеплер на различных звездах карлика класса G [1]. Ранее считавшееся значительным различие максимальных энергий галактических и солнечных космических лучей не способствовало представлению об одинаковых механизмах их происхождения, однако обнаружение супервспышек (superflares) сделало гипотезу об ускорении космических лучей более основательной. Данные работы [2] показали, что энергия звездной вспышки может превосходить 10^{36} эрг, т. е. превосходить энергию большой солнечной вспышки на 3 – 4 порядка величины, а, по-видимому, энергия протонов, ускоренных в этих звездных вспышках, может значительно превышать энергию, частиц, регистрируемых от вспышек на Солнце. Таким образом, вспышка может быть универсальным астрономическим процессом, ответственным за ускорение протонов на Солнце и на звездах.

Мощная серия солнечных вспышек наблюдалась во время низкой солнечной активности в сентябре 2017 г. Слабая активная область AO12673 вышла из-за восточного лимба 4 сентября, возросла и, пройдя солнечный диск, скрылась за западным лимбом 10 сентября, дав мощную вспышку X8.2, сопровождающуюся потоком солнечных космических лучей (Рис. 1). Приход фронта потока релятивистских протонов к Земле относительно фронта рентгеновского излучения запаздывает не более, чем на 20 – 30 минут, т. е. ускорение протонов происходит во время вспышки, а их распространение к Земле осуществляется со скоростью протонов. Такое распространение может происходить только без столкновений вдоль магнитных линий, соединяющих космический аппарат со вспышкой. Такими линиями являются линии спирали Архимеда. Аналогичная картина типична для всех вспышек, образованных над активными областями на Западе солнечного диска. Фронт потока протонов от восточных вспышек запаздывает на несколько часов. Эти протоны могут приходиться к Земле только поперек магнитного поля благодаря диффузии. Длительность протонного потока, измеряется сутками, по-видимому, происходит диффузионное распространение частиц из-за рассеяния на флуктуациях поля, вызванных пучковой неустойчивостью [12].

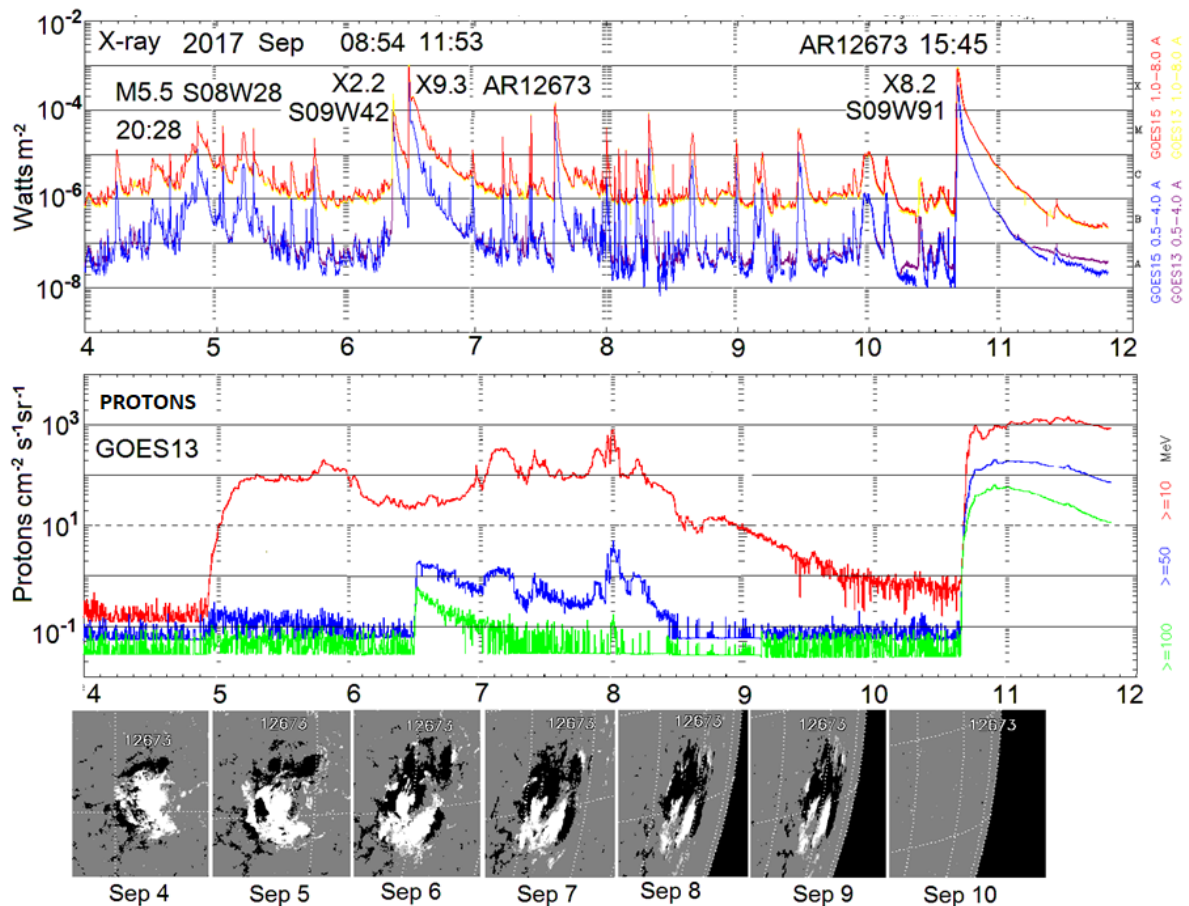


Рис. 1. Событие 4 – 10 сентября 2017 г. в минимуме солнечной активности и эволюция магнитного поля в активной области АО12673.

Вспышка 10 сентября возникла над активной областью, расположенной за западным лимбом недалеко от границы видимого солнечного диска. Место ее энергосвечения в короне отчетливо видно по возникновению вспышечной эмиссии высокотемпературной плазмы в линиях 193 \AA и 131 \AA . Солнечная вспышка в линии 193 \AA , типичной для иона железа FeXXIV в горячей плазме, показана рис. 2. На этих уникальных снимках отчетливо видно возникновение локальной эмиссии высокотемпературной спектральной линии иона железа в короне. Энергия вспышки выделяется в короне над активной областью!

Таким образом, исследование эмиссий спектральных линий высокоионизованного железа подтверждает данные теплового рентгеновского излучения [10] о появлении во время вспышки плазменного высокотемпературного образования над активной областью. Горячее плазменное образование появляется в том месте, где численное МГД моделирование показывает образование токового слоя.

10.09.2017 X8.2 S09W91 AR12673 $t_0 = 15:25$

193 A FeXXIV 20 MK

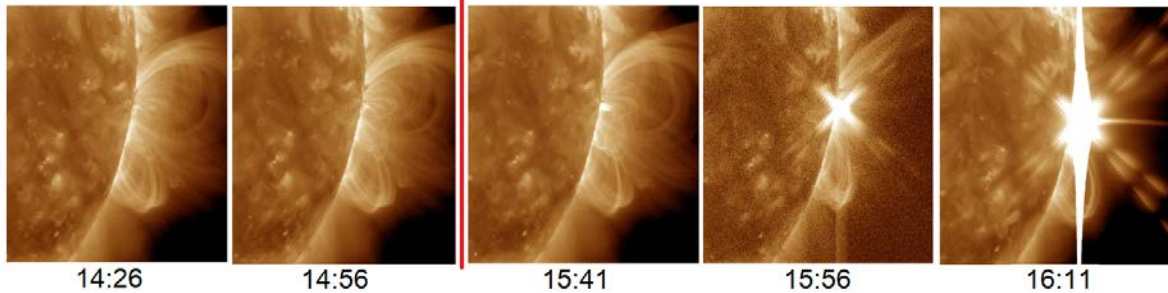


Рис. 2. Вспышка X8.2 в высокотемпературной спектральной линии 193 А. Активная область располагалась на обратной стороне Солнца. Нагревание облачка плазмы происходит в короне за границей солнечного диска.

Литература

1. Maehara H. *et al.* Superflares on solar-type stars // *Nature*. V. 485. 478-481. 2012.
2. Shibayama T. *et al.* Superflares on solar-type stars *Ap. J. Suplimento Ser.* V. 209. P 5-17. 2013.
3. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки 1 // *Геомаг. Аэроном.* Т. 52. С. 162–175. 2012.
4. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки 2 // *Геомаг. Аэрон.* Т. 52. С. 176–189. 2012.
5. Podgorny A.I, Podgorny I.M. Possibility of Real Time Scale MHD Simulation above an Active Region // *Geomag. Aeronom.* V. 53. P. 966-977. 2013.
6. Podgorny A.I, Podgorny I.M., Meshalkina N.S. Magnetic field configuration in corona and X-ray sources for the flare from May 27, 2003 at 02:53 // *Sun and Geosphere.* V. 12. P. 85-92. 2017.
7. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Динамика магнитного поля активных областей в предвспышечном состоянии и во время солнечных вспышек // *АЖ.* Т. 92. С. 668-680. 2015.
8. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Диагностика солнечной вспышки путем анализа спектральных линий высокоионизованного железа // *АЖ.* Т. 95. С.
9. Podgorny I.M., Podgorny A.I. Solar flares dynamics investigation using UV diagnostics // *Sun Geosphere.* V. 13. P. 69-76. 2018.
10. Lin R.P. *et al.* RHESSI observation of particle acceleration and energy release in an intense solar gamma-ray line flare // *AJ.* V. 595. P. L69-L76. 2003.
11. Podgorny I.M., *et al.* Spectrum of solar flare protons // *J. Atm. Solar-Ter. Phys.* V. 72. P. 988-991. 2010.
12. Istomin, Ya.N. Relativistic jets in active galactic nuclei: time variability // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 408. P 1307-1312. 2010.

ВОЗБУЖДЕНИЕ И ЗАТУХАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ И ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ КОРОНЫ

Подгорный¹ И.М., Подгорный² А.И.

¹ИНАСАН, г. Москва, Россия

²ФИАН Россия

podgorny@inasan.ru

EXCITATION AND DIMMING OF THE OF SPECTRAL LINES OF MULTICHARGED IONS AND DYNAMICS OF THE CORONAL TEMPERATURE

Podgorny¹ I.M., Podgorny² A.I.

¹INASAN, Moscow, Russia

²FIAN, Russia

The active region AR12673 is appeared near the solar activity minimum. The dimming of the spectral line 193 Å (FeXII) is observed before and after the X9.3 flare. The dimming in emissions of other spectral lines is not observed. It is impossible to insist that dimming is created due to flare energy release. He dimming of the spectral line 193 Å can appear due to local ions FeXII density decreasing. Such decreasing can be result of the local electron temperature increasing or decreasing.

Концентрация в плазме ионов, обладающих зарядом Z_e , определяется равновесием элементарных актов ионизации и рекомбинации. В солнечной короне ионизация осуществляется электронным ударом, а рекомбинация происходит при радиационном захвате свободного электрона. Оба процесса сильно зависят от температуры, поэтому при данной температуре в короне могут существовать только ионы с определенными Z_e , а излучение спектральной линии иона с данным Z_e происходит из плазмы только при определенной температуре. Что же касается появления областей затухания эмиссии (dimming) данного иона, то затухание может означать, как выгорание иона при возрастании температуры (образование иона $(Z+1)e$) при высокой скорости ионизации, так и из-за понижения концентрации ионов Z_e в результате рекомбинации ионов с образованием ионов $(Z-1)e$ из-за уменьшения температуры. Метод наблюдения за состоянием ионизационного равновесия уже много лет успешно используется при исследовании высокотемпературной плазмы в лаборатории [1]. К сожалению, не всегда возможно выделить спектрометром данную спектральную линию, т. к. и в интервал, регистрируемых прибором длин волн, могут входить излучения двух-трех ионов с незначительно отличающимися длинами волн. Именно такая ситуация имеет место со спектральной линией железа 193 Å, регистрируемой на аппарате Solar Dynamic Observatory.

В интервал регистрируемого аппаратом SDO излучения с длиной волны 193 Å, входят спектральные линии ионов FeXXIV ($T_e = 20$ МК) и FeXII ($T_e = 1.2$ МК). Хотя максимум яркости спектральной линии 193 Å иона FeXII со-

ответствует температуре 1.2 МК, но она довольно ярко высвечивается и при типичной температуре короны $T_e = 1$ МК. Локальное возрастание температуры вспышечной плазмы должно привести к выгоранию иона FeXII и затуханию линии 193 Å (dimming). Затухание линии 193 Å может происходить также и из-за локального понижения температуры, что должно приводить к возрастанию скорости рекомбинации и образованию иона FeXI. Явления рекомбинации и ионизации должны наблюдаться при незначительном изменении температуры короны. Типичные димминги при низкой солнечной активности, когда никакие вспышечные процессы не наблюдаются, показаны на рис. 1.

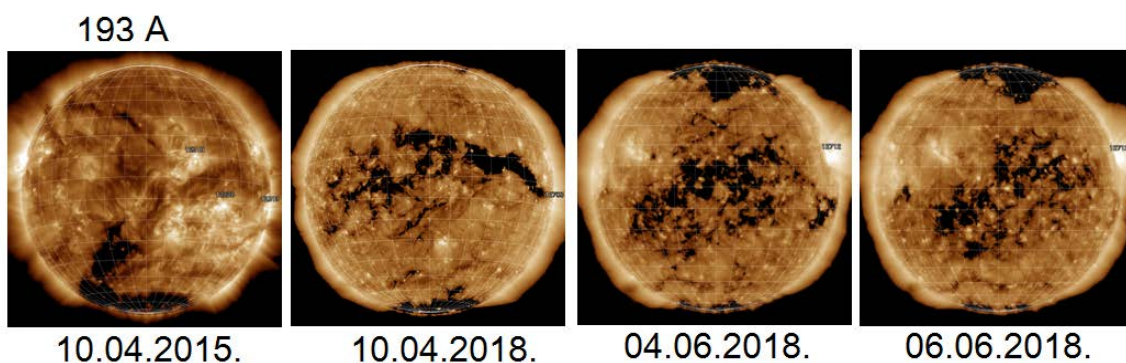


Рис. 1. Обширные димминги в линии 193 Å при низкой солнечной активности.

Локальный вспышечный нагрев плазмы может вызвать полное выгорание иона FeXII и образование областей с ионами с высокой степенью ионизации. При типичной температуре вспышечной плазмы, оцениваемой по тепловому рентгеновскому излучению, ~40 МК, при вспышке должны доминировать ионы FeXXIV, излучающие спектральную линию, длина волны которой также входит в диапазон 193 Å, регистрируемый аппаратом SDO.

Другой сценарий природы димминга во время солнечной вспышки предлагается в работах [2, 3]. Димминг рассматривается не как результат развития физических процессов в короне, а как результат простого наложения изображения холодного сгустка плазмы, выброшенного из Солнца при выделении вспышечной энергии, на фотографию распределения яркости спектральной линии 193 Å. Считается, что выброшенное оптически толстое облачко попадает на линию зрения, и эмиссия спектральной линии 193 Å в ограниченной области экранируется. При таком наложении изображений димминг должен появляться после вспышечного выделения энергии с образованием коронального выброса. В этом же месте димминг должен наблюдаться на фотографиях и для других эмиссий других линий. Более того, димминг линий, используемых в измерениях магнитного поля, должен сделать невозможным получение какой-либо информации о магнитном поле в области димминга. Непонятно, каким образом понятие “магнитное поле димминга” или “магнитный поток диммингов” вводится в рассмотрение в работах И.Чертка и др. В работах этих авторов утверждается: “Для вспышки 4 сент. измеренный эруптивный магнитный поток составил $\Phi \approx 53.5$ mfu

(здесь и далее магнитный поток выражен в единицах $1 \text{ mfu} = 10^{20} \text{ Мкс}$). За какое время произошла эрупция этого потока? Многочисленные наблюдения показывают, что измеряемое распределение магнитного поля на фотосфере в предвспышечном состоянии и при вспышке практически постоянно [4]. Не ясно, о каком эруптивном потоке идет речь. Каким образом и для какой вспышки получена информация о существовании эруптивного магнитного потока?

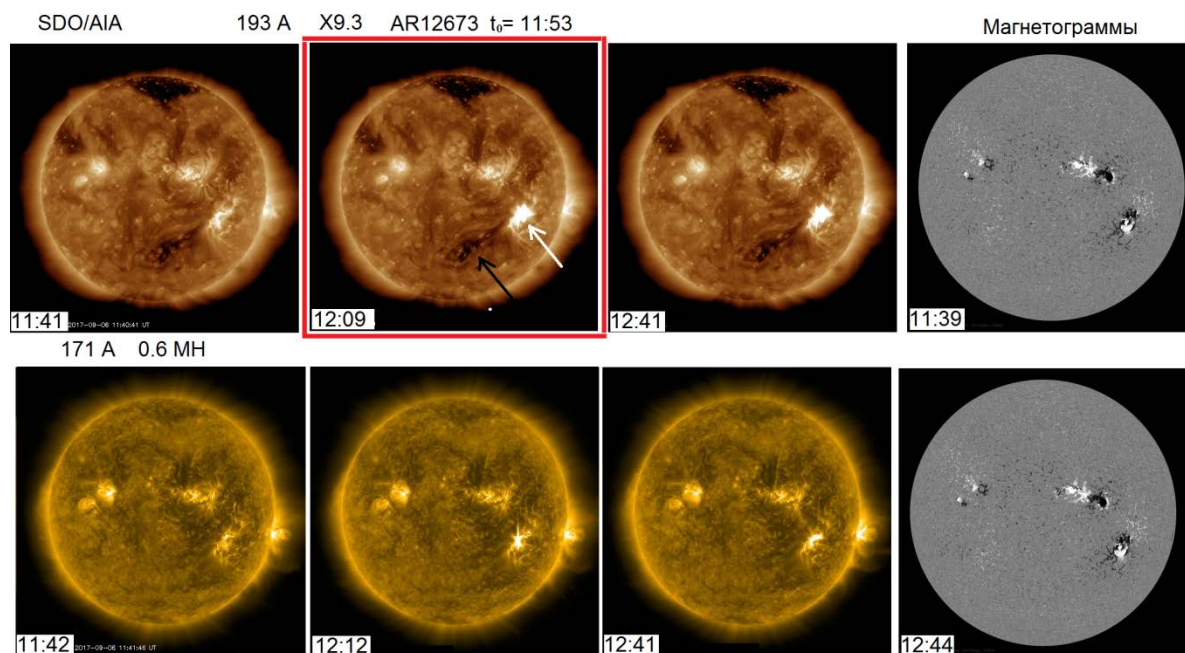


Рис. 2. Фотография солнечного диска во время вспышки 6 сентября 2017 г. в линии 193 \AA показана в верхнем ряду (второй квадрат слева). Для сравнения представлены фотографии до и после вспышки. Внизу фотографии в спектральной линии 171 \AA , которая излучается в нижней короне. Её интенсивность слабо возрастает во время вспышки. Магнитограммы показывают отсутствие изменений фотосферного магнитного поля.

Во время вспышки X9.3 6 сентября 2017 г. отчетливо наблюдается затухание эмиссии линии 193 \AA , которое трактуется другими авторами как типичный димминг, возникший из-за экранировки эмиссии в линии 193 \AA облачком коронального выброса плазмы. На рис. 2 на фотографии в линии 193 \AA в верхнем ряду белой стрелкой показана вспышечная эмиссия линии 193 \AA , а черной стрелкой показано положение димминга. Следует отметить, что димминг 6 сентября 2017 г. наблюдался вдали от вспышки и вдали от положения активной области. Полностью отсутствует какая-либо связь димминга с магнитным потоком какой-либо активной области, тем более с “эруптивным магнитным потоком”. Этот димминг не имеет ничего общего с появлением выброса сгустка плазмы, эрупцией магнитного потока. Как следует из Рис. 2, провал эмиссии линии 193 \AA существовал до начала выделения энергии вспышки и после вспышки. Димминги не обнаруживают спектральные линии других ионов. Такой процесс отличается от экранировки излучения

выбрасываемым при вспышке сгустком плазмы, когда провал эмиссии при экранировке плазмой, выбрасываемой при вспышке, должен наблюдаться одновременно и в одинаковых местах в спектральных линиях разных ионов. Для сравнения показаны фотографии, сделанные в спектральной линии 171 \AA иона FeIX (0.6 МК). Никаких признаков димминга в эмиссии этой спектральной линии не наблюдается.

Другая ситуация наблюдается при развитии вспышки [5]. В горячей вспышечной плазме при температуре, согласно рентгеновским измерениям, около ~ 40 МК ион FeXII полностью выгорает, но возникает очень яркая эмиссия спектральной линии 193 \AA во время вспышки, которая может принадлежать только иону FeXXIV. Яркая эмиссия линии 193 \AA возникает в короне над активной областью в том месте, где магнитогидродинамическое численное моделирование показывает образование токового слоя и предвспышечное накопление энергии в магнитном поле токового слоя [6]. Одновременно вспыхивает эмиссия линии 131 \AA иона FeXXIII, которая никогда не наблюдается в короне в спокойных условиях.

Литература

1. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы // Атомиздат 1968.
2. Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions – sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // *Solar Phys.* V. 282. P. 175-199. 2013.
3. Chertok I.M., Abunina M.A., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V. Relationship between the magnetic flux of solar eruption and the Ap index of geomagnetic storm decreases // *Solar Phys.* V. 290. P. 627-633. 2015.
4. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Динамика магнитного поля активных областей в предвспышечном состоянии и во время солнечных вспышек // *АЖ.* Т. 92. С. 669–680. 2015.
5. Podgorny I.M., Podgorny A.I. Solar flares dynamics investigation using UV diagnostics // *Sun and Geosphere.* V. 13. P. 69 - 76. 2018.
6. Podgorny A.I., Podgorny I.M. MHD Simulation of solar flare current sheet position and comparison with X-ray observations in active region NOAA 10365 // *Sun and Geosphere.* V. 8. P. 71 - 76. 2013.

СОЛНЦЕ И БИОСФЕРА: 4 МЛД ЛЕТ СОСУЩЕСТВОВАНИЯ**Рагульская М.В.**

ИЗМИРАН, Москва, Россия

ra_mary@mail.ru**SUN AND BIOSPHERE: 4 BILLION YEARS OF COEXISTENCE****Ragulskaya M.V.**

IZMIRAN, Moscow, Russia

The origin and development of life on Earth was determined not only by earth conditions, but also by processes on the young Sun (YS), in the Solar System (SS) and galactic molecular clouds. The impact of galactic cosmic rays and magnetic fields on organic molecules begins else in galactic molecular clouds, during the pre-biological evolution of organic matter in the Universe. Significant factors for the early biosphere: 1. Radiation of the YS; 2. Interdependence of the planets SS; 3. Magnetic field of the Earth; 4. Galactic cosmic rays. Young Sun (YS) had a circulation period of ~ 5-8 days, a mass of ~ 103% of the modern.. The first solar cycles (~ 5 years) appeared ~ 2.5 billion years ago. The intensity of sporadic radiation exceeded the current one by several orders of magnitude. The intense ultraviolet radiation of YS exerted a significant influence on the formation and selection of biosphere genetic code. The luminosity of YS was less by 30%. The geomagnetic field protects the biosphere from intense cosmic rays. The formation of the geomagnetic field occurred 1.5-2 billion years ago according to dynamo theory. But according to paleomagnetic data there was a magnetic field of the Earth 4 -4.2 billion years ago. Its values were comparable with modern (geomagnetic paradox). The reason for the emergence of such a field could be the process of formation of the Earth-Moon system as well as tidal interaction of proto-Earth with migrating giant planets. The contribution of galactic cosmic rays in the regulation of biosphere processes significantly increases of during period prolonged solar activity decline and during reversals of the geomagnetic field. It can occur because changes in the oxygen, ozone and nitrogen content in the Earth's atmosphere during the solar activity cycle. Or can occur because a change in the amount of oxygen, phosphorus and iron in the blood of mammals and humans. One of the primary long-term energy stores in the bio-objects of the early Earth are polyphosphates. Therefore, it was this method of energy storage that was fixed in the first terrestrial organisms by evolutionary selection under the influence of galactic cosmic rays on the surface and atmosphere of the early Earth (or even earlier, when forming a proto-planetary cloud). The influence of space weather factors on the biosphere are observed to the present day.

В дискуссиях о происхождения жизни и первых экологических систем обычно рассматривают состав атмосферы, гидросферы и литосферы на ранней Земле, а также бомбардировку поверхности нашей планеты космическими телами. Однако существуют более глобальные процессы. Происхождение и существование галактик обусловлено флуктуационным равновесием между энергией глобального магнитного поля, кинетической энергией газа и энергией космических лучей. Воздействие галактических космических лучей и магнитных полей на органические молекулы начинается еще в галактических молекулярных облаках (МО), во время предбиологической эволюции

органического вещества во Вселенной. В настоящее время в МО спектроскопическими методами зарегистрировано более 200 сложных органических молекул. Список известных межзвездных и околозвездных молекул приведен на сайте [http:// astrochymist.org/](http://astrochymist.org/). В последнее время это разнообразие нередко становится поводом к предположению, что органические вещества будущей биосферы могли бы прибыть на Землю в готовой форме. Ключевую роль в межзвездной молекулярной химии играют реакции между ионизированными и нейтральными реагентами с первичной ионизацией, обеспечиваемой частицами космических лучей.

Итак, происхождение и развитие жизни на Земле определялось не только условиями на самой Земле, но и процессами формирования органики в галактических облаках, динамикой молодого Солнца и процессами в Солнечной системе (СС), происходящими под влиянием магнитного поля и космических лучей. Существенными для ранней биосферы факторы являлись: 1. Излучение раннего Солнца 2. Взаиморасположение планет СС 3. Магнитное поле Земли 4. Галактические космические лучи (ГКЛ).

Раннее Солнце (YS) имело период обращения около 5-8 дней, массу не более 103% от современной. Не существовало упорядоченной периодичности. Солнечные циклы (~5 лет) появились ~2,5 млрд лет назад. Форма и динамика магнитного поля молодого Солнца при разных периодах вращения рассмотрены в [1,2]. Светимость YS была меньше на 30%. При этом интенсивность спорадического излучения превышала современную на несколько порядков. Если учитывать только солнечную светимость, то поверхность Земли должна была быть замерзшей первые 2 млрд лет. Однако по геологическим и биологическим данным температура земной поверхности существенно превышала современные значения (50-70 С против +15 С в настоящее время). Решение этого парадокса может лежать в других условиях отражения и поглощения света атмосферой и поверхностью ранней Земли (причем, скорее, всего при активном участии первых пробиологических и биологических структур). Также ранняя Земля могла быть ближе к Солнцу из-за миграции Юпитера и Сатурна. В этих условиях интенсивное ультрафиолетовое излучение YS оказывало существенное влияние на формирование и отбор первых экологических сообществ Земли. Например, нуклеотиды единого генетического кода земной биосферы не являются химически единственно возможными. Но именно они позволяют формировать молекулы ДНК, наиболее устойчивые к ультрафиолетовому излучению.

Геоманнитное поле защищает биосферу от интенсивных космических лучей. Формирование геоманнитного поля по теории динамо произошло 1,5-2 миллиарда лет назад. Однако по палеомагнитным данным, уже 4 -4,2 млрд лет назад существовало магнитное поле Земли. Его значения были сравнимы с современными (геомагнитный парадокс). Особенности парадокса рассмотрены в [3]. Причиной возникновения такого поля мог стать процесс формирования системы Земля – Луна, а также приливное взаимодействие прото-Земли с мигрирующими планетами-гигантами. Влияние космогеофизиче-

ских факторов на биосферу сохранилось до наших дней. Влияние ГКЛ усиливается при длительных минимумах солнечной активности и инверсиях геомагнитного поля, СКЛ – при циклах СА высокой интенсивности. Наиболее тяжелая ситуация для биосферы наблюдается даже не при повороте магнитного диполя параллельно экватору, а при формировании многочисленных мигрирующих зон доступа ГКЛ и СКЛ к поверхности Земли при мультипольном варианте геомагнитного поля (процессы в солнечно–земном пространстве и магнитосфере в варианте квадрупольного поля Земли при инверсии отражены на Рис.1).



Рис. 1. Межпланетные процессы и магнитосфера Земли при инверсиях геомагнитного поля (мультиполь).

Первичная биосфера ранней Земли недоступна для прямого изучения, но имеются аналоги древних биообъектов (например, содержащие волутиновые гранулы полифосфатов). В работах [4, 5, 6] рассматривался аспект воздействия ГКЛ на современные биосистемы. При длительных мониторингах зафиксированы вариации динамических показателей эталонных клеточных структур с волутиновыми гранулами, статистически значимо совпадающие с вариациями ГКЛ (мониторинг 2000-2013 гг., *Saccharomyces cerevisiae*, Е. Н. Громозова, Киев). Эволюционные адаптивные реакции, связанные с ГКЛ и СКЛ, особенно востребованы в минимуме цикла СА, длительных минимумах (подобных Маундеровскому), и при инверсиях геомагнитного поля [6]. Механизм воздействия может быть связан с изменениями содержания кислорода, озона, серы и азота в атмосфере Земли в разные фазы цикла СА (длительные вариации). Краткосрочные вариации могут быть связаны с эволюционными адаптивными изменениями содержания и распределения концентрации фосфора, кислорода и железа в живых организмах.

В настоящее время предполагается, что состав и отбор единого генетического кода земной биосферы происходил при активном участии интенсивного ультрафиолетового излучения молодого Солнца [7]. Однако не только этот космофизический фактор оказал активное влияние на формирование первых организмов. Скорее всего, именно галактические космические лучи

определили способы накопления энергии в древних экологических сообществах [8]. Одними из первичных длительных хранилищ энергии в биообъектах ранней Земли являются полифосфаты. Эти пробиологические структуры до сих пор присутствуют, например, в клетках современных дрожжей (в виде волютиновых гранул) или гемоглобине человека. Они могли синтезироваться ещё в молекулярных галактических облаках, причем при активном участии галактических космических лучей. Запасание большого количества энергии в результате ионных превращений в таких макроэргических соединениях возможно лишь при высокой концентрации рН-буфера. По эффективности они проигрывают эволюционно более позднему синтезу и запасу энергии углеводов с помощью поглощения энергии Солнца путем превращения электрически нейтральных молекул (например, в жирные кислоты с цепью полисахаридов или белки). Но имеется и существенное преимущество - для реализации процесса накопления энергии в полифосфатах не требуется доступа к излучению Солнца. По-видимому, поэтому именно этот способ запаса энергии закрепился в первых земных организмах (путем эволюционного отбора под воздействием галактических космических лучей на поверхность и атмосферу ранней Земли, либо ещё раньше, при формировании протопланетного облака).

Литература

1. Pipin, V.V., 2017, MNRAS, 466, 3007
2. Pipin V.V, 2017, VarSITI 2017
3. Старченко С. В. Энергетические параметры геодинамо, совместимые с палеомагнитными моделями и наблюдениями // Физика Земли, 2017, № 6, с.110-124.
4. Gromozova E. at al. Cosmic rays as bio-regulator of deep time terrestrial ecosystems // Sun and Geosphere. – 2012. – 7(2). – P: 117-120.
5. Belisheva N.K., Lammer H. at al. The effect of cosmic rays on biological systems // ASST, 2012, N8, p. 7-17 (www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012)
6. Ragulskaya M., Life and the Universe” (ed. Obridko V., Ragulskaya M.) – Spb, BBM, 2017, p. 195-213. <http://www.izmiran.ru/pub/izmiran/Life-n-Universe.pdf>
7. Mulkidjan A. Y., Galperin M. Y. Biology direct, 2009, v.4, p.27
8. Рагульская М. В. Космические лучи как фактор эволюционного отбора способов запаса энергии в первичных земных биоструктурах // ССЗФ -2018, ГАО Пулково.

СУББУРЕВАЯ АКТИВНОСТЬ В ПРОЦЕССЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СУРА - МКС

**Ружин¹ Ю.Я., Кузнецов¹ В.Д., Пластинин² Ю.А., Докукин¹ В.С.,
Канониди¹ К.Х.**

1 – ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4

*2- ЦНИИМАШ, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4
ruzhin@izmiran.ru*

THE SUBSTORM ACTIVITY DURING GEOPHYSICAL EXPERIMENTS SURA-ISS

Ruzhin¹ Y.Y., Kuznetsov¹ V.D., Plastinin² Y.A., Dokukin¹ V.S., Kanonidi¹ K.Kh.

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²TsNIIMASH, Korolev, Moscow oblast, Russia

We present the results of the new experiments on modification of the ionosphere by high-power high-frequency (HF) waves from the SURA heating facility. The effects of modification were observed on board the International Space Station (ISS), DEMETER satellite and by ground-based observatories. The presence of geomagnetic field pulsations and effects of substorms stimulated by the SURA facility (in accordance with the cyclograms) against the background of quiet geophysical conditions were shown.

В России существует единственный, созданный в прошлом столетии стенд СУРА для облучения ионосферы мощным пучком радиоволн. Его потенциал на порядок слабее установки США (HAARP) и Европейского стенда (Тремсо), но стенд СУРА (56.13N, 46.1E) дает возможность проводить исследования вне высокодинамичной авроральной области. В рамках этих исследований на базе стенда в последние годы проведена серия новых экспериментов [1-3] с привлечением наземно-космических средств, в частности, российского сегмента МКС. Новизна заключалась в поиске резонансных условий для триггирования мощных природных процессов относительно слабым, но целенаправленным воздействием. Одним из таких природных явлений в ОКП является суббуревая активность.

Особенностью экспериментов являлось то, что критическая частота f_0F2 ионосферного слоя F2 была всегда меньше рабочей частоты стенда (реализовывались условия нагрева «на просвет»), и мощным излучением засвечивался весь объем ионосферы по высоте в пределах диаграммы направленности. Частота модуляции была близка к частотам собственных альвеновских колебаний плазмы магнитной силовой трубки, опирающейся на пятно нагрева в ионосфере. Все эксперименты выполнялись с привлечением бортовой аппаратуры МКС (спектрозональная система "Фиалка-МВ-Космос"). В первом эксперименте 2007 г. сразу после вхождения области нагрева в поле зрения бортового регистратора зарегистрировано яркое локальное свечение, которое по оценкам, находилось в пределах 100-300 км (при высоте нижнего края сияния 130-150 км) к северу от стенда СУРА. Свечение совпадает со вспле-

ском «b» (рис.1, левая панель) в магнитном поле и обусловлено впрыскиванием электронов двойным слоем, развившимся на взрывной фазе активизации суббури [2], вызванной работой стенда. Размер свечения в долготном направлении составил около 200-250 км. В эксперименте 2010 г (рис.1 – справа) триггирована такая же суббуря, полностью повторяющаяся по морфологии, длительности и амплитуде.

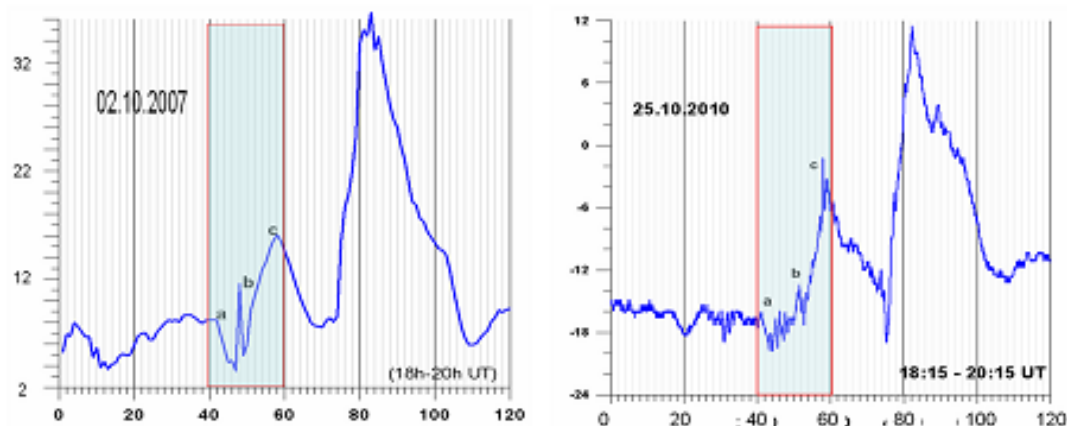


Рис. 1. Вариации (вертикальная шкала в нТл) магнитного поля Земли во время 2-х суббурь, индуцированных стендом СУРА. Затемненный прямоугольник – это время нагрева.

Анализ гелиогеофизической обстановки показал отсутствие значительных гелиогеофизических аномалий в период проведения экспериментов. Важно, что за многолетние наблюдения в Карпогорах не было подобного повторения в вариациях геомагнитного поля, что говорит об искусственной природе этого явления.

Представленные результаты экспериментов со стендом СУРА показали наличие локальной интенсификации авроральной активности. По материалам их анализа предложены модель и механизмы наблюдавшихся явлений [2, 3]. С учетом реальных параметров среды и самого пучка радиоволн проведено моделирование распространения и геометрии облучения ионосферы. Показано, что основным моментом, сопутствующим успеху, было состояние ионосферы над стендом, позволявшее перераспределение и фокусировку радиоизлучения севернее стенда на высотах 200-300 км. Это позволило сорвать, спровоцировать уже неустойчивое состояние ионосферно-магнитосферной системы в виде суббури именно в этом месте с соответствующими вариациями в магнитном поле и ярким локальным сиянием (искусственной авророй).

Поиск условий эффективности воздействия на ключевые процессы, сопутствующие развитию суббуревой активности, является предметом настоящих исследований. В серии экспериментов 2017 года были успешно реализованы новые режимы нагрева ионосферы. При непрерывном с Х-поляризацией двухчастотном нагреве уже в первом эксперименте 20.09 на спокойном геомагнитном фоне наблюдалась одиночная изолированная суб-

буря, идентичная триггированным ранее суббурям, но полученная в новых условиях. В двух других экспериментах, во время нагрева с О-поляризацией начались возмущения, идентифицированные как результат нагрева, которые, развиваясь, по окончании нагрева превратились в возмущение суббурного типа длительностью в несколько часов.

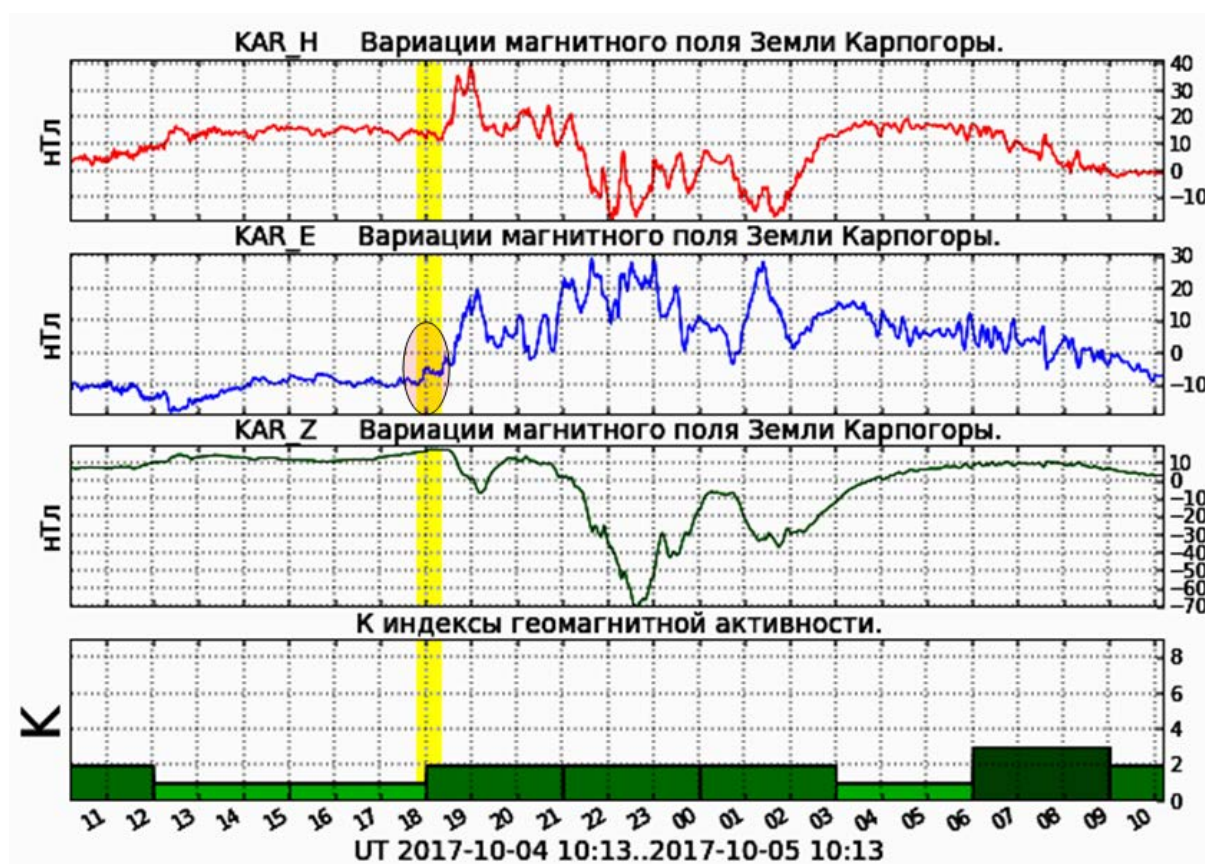


Рис. 2. Магнитограмма станции Карпогоры. Видна спокойно-суточная вариация как индикатор геомагнитной активности.

На рис. 2 представлена регистрация геомагнитного поля за 04-05.10.2017 г. Отмечен период работы стенда в режиме «1мин+1мин». Горизонтальная шкала - время гринвичского меридиана (UT). Нижняя панель – индекс геомагнитной активности для станции Карпогоры. Видно возмущение магнитного поля амплитудой больше 100 нТл на фоне спокойной геомагнитной обстановки. Т.о. зарегистрировано новое возмущение типа одиночной суббури длительностью ~ 10 часов.

На рис. 3 показан фрагмент (см. овал, рис. 2), где видна явная корреляция наведенной периодичности пульсаций с работой стенда, за которой последовало мощное возмущение, стимулированное нагревным стендом СУ-РА. Всплески гармоничных пульсаций геомагнитного поля наблюдались на всех трех компонентах синхронно с работой стенда.

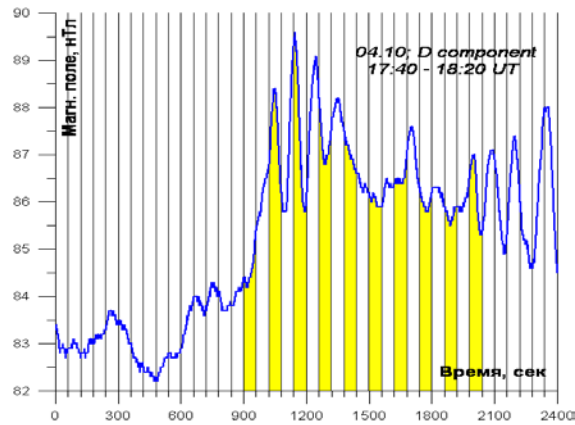


Рис. 3. Фрагмент регистрации (40 минут), где отмечены десять импульсов воздействия на ионосферу стенда СУРА.

Магнитосопряженные измерения в Индийском океане (в южном полушарии) подтвердили локализацию суббурового явления в окрестности меридиана стенда СУРА. Указание на возможность управления характеристиками среды при нагреве ионосферы стендом СУРА повышает актуальность продолжения экспериментов и проведения детального исследования фундаментальных процессов, ответственных за наблюдавшиеся динамику и формирование структур ионосферно-магнитосферной системы во время экспериментов.

Литература

1. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Ковалёв В.И., Бершадская И.Н., Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Парро М. О возможности локализации суббури нагревным стендом «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. Том LV. №1-2. С. 94-105. 2012.
2. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Фролов В.Л., Парро М. Об авроральной активности, вызванной мощным радиоизлучением стенда СУРА // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 46-52. 2013.
3. Kuznetsov V.D., Ruzhin Yu.Ya. Anthropogenic trigger of substorms and energetic particles precipitations // Advances in Space Research. Volume 54. Issue 12. P. 2549-2558. 2014.

РЕАКЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

Ружин¹ Ю.Я., Новиков² В.А.

¹ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, Россия

²ИВТАН, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, Россия

ruzhin@izmiran.ru

RESPONSE OF THE GLOBAL SEISMICITY TO SOLAR FLARES OF SEPTEMBER 2017

Ruzhin¹ Yu.Ya., Novikov² V.A.

¹IZMIRAN, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 142190, Russia

²IHT RAS, Izhorskaya str., 13, bld.2, Moscow, 125412, Russia

Results of an analysis of interrelation between solar activity (powerful solar flares of September 2017) and the Earth seismic activity are presented. It was found that during the solar flares period and one week after the number of earthquakes is risen by up to 100%. It may be attributed to earthquake triggering effects of solar flares.

Существует достаточно обширный ряд публикаций, авторы которых утверждают наличие связи между геоэффективными солнечными событиями и сейсмичностью Земли [1-7]. Выводы в этих работах изменяются от утверждения о существовании положительной корреляции между сейсмической активностью Земли и активностью Солнца [1, 5] до обнаружения антикорреляции между ними [2]. Существует также определенный скептицизм при оценке существования таких солнечно-земных связей, приводящих к статистически значимым вариациям сейсмичности (например, [7]). В последнее время опубликован ряд работ, в которых предлагается гипотеза о триггерном воздействии вариаций геомагнитного поля на сейсмичность (магнитных бурь с внезапным началом) [11,12,15], а также суточных Sq-вариаций [10]. Так, статистический анализ, выполненный для различных регионов мира (Северная Америка, Центральная Европа, Китай, Япония) показал убедительную корреляцию между вариациями геомагнитного поля и числом землетрясений, как для среднесуточного цикла, так и в течение длительного периода времени порядка 150 лет.

На примере зоны сосредоточенной сейсмичности Вранча показано, как напряженно-деформированное состояние среды реагирует на возмущенность геомагнитного поля [9] в течение 4-5 дней (Рис.1). Установлено, что реализация сейсмической энергии связана с перепадами в Н-компоненте геомагнитного поля и что такими "градиентами" часто является суббуря, точнее ее среднеширотные проявления.

Интересно, что такое же воздействие на сейсмичность оказывают токовые импульсы искусственных возбудителей - МГД-генератора "Памир-2" (генерируемый ток 1,5-2,5 кА) и электроимпульсной установки ЭРГУ-600

(ток 600 А) (Рис. 2), подаваемые в земную кору через заземленный диполь длиной 3-4 км. В работах [13-15] проанализированы многолетние наблюдения воздействия мощных токовых импульсов на пространственно-временное распределение сейсмичности и сделан вывод о том, что воздействие электрических импульсов коррелирует с сейсмичностью, и о, вероятно, триггерном характере воздействия электрических импульсов на сейсмичность.

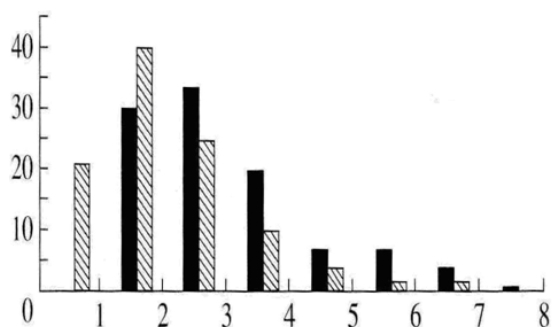


Рис. 1. Количество землетрясений в земной коре в районе Вранча, Румыния. По горизонтали – число суток после максимума суббури. Черные столбцы – глубинные землетрясения (глубина эпицентра >100 км), серые – мелкофокусные землетрясения (5-20 км).

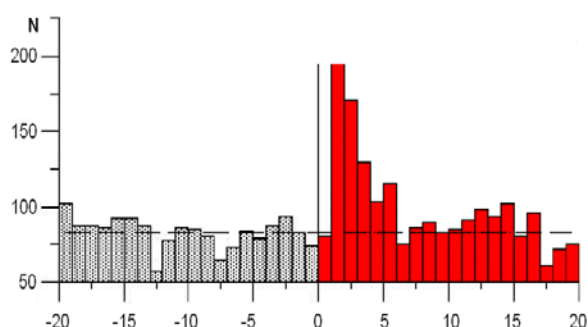


Рис. 2. Ежедневное число землетрясений для 5 км слоя земной коры в районе полигона Бишкек (для $M_b > 3.4$). По горизонтали – число суток до и после пуска МГД-генератора, 0 соответствует времени подачи электрического импульса.

В публикациях Соболева [11,12] отмечается, что с вероятностью 99.9% существует корреляция между геомагнитными бурями с внезапным началом и землетрясениями, зарегистрированными на территории Киргизии и Казахстана [12] и территории Кавказа [11]. Максимум корреляции наблюдается спустя 2-7 дней после внезапного начала бури.

Мощный всплеск солнечной вспышечной активности, произошедший в начале сентября 2017 г. при приближении к минимуму 24-ого цикла, сопровождался значительными возмущениями космической погоды. 6 сентября группа солнечных пятен *AR2673* произвела крупную солнечную вспышку класса *X9,3* - самую сильную за последние 12 лет. Взрыв от нее произвел корональный выброс массы, направленный частично в сторону Земли.

Для выяснения влияния вспышек на Солнце на глобальную сейсмическую активность проведен анализ с использованием каталогов землетрясений USGS и EMSC. Учитывая результаты, полученные по данным Научной станции РАН в Бишкеке (Северный Тянь-Шань) и для района Вранча (Румыния), а также результаты работ [11, 12], свидетельствующие о том, что реакция на воздействие наступает в последующие 1-6 суток, мы выбираем два промежутка времени - один со вспышками класса X (вспышки 6, 7 и 10 сентября), то есть с 6 по 16 сентября и другой, такой же (фоновый) накануне, или с 26 августа по 05 сентября включительно (см. стрелки на рис. 3).

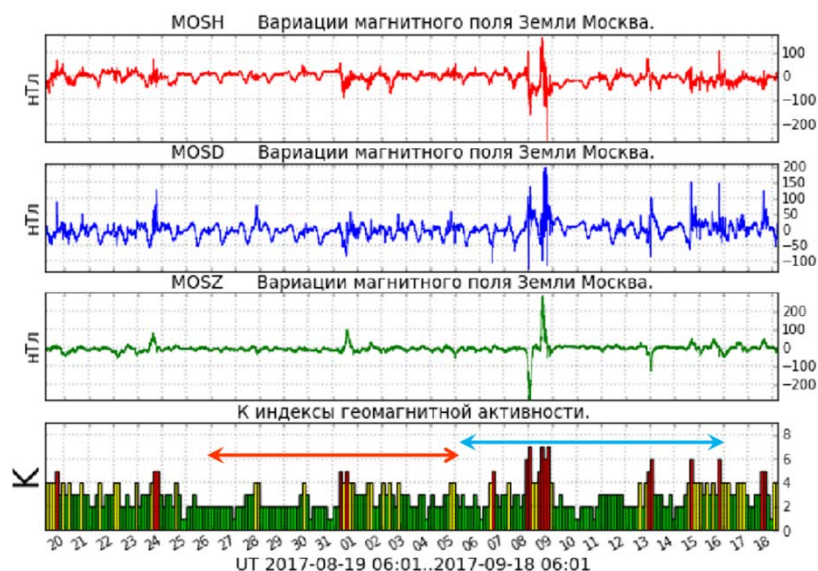


Рис .3. Магнитная активность в течении месяца с 20 августа 2017 г. Стрелками отмечены выбранные периоды для анализа.

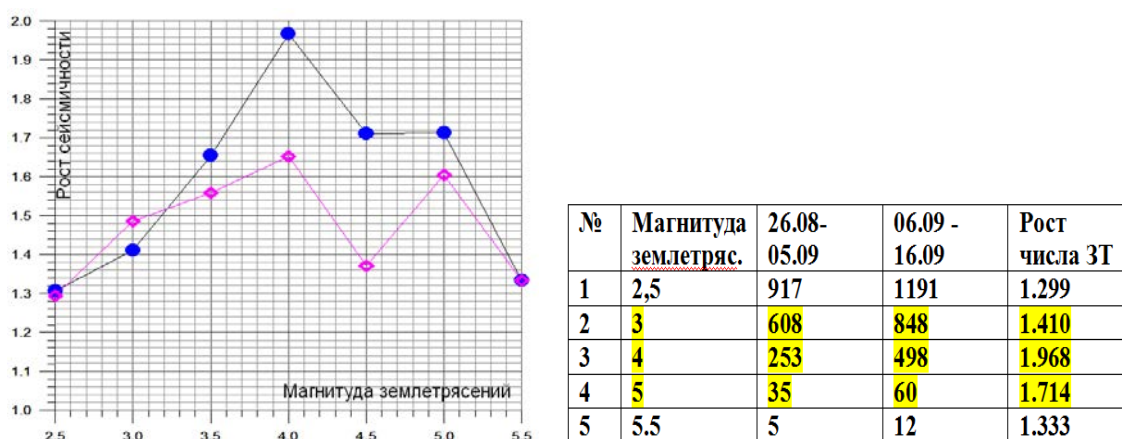


Рис. 4. Сравнение числа землетрясений за одинаковый период (11 дней) до и после вспышек показывает значительный рост (до 100%) числа землетрясений после вспышек для магнитуд от 2.5 до 5.5 по шкале Рихтера. Справа - Таблица с данными для сравнения.

На рис. 3 приведена магнитограмма – вариации геомагнитного поля (три компоненты) по данным обсерватории ИЗМИРАН за месяц (с 20.08 по 20.09.2017) с нанесенными промежутками времени анализа (горизонтальные стрелки). Нижняя панель представляет К – локальный индекс магнитной активности. На Рис. 4 представлен рост сейсмоактивности по двум каталогам. Анализ проведен по каталогам USGS (USA, Earthquake Hazards Program) – квадраты на Рис. 4 и EMSC (The European Mediterranean Seismological Centre) – кружки. Таким образом, сравнением числа землетрясений за одинаковый период (11 дней) до и после вспышек показан значительный рост (до 100% - см. кружки и Таблицу) числа землетрясений после вспышек для магнитуд от 2.5 до 5.5 по шкале Рихтера.

Литература

1. Лоцинская Н.И. Связь глобальной энергии землетрясений с солнечной активностью//Вестник Киевского университета. Серия астрономия. 1999. Вып. 35. С. 45-50.
2. Одинцов С.Д., Иванов-Холодный Г.С., Георгиева К. Солнечная активность и глобальная сейсмичность Земли // Известия РАН. 2007. Т. 71. № 4. С. 608-610.
3. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 2. С. 13-30.
4. Сытинский А.Д. Зависимость сейсмичности Земли от процессов на Солнце, в межпланетной среде и в атмосфере // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный Мир, 1998. Т. 2. С.70-72
5. Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. On the relation between solar activity and seismicity on different time scales // Journal of Atmospheric Electricity. 2002. V. 22. № 3. P. 291-300.
6. Gousheva M.N., Georgiva K.Y., Kirov B.B., Atanasov D. On the relation between solar activity and seismicity // Proceedings of International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 20-22 November 2003. P. 236-240.
7. Simpson I.F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes // Earth and Planet. Sci. Letter. 1968. V. 3. № 5. P. 417-425.
8. Love, J. J., and J. N. Thomas (2013), Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes, Geophys. Res. Lett., 40, 1165–1170, doi:10.1002/grl.50211.
9. Бахмутов В.Г., Седова Ф.И., Мозговая Т.А. Морфологические признаки в структуре геомагнитных вариаций в связи с землетрясениями в зоне Вранча // Геофизический журнал. 2006. Т. 28. № 1. С. 42–50.
10. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations, Natural Hazards and Earth System Sciences (2003) 3:171-177.
11. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность// Физика Земли. 2002. № 4. с. 3-15 .
12. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями// Физика Земли. 2001. № 1. с. 62-72.
13. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана// Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 152-160.
14. Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. On a possible mechanism of formation of caused seismicity induced by electromagnetic impact. Третий международный симпозиум по применению магнитных. электрических и электромагнитных методов в сейсмологии и вулканологии. 2002. М. с. 95-98.
15. Tarasov N.T., Tarasova N.V. Space - temporal changes of seismic regime under impacts of electromagnetic pulses of MHD-generator. Третий международный симпозиум по применению магнитных. электрических и электромагнитных методов в сейсмологии и вулканологии. 2002. М. С. 123-126.

ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ИОНОСФЕРЕ В УСЛОВИЯХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Сергеенко Н.П.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

serg@izmiran.ru

EFFECTS OF ELECTRIC FIELDS IN THE IONOSPHERE UNDER THE CONDITIONS OF HELIOGEOPHYSICAL PERTURBATIONS BY EXPERIMENTAL DATA

Sergeenko N.P.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The magnitude and direction of the additional zonal electric fields during heliogeophysical disturbances was estimated in the present study using various experimental data. The results of the studies showed that the field in the middle latitudes is directed to the East until midnight and to the West - after midnight and is 1 to 5 mV/m, depending on the local time.

Взаимодействие потока солнечной плазмы с магнитосферой Земли приводит к усилению электрического поля в хвосте магнитосферы, которое передается на высоты ионосферы вдоль эквипотенциальных силовых линий геомагнитного поля. Одновременно происходит ускорение и высыпание электронов и протонов из различных областей магнитосферы в ионосферу, приводящее к образованию больших градиентов проводимости.

Эффекты электрических полей во время суббурь выражаются в значительных вариациях высоты и максимальной электронной концентрации слоя F2. Дополнительное зональное электрическое поле оценивалось в настоящей работе по данным вертикального зондирования, данным некогерентного рассеяния радиоволн и данным доплеровского смещения частоты.

Вертикальное зондирование. Если интерпретировать изменения высот слоя F2 в период начальной фазы суббурь как следствие дрейфа плазмы под действием зонального электрического поля, то согласно [1], поле в средних широтах направлено на восток в дополуночном секторе и на запад - в послеполуночном.

Эффекты суббурь в среднеширотной ионосфере были проанализированы по ионограммам станции Москва за январь - декабрь 1986 г. для 28 изолированных суббурь.

На рис.1 приведены полученные методом наложения эпох временные зависимости B_z - компоненты ММП, AE - индекса магнитной активности, Δf_oF2 и Δh_p . Резкое увеличение AE - индекса принималось за начало суббури $t=0$. Средняя продолжительность изолированных суббурь составляла в вечернем секторе $\bar{t}=3,3$ час (рис.1а), в ночном $\bar{t}=3,2$ час (рис.1б) и в утреннем $\bar{t}=3,8$ час (рис.1в).

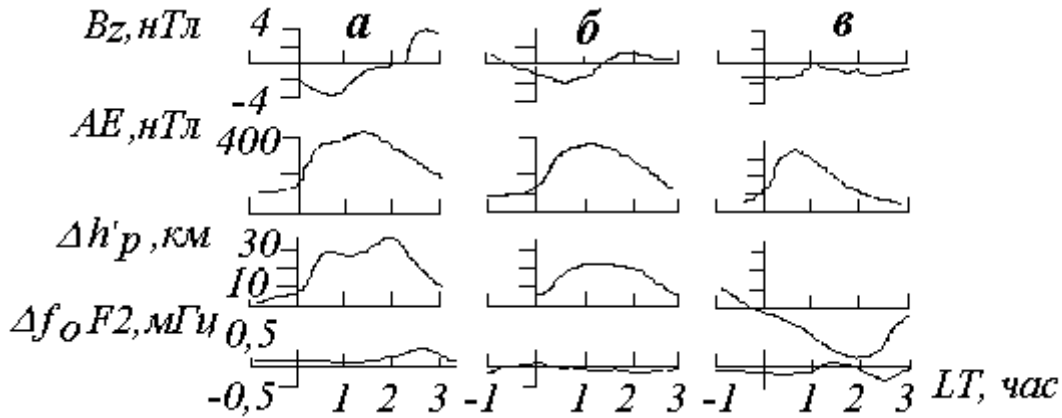


Рис. 1. Изменения B_z -компоненты ММП, AE -индекса и $\Delta f_0 F2$ и Δh_p .

Начало активной фазы суббури сопровождается отрицательными значениями B_z - компоненты ММП и резким возрастанием AE . В вечернем и ночном секторах h_p быстро увеличивается на 25-35 км. Такое увеличение h_p можно приписать появлению в вечернем секторе на высотах ионосферы зонального электрического поля восточного направления $E_y \sim 5$ мВ/м [1]. $\Delta f_0 F2$ невелико и в начале активного периода составляет всего $\sim 0,2 - 0,3$ мГц. На фазе зарождения суббури ($t < 0$) отсутствуют систематические изменения Δh_p . Окончание суббури характеризуется возвращением Δh_p к исходным значениям и поворотом B_z компоненты ММП к северу.

В утреннем секторе (рис. 1в) значения Δh_p убывают на фазе развития суббури, что свидетельствует о появлении на высотах ионосферы E_y западного направления.

Некогерентное рассеяние радиоволн. Величины эффективных значений дополнительного зонального электрического поля были определены по данным некогерентного рассеяния радиоволн НРР в Милстоун-Хилл за 1969 г. [2]. Анализировалась вертикальная компонента скорости перемещения плазмы. Поскольку при НРР измеряется одновременно электронная концентрация, электронная и ионная температуры, то можно определить вертикальную скорость перемещения плазмы и выделить влияние дополнительного зонального электрического поля E_y на слой F2 во время возмущения.

Анализировались три суббури. На рис.2 приведены значения AE - индексов, рассчитанные значения дополнительного зонального электрического поля E_y и изменения высоты $h_m F2$. 27.02 с развитием суббури появляется дополнительное зональное поле E_y западного направления 2–3 мВ/м. Уменьшение h_m во время этой суббури также подтверждает существование на высотах ионосферы зонального электрического поля $E_y^{\omega\phi}$ западного направления.

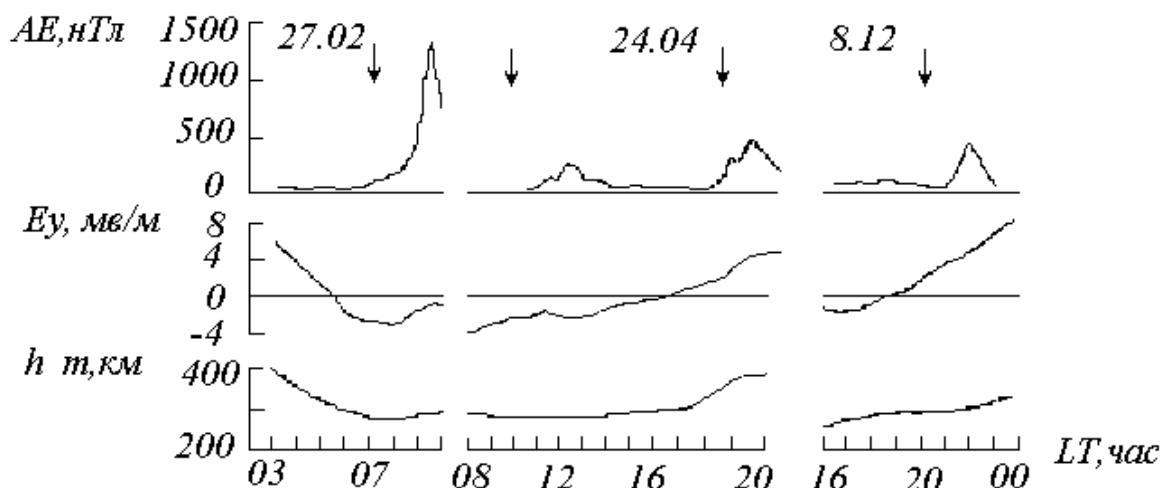


Рис. 2. AE -индексы, зональное электрическое поле E_y и $h_m F2$ для трёх суббурь.

24.04 наблюдались две суббури. Во время первой суббури (10-14 час. LT) вычисленное E_y всего ~ -1 мВ/м. Малая величина E_y также хорошо согласуется с малым уменьшением по отношению к фоновому h_m . Возможно, что малое изменение напряженности поля E_y обусловлено также незначительной интенсивностью данной суббури ($AE_{max} = 250$ нТл). Вторая суббуря сопровождается появлением дополнительного зонального электрического поля восточного направления ~ 1 мВ/м, с развитием суббури увеличивающегося до 5 мВ/м.

Суббуря 8.12 началась в 21 ч LT, с её развитием увеличивается восточное поле до 4 - 8 мВ/м.

Доплеровское зондирование. Доплеровское смещение частоты, определяемое как [3]:

$$\Delta f_a = -\frac{f}{c} \cdot \frac{dP}{dt}, \quad P = \int \mu \, ds \cos \alpha,$$

где α - угол между траекторией луча и вертикалью; c - скорость распространения волны в вакууме; μ - коэффициент преломления, его величина зависит от фазового пути радиоволны P . Во время возмущений фазовый путь изменяется благодаря изменению электронной концентрации и высоты отражения радиоволны. Зональное поле $E_y \sim 1-4$ мВ/м приводят к дрейфу плазмы со скоростью $V_{др} \sim 10$ м/с и соответственно - к доплеровскому сдвигу частоты $\Delta f_a \sim \pm 0,5 - 0,8$ Гц.

Для анализа были использованы записи доплеровского смещения частоты, полученные на аппаратном диагностическом комплексе ИЗМИРАН на трассе квазивертикального зондирования. Длина трассы 70 км, отражение для зондирующей частоты 3240 кГц приходится на высоты 250-300 км. На рис. 3 представлены непрерывные записи вариаций доплеровского смещения частоты Δf_a и отклонения от спокойного уровня ΔH -компоненты геомагнитного поля. Там же с временным разрешением 15 мин приведены критические частоты слоя F2 - $foF2$ и действующие высоты отражения на частоте $0,8 foF2$

($h_p'F2$), снятые по ионограммам вертикального зондирования ионосферы ст. Москва.

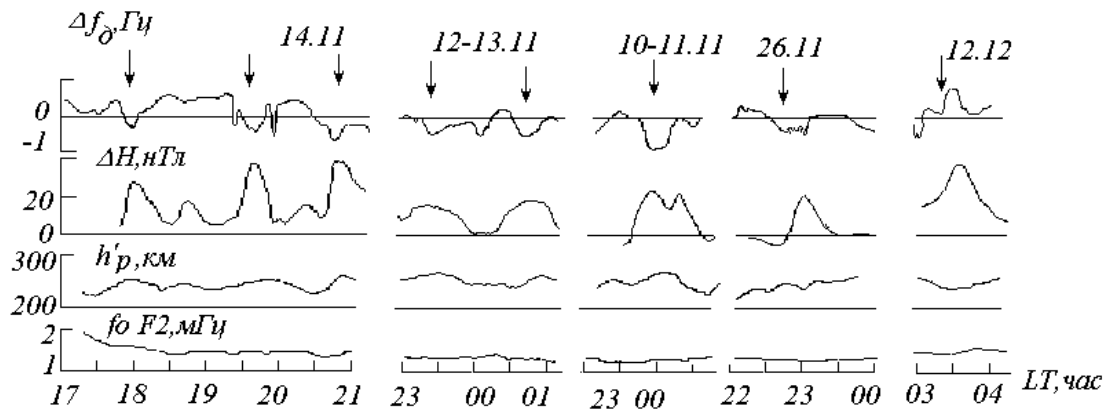


Рис. 3 Доплеровское смещение частоты Δf_D , вариации ΔH -компоненты геомагнитного поля, критических частот f_oF2 и действующих высот $h_p'F2$.

Во время всех суббурь в вечернем и ночном секторе 10-11, 12-13, 14 и 26.11.1976г. наблюдается отрицательное доплеровское смещение до -1 Гц, что соответствует дрейфу ионизации вверх, который обусловлен появлением на высотах ионосферы зонального поля восточного направления, усиливающимся в периоды суббурь.

Суббуря 12.12.1976 (утренний сектор) сопровождалась положительным доплеровским смещением, соответствующим уменьшению высоты h_p' на ~ 40 км и небольшим уменьшением f_oF2 на $\sim 0,2$ МГц. Это свидетельствует о появлении на высотах ионосферы зонального электрического поля западного направления.

Таким образом, первичный эффект магнитосферных суббурь в слое F2 ионосферы проявляется в возникновении зонального электрического поля. Результаты проведенных исследований показали, что поле в средних широтах направлено на восток в дополуночном секторе и на запад - в послеполуночном и составляет 1-5 мВ/м.

Литература

1. Park C.G. Substorms electric fields in the evening plasmasphere and their effects on the underlying F layer. J.Geophys.Res. V. 81. No13. P. 2283-2288. 1976.
2. Evans J. V., Holt J.M. Millstone Hill Thomson scatter results for 1969-1970. Technical Report. No 513,522. Lincoln Laboratory, M.J.T. 1974.
3. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 325 с. 1973.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОСФЕРНЫХ ВЕТРОВ НА ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ "ПУЗЫРЕЙ"

Сидорова Л.Н., Филиппов С.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

lsid@izmiran.ru

THERMOSPHERE WIND INFLUENCE ON THE PROCESSES OF THE EQUATORIAL PLASMA BUBBLE GENERATION

Sidorova L.N., Filippov S.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

According to the theoretical conclusions the eastward thermosphere zonal winds play a key role in the processes of the equatorial plasma bubble (EPB) generation. To verify this assumption the longitudinal EPB distribution (~1100 km, ISS-b, F10.7~200) and the longitudinal profile of the thermosphere zonal wind deviations (~400 km, CHAMP, F10.7≥130) are compared. The high correlation factor ($R \approx 0.76$) is revealed.

В теории генерации экваториальных плазменных "пузырей" (equatorial plasma bubbles, EPB) зональным термосферным ветрам отводится особая роль [3]. Начиная с пионерских работ Woodman and La Hoz [11] принято считать, что EPB формируются под влиянием плазменной неустойчивости Релея-Тейлора (R-T), развивающейся на высотах основания F-области после заходного периода. Далее обнаруживается, что развитие R-T неустойчивости является условием необходимым, но не достаточным. Для формирования EPB требуется еще наличие стартового "затравочного" возмущения плазмы. Это повлекло развитие дискуссии о роли "затравочных" возмущений и механизме их генерации. Рядом исследователей [3, 4, 2] ключевая роль в появлении этих возмущений отводилась столкновительно-сдвиговым и ветровым неустойчивостям, в которых главную роль играют зональные термосферные ветры.

Настоящая работа является прямым продолжением исследований особенностей EPB, наблюдаемых на высотах верхней ионосферы (~1100 км) [8-10]. Так, в работе [10] рассматривался вопрос о путях передачи тропосферного влияния на характер долготного распределения EPB. Была выявлена высокая корреляция ($R \approx 0.79$) долготного распределения EPB с вариациями плотности нейтральной атмосферы области экваториальной аномалии (equatorial mass density anomaly, EMA) [6]. Оба профиля имели характерную "волновую структуру" с 4-мя максимумами. А известно, что такие долготные вариации EMA однозначно связаны с проявлением влияния тропосферной солнечно-приливной волны DE3. Перенос же этого влияния осуществляется, в первую очередь, термосферными ветрами. В этой связи было высказано предположение о том, что модулированный термосферный ветер может

"программировать" характер долготного распределения EPB в момент их генерации, а именно, на этапе появления "затравочных" возмущений.

Известно, что долготные вариации скорости зонального термосферного ветра являются суперпозицией влияния большого числа процессов (в том числе и приливных). Обоснованно возникает вопрос. Есть ли между долготным профилем девиаций (отклонений) скорости зонального ветра и распределением EPB детальное соответствие?

Для ответа на этот вопрос необходим сравнительный анализ. Нетрудно предположить, что его результаты будут служить проверкой теоретических указаний (модель Кудеки [4]) о ключевой роли зональных западных термосферных ветров в процессе генерации EPB.

С этой целью были рассмотрены результаты ветровых измерений [1], полученные на борту спутника CHAMP (2002-2005, F10.7~190÷100), летавшего на высотах ~400 км – типичных высотах верхней термосферы и основания F-области. Результаты приводились в виде графиков долготных зависимостей девиаций скорости зонального ветра, усредненных по 3-часовым суточным интервалам. Для сравнительного анализа мы использовали графики равноденственного периода, полученные в годы повышенной солнечной активности (F10.7≥130). Рассматривались данные предзаходного (15–18 LT) и заходного (18–21 LT) периодов. Для расширенного интервала (15–21 LT) был рассчитан усредненный долготный профиль девиаций скорости ветра (рис. 1, серая кривая). Девиации скорости ветра этом случае изменялись в пределах ~±12 м/с. Фоновый (медианный) западный ветер этого же периода составлял ~100–200 м/с [5]. Иными словами, наблюдаемые возмущения зонального ветра не влияли на общую западную направленность зонального ветра.

С другой стороны, нами было получено распределение вероятности наблюдения EPB (P_{EPB}) вдоль долготы. Для расчета использовались данные спутника ISS-b [7], летавшего на высотах верхней ионосферы (~1100 км) в годы высокой солнечной активности (1978–1979 гг., F10.7~200). График P_{EPB} был рассчитан для сезона весеннего равноденствия (февраль–март–апрель) (рис. 1, темная кривая). Использовались EPB данные магнито-спокойного периода ($Kp \leq 3$), выявляемые на широтах ±(20–50°) INV-LAT обоих полушарий. Поскольку генерация EPB "стартует" на высотах основания F-области в заходный период (~18–19 LT), то до высот верхней ионосферы "пузыри" добираются с некоторой задержкой. Поэтому интервал их регистрации намеренно выбирался в пределах 20–04 LT.

Кривая P_{EPB} строилась вдоль географической долготы с шагом 15°. Стандартные отклонения P_{EPB} ($\Delta = (P_{EPB}(1-P_{EPB})/N)^{1/2}$, где N – число пролетов в интервале 15°) показаны на рис. 1 вертикальными отрезками.

При сравнительном анализе было обнаружено отчетливое подобие профилей (рис. 1). Они совпадали не только по долготному положению экстремумов, но и по форме вариаций. (Сложные "размазанные" минимумы на

долготах $30-50^\circ$, $200-230^\circ$. Максимум на долготе $\sim 350^\circ$, один склон которого пологий, а другой обрывистый.) Коэффициент корреляции сравниваемых профилей оказался довольно высоким ($R \approx 0.76$).

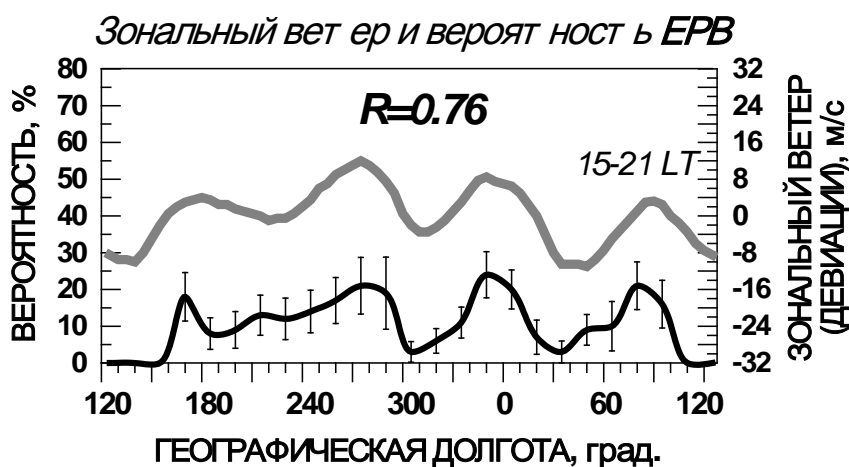


Рис. 1. Долготный профиль девиаций скорости зонального термосферного ветра (СНАМР, ~ 400 км) и долготное распределение ЕРВ (P_{EPB}) (ISS-b, ~ 1100 км). Ветровые вариации, рассчитанные за интервал (15–21 LT), показаны серой кривой, а вариации P_{EPB} — темной кривой. Коэффициент корреляции равен $R \approx 0.76$.

Заметим, что при предварительном анализе с ветровым профилем, полученным непосредственно в период захода солнца (18–21 LT) (здесь не приведен), т. е. в период генерации ЕРВ, был выявлен менее значительный коэффициент корреляции ($R \approx 0.55$). Почему?

Наблюдаемый рост корреляции в случае использования ветрового профиля, усредненного по расширенному интервалу наблюдений (15–21 LT), не случаен. Дело в том, что для развития механизмов генерации ЕРВ требуется наличие "подготовленных" ионосферных условий. Условия же будут "подготовлены" тогда, когда под влиянием западных зональных ветров в достаточной степени разовьются столкновительно-сдвиговая и ветровая неустойчивости, которые приведут к массовому появлению "затравочных" возмущений. Те, в свою очередь, после захода солнца, т. е. с развитием прединверсионного всплеска $E \times B$ дрейфа, начнут эволюционировать и оформляться в плазменные "пузыри" (ЕРВ). Иными словами, для подготовки ионосферных условий с развитыми "затравочными" возмущениями требуется время — подготовительный период (15–18 LT). Поэтому более верным, наиболее репрезентативным оказался интервал (15–21 LT), охватывающий как время подготовки, так и непосредственно сам период генерации ЕРВ. Как результат, степень корреляции сравниваемых профилей существенно возросла ($R \approx 0.76$).

Итак, следует заключить, что (1) выявлено детальное подобие долготного распределения ЕРВ, характерного для высот верхней ионосферы (~ 1100 км, ISS-b), и долготного профиля девиаций скорости термосферного зонального ветра (~ 400 км, СНАМР). При этом выявлена высокая степень их кор-

реляции ($R \approx 0.76$). (2) Получено новое подтверждение теоретических указаний [4] о ключевом влиянии зональных западных термосферных ветров на процесс генерации ЕРВ.

Литература

1. Häusler K., Lühr H., Rentz S., Köhler W. A statistical analysis of longitudinal dependence of upper thermospheric zonal winds at dip equator latitudes derived from CHAMP // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. N 12. P. 1419–1430. doi:10.1016/j.jastp.2007.04.004. 2007.
2. Hysell D.L., Kudeki E. Collisional shear instability in the equatorial F-region ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 109. N A11301. 2004.
3. Kudeki E., Bhattacharyya S. Postsunset vortex in equatorial F-region plasma drifts and implications for bottomside spread-F // *J. Geophys. Res.* V. 104. N 12. P. 28163–28170. 1999.
4. Kudeki E., Akgiray A., Milla M.A., Chau J.L., Hysell D.L. Equatorial spread-F initiation: post-sunset vortex, thermospheric winds, gravity waves // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. N 17–18. P. 2416–2427. 2007.
5. Liu H., Lühr H., Watanabe S., Köhler W., Henize V., Visser P. Zonal winds in the equatorial upper thermosphere: Decomposing the solar flux, geomagnetic activity, and seasonal dependencies // *J. Geophys. Res.* V. 111. N A07307. doi: 10.1029/2005JA011415. 2006.
6. Liu H., Yamamoto M., Lühr H. Wave-4 pattern of the equatorial mass density anomaly: A thermospheric signature of tropical deep convection // *J. Geophys. Res. Lett.* V. 36. N L18104. doi: 10.1029/2009GL039865. 2009.
7. RRL. Summary Plots of Ionospheric Parameters obtained from Ionosphere Sounding Satellite-b. Tokyo: Radio Research Laboratories Ministry of Posts and Telecommunications. V. 1–4. 1983, 1985.
8. Sidorova L.N., Filippov S.V. Topside ionosphere He^+ density depletions: seasonal/longitudinal occurrence probability // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 86. P. 83–91. doi: 10.1016/j.jastp.2012.06.013. 2012.
9. Sidorova L.N., Filippov S.V. Plasma bubbles in the topside ionosphere: estimations of the survival possibilities // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 119. P. 35–41. doi: 10.1016/j.jastp.2014.06.013. 2014.
10. Sidorova L.N., Filippov S.V. Four-peak longitudinal distribution of the equatorial plasma bubbles observed in the topside ionosphere: Possible troposphere tide influence // *Adv. Space Res.* V. 61. N 6. P. 1412–1424. doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.035. 2018.
11. Woodman R.F., La Hoz C. Radar observations of F-region equatorial irregularities // *J. Geophys. Res.* V. 81. P. 5447–5466. 1976.

ЛЕДЯНЫЕ СПУТНИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И ЭКЗОПЛАНЕТЫ: ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ЖИЗНИ

Симаков М.Б.

Институт цитологии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
exobio@incras.ru

ICY SATELLITES OF GIANT PLANETS AND EXOPLANETS: POSSIBILITIES FOR LIFE

Simakov M.B.

Institute of Cytology RAS, St.Petersburg, Russia

The most recent models of the icy satellites interior lead to the conclusion that a substantial liquid layer exists today under relatively thin ice cover inside. The putative internal water ocean provides some exobiological niches on these bodies. We can see all conditions needed for origin and evolution of biosphere — liquid water, complex organic chemistry and energy sources for support of biological processes — are on the moons.

Одним из основных вопросов современного естествознания является проблема возникновения жизни на Земле и других планетах. Главными критериями существования биосферы с точки зрения экзобиологии являются: 1) наличие на космическом объекте жидкой воды в течение длительного геологического периода времени; 2) наличие большого количества разнообразных органических соединений; 3) наличие источников энергии, необходимых для поддержания биохимических процессов, в том числе, в виде химической энергии.

Успешное изучение внешних областей системы при помощи космических аппаратов показало, что существует класс крупных космических объектов, которые содержат в своем составе большие объемы жидкой воды, которые могут предоставлять жизненное пространство для внеземных организмов.

По данным миссии «Галилео» [1] построены численные модели химического состава и внутреннего строения спутников Юпитера. Европа и Ганимед прошли через стадию полной дифференциации с образованием водно-ледяных внешних оболочек, силикатной мантии и металлического ядра. Каллисто — частично дифференцированный спутник, обладающий ледяной корой мощностью 270–300 км и мантией, состоящей из гомогенной смеси льда и железокремниевой компоненты.

Европа имеет очень молодую, по геологическим меркам, поверхность, одну из самых ровных в Солнечной системе. Стоит отметить разнообразие следов тектонической и криовулканической активности, включая гейзеры. Внутри ледяного слоя льда могут существовать линзы жидкой воды [2]. Именно там надо искать возможные биомаркеры.

Температура внутреннего океана зависит от радиоактивных изотопов силикатного ядра спутников, которые дают на дне дополнительный источник тепла и теплые потоки могут достигать ледяного панциря и воздействовать на него. Результаты такого воздействия можно увидеть на поверхности спутников, например, в так называемых районах Хаоса.

Компоненты, необходимые для поддержания окислительно-восстановительного баланса возможной биосферы, могут синтезироваться в нескольких районах: гидротермальные системы на дне глобального внутреннего океана, реакции «холодной серпентинизации» на границе силикатная мантия/океан, радиолитические окислители, получающиеся на поверхности под воздействием солнечной радиации и заряженных частиц из магнитосферы. Радиолиз поверхностного льда расщепляет воду на её составляющие — кислород и водород, которые частично адсорбируются поверхностью, а частично покидают её, образуя атмосферу. Кроме того, на самой поверхности обнаружено большое количество перекиси водорода и ионов сульфата. В частности, поверхность спутника содержит сульфат магния в форме эпсомита ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Ключевым моментом становится скорость (или сама возможность) доставки этих окислителей с поверхности спутника внутрь его океана. До 4×10^9 моль окислителей в год может пополнять состав океанической воды [3].

Титан, спутник Сатурна, является, с точки зрения астробиологии, одним из наиболее интересных объектов Солнечной системы [4]. Условия на спутнике удовлетворяют всем необходимым критериям существования биосферы.

Среди источников энергии можно выделить такие, как: 1) радиогенное тепло ядра; 2) приливная энергия; 3) удары метеоритов; 4) солнечная энергия атмосферной фотохимии; 5) молнии в атмосфере; 6) космические лучи; 7) электроны магнитосферы Сатурна; 8) химический потенциал окислительно-восстановительных реакций.

Предложены несколько возможных ниш для существования биологических сообществ [4]: 1) сам слой жидкой воды, где температура и давление вполне соответствуют необходимым параметрам и который может содержать разнообразные органические и неорганические составляющие; 2) нижняя поверхность льда, имеющая большую площадь; 3) поры, каналы различных размеров и пакеты жидкой воды в нижнем слое ледяной коры; 4) места криовулканической активности на поверхности спутника, где внутренний водный слой может реагировать с продуктами сложной атмосферной фотохимии; 5) разветвленная сеть пещер и других образований, которая может быть связана как с криогенным вулканизмом, так и с воздействием приливных сил; 6) трещины в ледяном слое; 7) кратеры, оставшиеся после падения метеоритов, в которых могут образовываться значительные массивы жидкой воды на достаточно продолжительное время; 8) места гидротермальной активности на дне океана.

Основное отличие Титана от спутников системы Юпитера — наличие плотной атмосферы, толщиной более 400 км, давление которой у поверхности в полтора раза превышает эту величину для Земли. Большинство ученых рассматривает её как модель первичной восстановительной атмосферы Земли. Вся атмосферная химия Титана построена на радикальных реакциях под действием ультрафиолета и потоков заряженных частиц. Цепь фотохимических превращений азота и метана приводит в итоге к образованию сложных углеводородов, предельных и непредельных, нитрилов и изонитрилов. Возможны реакции в атмосфере спутника, которые приводят к синтезу биологически значимых органических соединений, в том числе, аминокислот и оснований нуклеиновых кислот.

Один из основных процессов, требующих внимания — это взаимодействие воды с органическими соединениями, синтезировавшимися в богатой атмосфере Титана. Фотохимические процессы могут приводить к выпадению на поверхность спутника до 25 см твердых органических компонентов каждые 20 млн лет. Часть органических молекул может сформироваться как во время пролета астероида в атмосфере, так и в момент его удара о поверхность, которая сама покрыта слоем сложной органики. В итоге, получается водный раствор, содержащий сложную органику, синтезированную в атмосфере, как неполярную (углеводороды), так и полярную (нитрилы).

Второй заметный кандидат в системе Сатурна на обладание подледным океаном это Энцелад. Анализ данных, полученных зондом «Кассини» позволил предположить существование внутреннего жидкого океана, толщиной более 10 км, покрытого относительно тонкой (30–40 км) ледяной корой [5]. По данным масс-спектрометра INMS, установленного на борту «Кассини», вещество гейзеров состоит из воды (93%); азота (4%); углекислого газа (3.2%); метана (1.6%) и следовых количеств аммиака, ацетилена и синильной кислоты. Обнаружение солей натрия и калия говорит о химическом сходстве океана Энцелада с земными морями. Следы гидротермальных процессов на дне океана Энцелада были обнаружены в виде присутствия в водяных выбросах наночастиц кремния (SiO_2). Размер и состав этих частиц говорит о наличии гидротермальных реакций, идущих при достаточно высоких температурах ($>90^\circ\text{C}$) [6].

Модель внутреннего строения еще одного спутника Сатурна, Дионы, так же говорит в пользу существования внутреннего океана толщиной до 90 км, покрытого толстой ледяной корой (100 км). Возможность существования внутренних океанов или в прошлом, или в настоящее время была озвучена и для других спутников Сатурна, Реи и Япета.

Потенциально обитаемые миры можно обнаружить и во внешних областях Солнечной системы, за орбитой Сатурна. Система Урана содержит несколько таких объектов: ледяные спутники Ариэль, Оберон, Титания и Умбриэль. Спутник Нептуна, Тритон, представляет собой еще одно тело, на котором обнаружена активность гейзеров. В составе поверхностных льдов было зафиксировано наличие аммиака — важного антифриза, необходимого

для поддержания внутреннего океана в жидком состоянии. По расчетам [7], глубина подледного океана Тритона может достигать 190 км.

Другие карликовые планеты внешней области, такие как Плутон, Харон, Эрис, Седна, так же попадают в категорию потенциально обитаемых миров из-за возможности существования глубинного океана. Гравитационные взаимодействия в системе Плутон–Харон могут поддерживать наличие океана внутри обоих тел. Хотя, по некоторым расчетам, для существования незамерзающего океана достаточно и одного радиогенного тепла ядра планеты. На поверхности Плутона отмечены и следы криовулканизма.

Даже некоторые тела из пояса астероидов могут иметь подледные внутренние океаны. В качестве примера можно рассмотреть Цереру. При диаметре около 950 км Церера является крупнейшим и наиболее массивным телом в поясе астероидов. Сферическая форма карликовой планеты, её плотность говорят о том, что она имеет в своем составе от 17 до 30% водного льда по массе, и её недра дифференцированы. Лёд обнаружен и на поверхности планетоида, наряду с множеством гидратированных, глинистых минералов и карбонатов. Зафиксированы и следы сложной органики. Яркие пятна на снимках теневой стороны оказались замерзшими озерами на дне кратеров, образованных в результате падения метеоритов.

Как мы видим, большое число объектов Солнечной системы, расположенных за пределами классической зоны обитания, могут быть потенциально обитаемы. Внутренние океаны ледяных спутников планет–гигантов могут быть широко распространены во внесолнечных планетарных системах, и существование таких возможных экосистем значительно расширяет зону обитаемости в любой планетарной системе.

Литература

1. Sohl, F., Spohn, T., Breuer, D., Nagel, K. Implications from Galileo observations on the interior structure and chemistry of the Galilean satellites Icarus, v. 157, p. 104-119. 2002.
2. Kalousová, K., Souček, O., Tobie, G., Choblet, G. Water generation and transport below Europa's strike-slip faults // J. Geophys. Res.: Planets. V. 121. P. 2444-2462. 2016.
3. Greenberg, R. Transport rates of radiolytic substances into Europa's ocean: implications for the potential origin and maintenance of life // Astrobiology. V. 10. P. 275-83. 2010.
4. Simakov, M.B. Possible biogeochemical cycles on Titan. In: Seckbach, J. (Ed.) Origins: Genesis, Evolution and Diversity of Life. Kluwer. P. 645–665. 2004.
5. Iess, L., Stevenson, D.J., Parisi, M. et al. The gravity field and interior structure of Enceladus // Science. V. 344. P. 78-80. 2014.
6. Hsu, H.-W., Postberg, F., Sekine, Y., et al. Ongoing hydrothermal activities within Enceladus // Nature. V. 519, P. 207-210. 2015.
7. Hussmann, H., Sohl, F., Spohn, T. Subsurface oceans and deep interiors of medium-sized outer planet satellites and large trans-neptunian objects // Icarus. V. 185 P. 258-273. 2006.

АСТРОКАТАЛИЗ. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ И ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ У СОЛНЦА И СОЛНЕПОДОБНЫХ ЗВЕЗД

Снытников В.Н.

ИК СО РАН, г. Новосибирск, Россия

snyt@catalysis.ru

ASTROCATALYSIS. FORMATION OF DISCS AND PLANET SYSTEMS NEAR THE SUN TYPE STARS

Snytnikov V.N.

BIC, Novosibirsk, Russia

Astrocatalysis, as a complex of chemical reactions on inorganic matter of the composition of cosmic abundance of elements, plays a key role in the preplanetary stage of the origin of life near the Sun and sun-like stars. The initial syntheses for the habitation zone and for the zone of high temperatures in the disk, which can give rise to various forms of life on the bodies of the solar system, are considered.

Жизнь на Земле имеет свое начало в плотном молекулярном облаке с химическими синтезами первых сложных молекул. Эти молекулы излучили тепло и охладили облако. Оно потеряло устойчивость, и развился гравитационный коллапс. В газопылевой среде образовались протозвезды с околозвездными дисками. Околзвездный диск представлял собой на десятки миллионов лет космический «химический реактор» или даже «химический завод». Его продукцией явилась планетная система, относительно стабильная на миллиардах лет.

Большинство современных исследователей придерживаются гипотезы Опарина-Холдейна о возникновении жизни. По этой гипотезе, на какой-то из планет земного типа в зоне обитаемости образовалась твердая поверхность, а сама планета захватила достаточное количество воды. Далее, при должном воздействии со стороны молодой звезды произошло благоприятное образование биомолекул на поверхности планеты. Это привело к появлению исходных форм жизни. Другая гипотеза, «панспермия», изначально предполагала вечность жизни и перенос ее между планетными системами. Вечность Вселенной опровергнута современным естествознанием.

Альтернативная гипотеза, выдвинутая Вернадским практически одновременно с Опариним, оказалась удивительно мало понятой на протяжении последующих многих десятилетий вплоть до настоящего времени. Она следовала из «геологической вечности жизни на Земле» как указание найти в космосе и воспроизвести в экспериментах «особые условия» для возникновения жизни [1]. По гипотезе «астрокатализа» [2], такие особые условия возникали в допланетном диске в «космическом реакторе» на стадии формирования первичных тел. Эти тела представляли собой рыхлые пористые комки

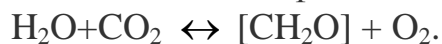
из неорганических частиц с каталитическими свойствами. Частицы связывались между собой посредством синтезированного органического вещества, включая полимеры. Комки достигали размеров от одного до десятка метров. Из этих комков сложились многокилометровые планетозимали и зародыши планет. Химический синтез сложных органических соединений, имевший место на этом этапе, непосредственно влиял на появление метровых тел. В терминологии химических технологий, в диске действовал проточный химический реактор с вращающимся кипящим слоем катализатора из нанодисперсных частиц исходного молекулярного облака. Примитивная жизнь возникла в органическом веществе в коллективе из перемешивающегося множества небольших, часто сталкивающихся между собой тел в диске около Солнца. Далее формы жизни в составе своих биоценозов эволюционировали в соответствии с изменяющимися условиями, в которые они попадали. Ключевой факт, подтверждающий гипотезу «астрокатализа» в отличие от всех других гипотез, состоит в наличии в метеоритах класса углистых хондритов остатков развитых бактериальных сообществ [3]. Возраст метеоритов и этих сообществ совпадает с возрастом Солнечной системы. Главная особенность такого «химического реактора» состоит в участии в катализе значительной доли всей массы Fe, Mg, Si, O, C, N, S и других элементов, которая пошла на формирование Солнца вместе с планетами. Это определяет космический масштаб отбора и использования катализатора при синтезах предбиологических соединений. На современных радио- и других телескопах начаты исследования околозвездных дисков.

Из гипотезы «астрокатализа» следует возможность найти биоценозы в других местах Солнечной системы, помимо тех, что есть на Земле. Так, несмотря на практически доказанное отсутствие жизни на поверхности Марса, у него не исключена глубинная биосфера. А. Спирин [4] и Р. Хувер [5] предположили внутри комет существование биоценозов, которые переходят к метаболизму при приближении к Солнцу и возвращаются в анабиоз с удалением от Солнца. Можно также указать на идею К. Сагана про атмосферную жизнь на Юпитере и подледную на Энцеладе. Особая роль отведена Венере, в исследованиях которой в начале 80-х годов станциями ВЕНЕРА с помощью телеметрии были обнаружены объекты, морфологически схожие с живыми формами на Земле [6].

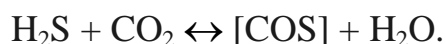
Жизнь на Земле оптимизировала свои геномы и формы по всей совокупности биохимических и геохимических реакций к имеющимся условиям в земной географической оболочке, пройдя за несколько миллиардов лет длинный путь эволюции. Есть несколько предположений относительно условий, в которых возникла жизнь на Земле. Но эти условия могли на каком-то из отрезков времени существовать и в околосолнечном диске.

Одно из этих предположений связано с «железосерным миром» подводных вулканов «черных курильщиков» Г. Вахтерхойзера [7]. Это жидкая вода с относительно низкими температурами растворенных и взвешенных реагентов. Идея «цинкового мира» предложена А. Мулкиджаняном [8]. В ее основе

лежат фотокаталитические процессы с использованием ZnS или близких по свойствам сульфидов металлов. Для этих процессов необходимо УФ излучение с длинами волн короче 500 нм. В работах Р.Саладино [9] предбиологические соединения синтезировались через формамид HCONH₂ с низкими выходами при умеренных температурах. Сам формамид получается из аммиака NH₃ и СО в присутствии катализатора. Конечным этапом этой или другой цепочки реакций является формирование для современной земной биосферы базового синтеза органических соединений [CH₂O] из воды и СО₂ согласно реакции, проходящей в сложном фотокаталитическом процессе,



Кроме этих синтезов умеренных температур в зоне обитания около солнцеподобных звезд, возможна и другая, в диапазоне 300 - 550°С высокотемпературная активация СО₂, которая может привести к принципиально иной физико-химической основе жизни. Так, интересны химические процессы главного компонента атмосфер Венеры СО₂ и соединений серы на твердой фазе состава космической распространенности элементов. В диске базовым процессом, аналогом земного фотосинтеза [CH₂O], может явиться синтез органических соединений на FeS. Для них карбонил сульфид [COS] служит промежуточным продуктом на катализаторе или в виде COS десорбируется в газовую фазу диска согласно реакции:



Атомы водорода на поверхности катализатора сульфида железа могут восстановить СО₂ с синтезом, например, метилсульфида (метилмеркаптана) с активной SH-тиольной группой:



Синтез метилсульфида CH₃SH с участием железа является одним из древнейших способов фиксации СО₂, особенно эффективным в средах с низким содержанием воды. Кроме того, частицы с составом Fe– SiO₂–Al₂O₃–MgO–CaO–K₂O с восстановленным железом представляет собой по составу типичный катализатор синтеза аммиака из азота и водорода. На катализаторе происходит активированная адсорбция азота на Fe-активных центрах с образованием нитридов железа Fe_xN. Далее водород взаимодействует с нитридами железа с образованием промежуточных комплексов Fe_xNH и Fe_xNH₂. При избытке водорода можно ожидать активацию азота на восстановленном Fe, а далее образование комплекса Fe_xNH с его участием в дальнейших синтезах органических соединений и полимеров.

Все указанные выше и другие соединения, органические [COS] и [CH₂O], тиоловые [CH₃SH], соединения азота [NH], иницируют на каталитической поверхности частиц цепочки всех дальнейших синтезов веществ. Среди всей возможной массы органических и предбиологических соединений остаются вещества, устойчивые в присутствии восстановительной среды из водорода и гелия, включая многие известные биополимеры.

Исходя из основных физико-химических процессов в диске при формировании планет и при дальнейшей геологической эволюции, можно выделить несколько основных этапов появления жизни около Солнца. Из них сегодня можно указать «Холодную предысторию жизни», «Допланетный хемоценоз», «Мир РНК», «Допланетную биосферу», «Деструктивную биосферу», «Планету бактерий» [10]. Многие из этапов все еще недостаточно понятны. Некоторые из них кажутся маловероятными. Однако последние исследования в этой широко междисциплинарной области приближает понимание сложных условий возникновения жизни.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН "Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей" (координатор Зеленый Л.М., 2018 г.).

Литература

1. Вернадский В.И. «Живое вещество и биосфера», Стр. 277. – М.:Наука, 1994.
2. Snytnikov V.N. Astrocatalysis - Abiogenic Synthesis and Chemical Evolution at Pregeological Stages of the Earth's Formation // *Paleontological Journal*. V. 44. N 7. P. 761-777. 2010.
3. Герасименко Л.М., Жегалло Е.А., Жмур С.И., Розанов А.Ю., Хувер Р. Бактериальная палеонтология и исследования углистых хондритов // *Палеонтологический журнал*. №4. С.103-125. 1999.
4. Спиринов А. С. Когда, где и в каких условиях мог возникнуть и эволюционировать мир РНК? // *Палеонтологический журнал* № 5. С. 11–19. 2007.
5. Hoover R.B. Comets, Carbonaceous Meteorites, and The Origin of the Biosphere, in *Biosphere Origin and Evolution*, Ed. by N. Dobretsov, N. Kolchanov, A. Rozanov, and G. Zavarzin, (Springer Sci. + Business Media, New York), pp. 55–68. (2008).
6. Ksanfomality L.V., Selivanov A.S., Gektin Yu. Hypothetical Flora and Fauna on the Planet Venus Found by Revision of the TV Experiment Data (1975–1982) // *American Journal of Modern Physics*. 7(1). P. 34-47. 2018.
7. Wächtershäuser G. From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya // *Phil. Trans. R. Soc. B* 361, P. 1787–1808. 2006.
8. Mulkidjanian A.Y. On the origin of life in the Zinc world: 1. Photosynthesizing, porous edifices built of hydrothermally precipitated zinc sulfide as cradles of life on Earth. *BIOLOGY DIRECT* 4: 26. P.1-39. 2009.
9. Saladino R., Crestini C., Pino S., Costanzo G., Di Mauro E. Formamide and the origin of life // *Phys Life Rev.*; 9(1). P.84-104. 2012.
10. Снытников В.Н. Предбиологические синтезы органического вещества и возникновение жизни в протопланетных дисках. / *Жизнь и Вселенная*. Под ред. Обридко В.Н. и Рагульской М.В., М. С. 212-222. 2017

FLARE ENERGY RELEASE IN MAGNETIC FLUX ROPE COMPRESSED BY THE CONVERGENT SUNSPOTS

Solov'ev^{1,2} A.A., Kirichek¹ E.A.

¹GAORAN, Saint-Petersburg, Russia

²Kalmyk State University, Elista, Russia

solov@gaoran.ru

In paper [1] a new mechanism of solar flares caused by the convergence of two magnetic centers (sunspots) was suggested. According to [1], the strong X-class flare does not occur at the moment of closest approach of spots, but arises at the stage of their divergence. The authors obtained a number of empirical regularities typical for this mechanism. We propose the theoretical MHD model of the accumulation of free magnetic energy in the flux rope compressed between two approaching sunspots. This energy is released later as a power flare at the stage of their divergence.

1. Scenario of the flare event development

Proceeding from the mechanism of solar flare described in [1], the following scenario of the flare-up process can be proposed:

1-st stage is the approach of magnetic centers (spots) of different polarity. The spots, like two bulldozers moving towards each other, rake and strongly compress the magnetic flux between the spots, and thus ensure the accumulation of that magnetic energy, which will be released later in the form of power flare.

2-nd stage: between the approaching sunspots, above the neutral line of the magnetic field, a current structure (a magnetic flux rope) is formed due to of magnetic reconnections. This rope acquires due to compression a large reserve of free magnetic energy (associated with electric currents). A clear indication on the arising of current structure is the appearance of a bright interspot radio source in the region between the spots one day before the flare. This radio source is formed by the energetic particles accelerated in numerous small-scale current sheets that arise during the formation of a magnetic flux rope. At the moment of maximum convergence of the spots, the physical conditions in the magnetic filament which is sandwiched between the spots (and is kept from the eruption by their external magnetic field) are already close to the threshold of excitation of plasma instabilities, but this threshold has not yet been reached, because the flux rope is yet immersed into deep and dense layers of chromosphere.

3-rd stage: the process of divergence of moving sunspots begins. The external field connecting the spots and playing a critical role in ensuring the equilibrium of the configuration weakens. This changes the equilibrium of this twisted magnetic flux tube with strong electric currents. It starts to move upwards, and a region with very low plasma density (i.e., with the low density of charge carriers) begins to form into the flux rope, so that the current velocity of the electrons becomes comparable with the thermal velocity of the ions, and this acts as a trigger for exciting of plasma instabilities (Bernstein modes, ion sound etc.). These plasma instabili-

ties give rise to an avalanche of quasi-particles (plasmons), which effectively scatter the ordered flow of electrons carrying the electric charge along the flux rope axis. This scattering lowers very quickly and sharply (by many orders of magnitude) the conductivity of the plasma in the rope. The anomalous resistance heats the plasma, a strong electric field produced by "the gap of the current channel" leads to acceleration of the particles and the appearance of runaway electrons, i.e., in fact, to the development of the flare process [2, 3]. It must be noted that the formation of the flare configuration occurs slowly (its characteristic time, days, exceeds considerably the relaxation time of the system to equilibrium, which is not more than a few minutes), so that the whole process which leads up to flare event should be regarded as a quasi-static evolution, when the system passes successively through the continuous sequence of equilibrium states.

Our task here is to propose a magnetohydrostatic model that describes the equilibrium of a non-potential magnetic filament which is compressed by an external transverse field, has a large reserve of free magnetic energy and has an extremely inhomogeneous distribution of the plasma density in its cross section. It is important that this inhomogeneous plasma distribution would be parametrically sensitive with respect to small variations in the strength of the external magnetic field and the height of filament axis above the photosphere. Then we can get the main effect of the model: by the decreasing of the external field, which confines the filament, and/or a small increase in the height of the filament above the photosphere (by these two effects we simulate the process of spots divergence), the unevenness of the distribution of the plasma density in the filament increases! In this case the resultant plasma density in the rope, which is composed of the background hydrostatic value and some additive to it, due to the action of the magnetic force, takes a critically small value in some part of the flux rope volume (in fact, it tends to zero according to the equilibrium conditions). When the degree of rarefaction of charge carriers in a magnetic flux rope with a given value of electric current passes the threshold of excitation of plasma instabilities, the flare energy release will be started into it during a fraction of a second.

2. Formulation and solution of the magnetohydrostatic problem

Consider a straight long filament lying horizontally in a plane vertically stratified atmosphere. The invariance under arbitrary displacements along one of the coordinates (directed along the filament axis) is assumed. Suppose that in the Cartesian coordinates x, y, z this is the y axis, so, $\partial/\partial y = 0$, and the z axis is directed vertically upwards from the surface of the photosphere. Gravity is expressed as $\mathbf{F}_g = -\rho g(z)\mathbf{e}_z$. The system of equations of magnetic hydrostatics that ensure the equilibrium of such a magnetic configuration has the form:

$$-\nabla P + (4\pi)^{-1} [\text{curl}\mathbf{B} \times \mathbf{B}] - \rho g(z)\mathbf{e}_z = 0, \quad \text{div}\mathbf{B} = 0, \quad P = \rho \mathcal{R} T \mu^{-1}. \quad (1-3)$$

Due to translational symmetry, the system (1) - (3) is reduced to:

$$\Delta A = -\frac{1}{2} \frac{dB_y^2(A)}{dA} - 4\pi \frac{dP(A, z)}{dA}, \quad \rho(A, z)g(z) = -\frac{\partial P(A, z)}{\partial z}, \quad T(x, z) = \frac{\mu P(x, z)}{\Re \rho(x, z)} \quad (4-6)$$

Here, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ is Laplace operator, $A(x, z) = \int_0^x B_z dx$ is a flux of vertical magnetic field. The geometric shape of the magnetic field lines in x, z plane is given by $A(x, z) = \text{const}$. The poloidal field components are expressed by the derivatives: $B_z = \frac{\partial A}{\partial x}$, $B_x = -\frac{\partial A}{\partial z}$, and the longitudinal field $B_y(A)$ depends only on $A(x, z)$. Using this formalism we can find the pressure, density and temperature for any given magnetic structure of the filament. We assume, that

$$A(x, z) = B_0 \frac{z - z_0}{1 + k^2(z - z_0)^2 + k^2 x^2} - b_x \cdot (z - z_0), \quad (7)$$

where B_0 is the scale of the magnetic field strength, k is the reciprocal spatial scale, z_0 is a constant that regulates the height of filament above the photosphere (level $z=0$), b_x is a small positive constant specifying the intensity of the horizontal magnetic field external to the filament, which is held it from eruption by the transverse tension (see Fig. 1). We take: $B_y^2(A) = b_y^2 \equiv \text{const}$. After substituting this expressions into the Laplace operator, the equation (4) takes the form $\frac{2k^2 [A + b_x(z - z_0)]^3}{\pi B_0^2 (z - z_0)^2} = \frac{dP(A, z)}{dA}$. This equation is easily integrated with respect to the variable A for fixed z (as the integration constant we use the external pressure $P_{ex}(z)$ given by known model of solar atmosphere): We get:

$$k^2 [A^4 + 4A^3 b_x (z - z_0) + 6A^2 b_x^2 (z - z_0)^2 + 4b_x^3 A (z - z_0)^3] [2\pi B_0^2 (z - z_0)^2]^{-1} + P_{ex}(z) = P(A, z). \quad (8)$$

The density distribution is:

$$\rho(A, z) = \rho_{ex}(z) + \frac{k^2}{\pi g B_0^2} \left[\frac{A^4}{(z - z_0)^3} + \frac{2A^3 b_x}{(z - z_0)^2} - 2Ab_x^3 \right]. \quad (9)$$

Returning to the variables (x, z) , we get the convenient formulas for calculation the equilibrium values of pressure and density.

$$P(x, z) = P_{ex}(z) + \frac{B_0^2}{8\pi} 4k^2 (z - z_0)^2 \left[F^4 + \frac{b_x}{B_0} F^3 + \left(\frac{b_x}{B_0} \right)^2 F^2 + \left(\frac{b_x}{B_0} \right)^3 F \right], \quad (10)$$

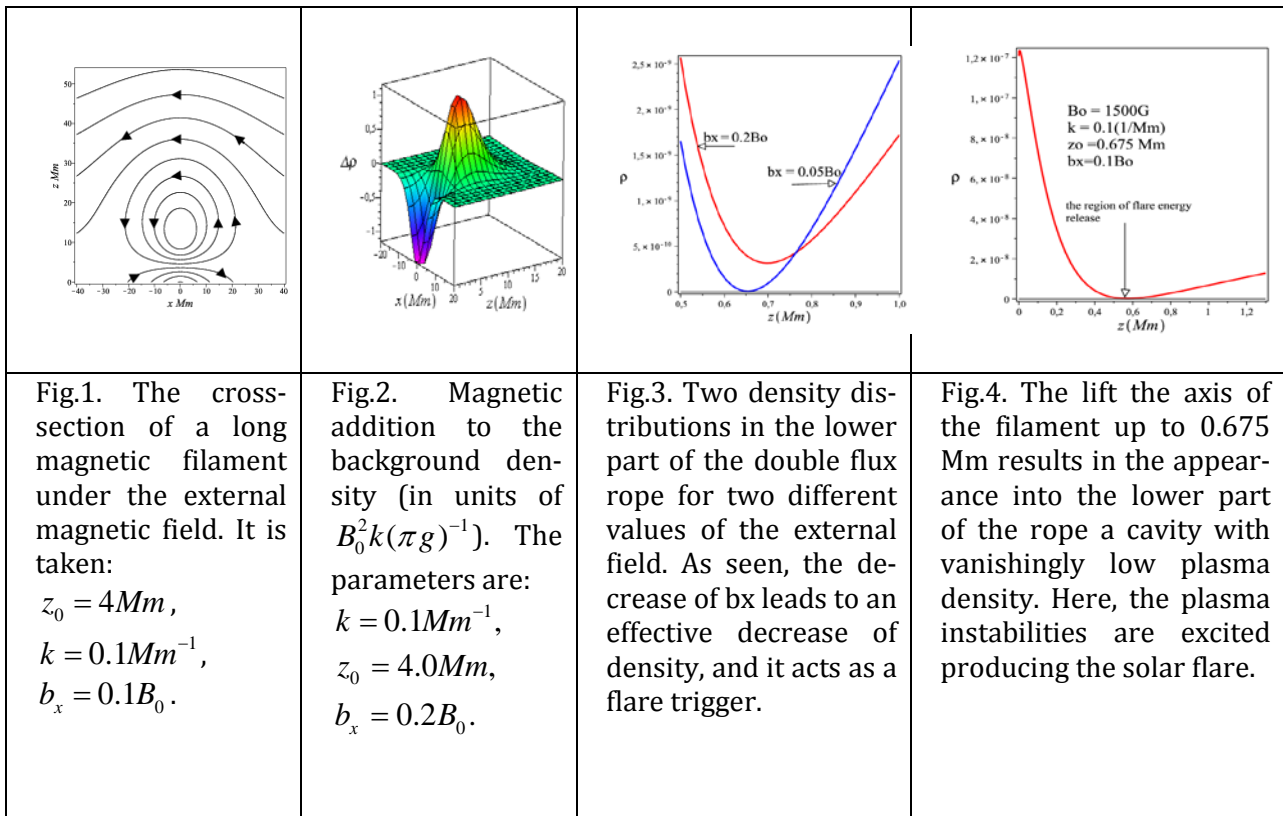
$$\rho(x, z) = \rho_{ex}(z) + \frac{B_0^2}{8\pi g} 8k^2 (z - z_0) \left[F^4 + 2 \frac{b_x}{B_0} F^3 - 2 \left(\frac{b_x}{B_0} \right)^3 F \right]. \quad (11)$$

Here is denoted: $F(x, z) \equiv AB_0^{-1} (z - z_0)^{-1} = (1 + k^2(z - z_0)^2 + k^2 x^2)^{-1} - b_x B_0^{-1}$.

The lengths are measured in Mm, the inverse scales – in 1/(Mm). The plasma density in this model rapidly decreases with distance from the axis, both in the vertical and in the transverse direction. At the level $z = z_0$, the gas density in the filament is equal to the density of the external medium. Above this level, the addition to the background density is positive, and lower it is negative, i.e., above this level, a dense part of the filament is formed in the co-

rona, and below, in the chromosphere, there is a rarefied part, due to which a flare-up process is possible in this area. Fig.2 shows the surface shape of the "magnetic addition" (the second term on the RHS of (11)) to the plasma density in the rope.

We simulate the divergence of sunspots by two effects: (1) weakening of the external magnetic field b_x and (2) lifting of the magnetic rope, released from the tension of the external field, into the upper, rarefied layers of solar atmosphere with very small external density. These effects are demonstrated in Figs. 3 and 4.



Thus, a model of magnetic flux rope clamped between two approaching magnetic centers (sunspots) is proposed, according to which the convergence of spots provides for the accumulation of free magnetic energy into the flux filament. This energy is released later as a flare, when the sunspots begin to diverge.

The work is supported by Russian Scientific Foundation (project № 15-12-2001).

References

1. Korsos M.B. et al. *Astrophys. Journal Letters* (2015).Vol. 805: L21(6pp)
2. Solov'ev A.A., Murawski K. *Astrophys. and Space Science.* (2014).Vol. 350. 11-19.
3. Solov'ev, A. A., Kirichek E.A. *Astronomy Letters*, (2015) vol.41, no.5, pp. 211-224.

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Сорокин В.М., Яценко А.К.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

sova@izmiran.ru

MECHANISM FOR GENERATION OF SHORT PERIOD GEOMAGNETIC PULSATION BY X-RAYS OF THE SOLAR FLARE

Sorokin V.M., Yaschenko A.K.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The generation of geomagnetic field short period oscillation (1-100 s) caused by ionosphere conductivity perturbation by impulse of the solar flare X-ray is considered. Variation of ionospheric conductivity is accompanied with perturbation of electric current which is the source of magnetic field oscillation in the Earth – ionosphere cavity. Dependence of magnetic field oscillations on the characteristic of solar flare radiation and ionosphere conductivity is analyzed.

Один из механизмов генерации геомагнитных пульсаций связан с локальным изменением ионосферной проводимости в присутствии внешнего электрического поля. Такой механизм рассмотрен в работах [1, 2] применительно к проблемам генерации пульсаций $Pi2$, а также искусственных колебаний геомагнитной силовой линии. В этих работах рассматривались процессы с характерными периодами $T > 10$ с. Для таких периодов можно пренебречь полем магнитозвуковой волны по сравнению с полем направляемой волны (см., например, [3]). С уменьшением периода роль магнитозвуковой волны в формировании геомагнитных пульсаций возрастает. Ниже рассмотрена генерация короткопериодных колебаний геомагнитного поля при возмущении проводимости в результате излучения магнитозвуковой волны [4, 5].

В результате излучения магнитозвуковой волны при крупномасштабном в горизонтальном направлении возмущении проводимости нижней области ионосферы в присутствии внешнего электрического поля возможна генерация колебаний геомагнитного поля в диапазоне периодов единицы-десятки секунд. Амплитудно-временные характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы. В зависимости от соотношения между интегральными проводимостями Холла и Педерсена возмущенной ионосферы может наблюдаться осциллирующий и апериодический режимы магнитных возмущений. Для сильных возмущений проводимости ионосферы амплитуда пульсаций может достигать $\sim 10^2$ нТл. Будем полагать, что плоский поток ионизирующего излучения солнечной вспышки падает на сферическую ионосферу в экваториальной плоскости поля \mathbf{B}_0 маг-

нитного диполя Земли. Ионосферное электрическое поле \mathbf{E}_0 направлено параллельно земной поверхности. Изменение проводимости ионосферы в данном случае приведет к возмущению ионосферных токов и, соответственно, к генерации возмущения магнитного \mathbf{b} и электрического \mathbf{e} полей. В проводящей ионосфере возмущение электрического поля \mathbf{e} удовлетворяет уравнению:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{e} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \hat{\sigma}(\mathbf{r}, t)(\mathbf{e} + \mathbf{E}_0) = 0, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}(\mathbf{r}, t)$ - тензор возмущенной проводимости ионосферной плазмы.

Выше ионосферы в магнитосферной плазме возмущение электрического поля удовлетворяет уравнению

$$(\nabla \times \nabla \times \mathbf{e})_{\perp} + \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \mathbf{e}_{\perp}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

где u - скорость Альвена в магнитосфере. В вакуумном слое Земля - ионосфера поле \mathbf{e} определяется из уравнения Лапласа

$$\Delta \mathbf{e} = 0 \quad (3)$$

На поверхности идеально проводящей Земли касательная компонента возмущения электрического поля обращается в нуль. Горизонтальный масштаб области проводимости, возмущенной солнечной вспышкой, составляет величину порядка земного радиуса, а вертикальный масштаб - порядка толщины ионосферы. Поэтому в уравнениях можно пренебречь горизонтальными производными. Это соответствует тому, что за характерный период изменения поля ионосферные токи и поля диффундируют в горизонтальном направлении на расстояние много меньше горизонтального масштаба. Введем декартову систему координат с осью z , направленной вертикально вверх, и осями x и y , направленными, соответственно, по меридиану и широте. Интегрируя уравнения (1) по толщине ионосферы, получим граничные условия на ионосфере для касательных компонент возмущения электрического поля:

$$\left\{ \frac{\partial e_y}{\partial z} \right\} - \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} [\Sigma_P e_y - \Phi \Sigma_H e_x] = \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} [\Sigma_P E_{0y} - \Phi \Sigma_H E_{0x}]$$

$$\left\{ \frac{\partial e_x}{\partial z} \right\} - \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} [\Phi^2 \Sigma_P e_x + \Phi \Sigma_H e_y] = \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} [\Phi^2 \Sigma_P E_{0x} + \Phi \Sigma_H E_{0y}] \quad (4)$$

где обозначено: $\Phi(\theta) = \sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta} / (2 \sin \theta)$, θ - широта точки наблюдения, Σ_P и Σ_H - интегральные проводимости Холла и Педерсена ионосферы. В этих выражениях фигурными скобками обозначен скачок соответствующей величины при переходе через тонкую ионосферу. Совместим тонкую ионосферу с плоскостью $z = 0$. Идеально проводящая поверхность Земли совпадает с плоскостью $z = -z_1$. Из уравнения (2) решение в виде распространяющейся вверх волны определяется выражениями

$$e_x = f_x \left(t - |\Phi| \frac{z}{u} \right); \quad e_y = f_y \left(t - \frac{z}{u} \right) \quad (5)$$

В слое $-z_1 < z < 0$ из уравнения (3) имеем решение:

$$e_x = f_x(t) \left(1 + \frac{z}{z_1} \right); \quad e_y = f_y(t) \left(1 + \frac{z}{z_1} \right). \quad (6)$$

Компоненты возмущения магнитного поля на поверхности Земли определяются из уравнений Максвелла и выражений (6) при $z = -z_1$:

$$f_x = -z_1 \frac{db_y}{dt}, \quad f_y = z_1 \frac{db_x}{dt} \quad (7)$$

Подставляя решения (5) и (6) в граничные условия (4) и используя (7), получим уравнения для вектора $\mathbf{b} = (b_x, b_y)$:

$$\frac{d\mathbf{b}}{dt} + \hat{\Omega} \mathbf{b} = \mathbf{F}; \quad \hat{\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega_1 & -\Omega_3 \\ \Omega_3 & \Omega_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

В уравнении (8) введены обозначения:

$$\Omega_{1,2,3} = \frac{1}{\mu_0 z_1 \Sigma_{1,2,3}}; \quad F_x = \frac{E_0}{z_1} \left(\frac{A}{\Sigma_1} - \frac{B}{\Sigma_3} \right); \quad F_y = \frac{E_0}{z_1} \left(\frac{A}{\Sigma_3} + \frac{B}{\Sigma_2} \right)$$

где обозначено:

$$\Sigma_0 = \sqrt{\Sigma_{ea} \Sigma_{em} + \Phi^2 \Sigma_H^2}; \quad \Sigma_1 = \Sigma_0^2 / \Sigma_{ea}; \quad \Sigma_2 = \Sigma_0^2 / \Sigma_{em}; \quad \Sigma_3 = \Sigma_0^2 / \Phi \Sigma_H$$

$$A = \Phi \Sigma_{H1} \cos \alpha - \Sigma_{P1} \sin \alpha; \quad B = \Phi \left(\Phi \Sigma_{P1}^1 \cos \alpha + \Sigma_{H1} \sin \alpha \right)$$

$$\Sigma_{ea} = \Phi^2 \Sigma_P(t) + |\Phi| / \mu_0 u; \quad \Sigma_{em} = \Sigma_P(t) + 1 / \mu_0 u; \quad \operatorname{tg} \alpha = E_y^0 / E_x^0$$

$\Sigma_{H1, P1}$ - возмущения интегральных проводимостей Холла и Педерсена.

Решение системы (8) позволяет определить возмущение магнитного поля в результате нестационарного изменения проводимости ионосферы солнечной вспышкой. Уравнения представляют собой неоднородную систему двух дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от времени. Решение этой системы, полученное численными методами, для временной зависимости интенсивности моноэнергетического импульса ионизирующего излучения солнечной вспышки, выбранного в виде дельта-функции, приведено на Рис. 1. Для расчета выбраны следующие значения параметров: $E_{x0} = 1 \text{ мВ} / \text{м}$; $E_{y0} = 0$; $\Sigma_{P0} = \Sigma_{H0} = 10 \text{ См} / \text{м}$. Плотность потока энергии $0.05 \text{ Дж} / \text{м}^2$.

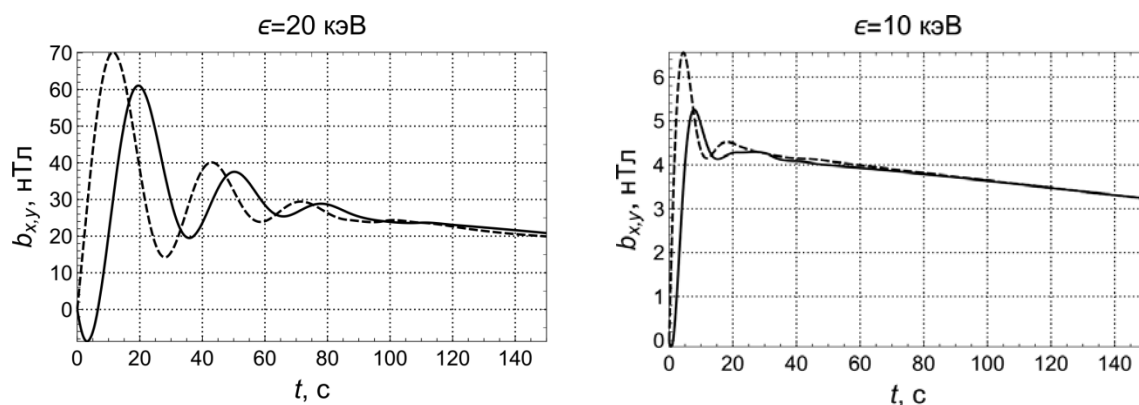


Рис. 1. Временные зависимости амплитуды возмущения геомагнитного поля на поверхности Земли. Сплошной линией и пунктиром отображены компоненты магнитного возмущения вдоль и поперек геомагнитного меридиана. Расчет проведен для широты $\theta = 45^\circ$ и двух значений энергии кванта ионизирующего излучения: 20 и 10 кэВ.

Таким образом, крупномасштабные в горизонтальном направлении возмущения интегральных проводимостей ионосферы с временной зависимостью в виде функции включения приводят к затухающим колебаниям геомагнитного поля на поверхности Земли с периодами в десятки секунд. Период пульсации убывает с увеличением широты. Затухание минимально в средних широтах. Можно заключить, что флуктуация ионизирующего потока с коротким фронтом во время солнечной вспышки сопровождается осциллирующими геомагнитными пульсациями, формирующимися в слое Земля - ионосфера.

Литература

1. Bell T.F. ULF wave generation through particle precipitation induced by VLF transmitters // *Journal of Geophysical Research*. V. 81. P. 3316. 1976.
2. Ляцкий В.Б. Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. Л.: Наука. 1978. 198 С.
3. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 325 С.
4. Сорокин В.М., Яценко А.К. Генерация короткопериодных колебаний геомагнитного поля в результате крупномасштабных возмущений проводимости ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 30. № 3. С. 425–428. 1990.
5. Гутоп Ю.В., Сорокин В.М., Яценко А.К. Генерация геомагнитных пульсаций в системе Земля-ионосфера при импульсном воздействии на нее солнечных вспышек // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 33. № 4. С. 79–85. 1993.

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ИМПУЛЬСЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Сорокин В.М., Яценко А.К.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

sova@izmiran.ru

LONG-PERIOD GEOMAGNETIC FIELD OSCILLATIONS CAUSED BY IMPULSE OF IONIZING RADIATION OF THE SOLAR FLARES

Sorokin V.M., Yaschenko A.K.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

The model for long-period (100–1000 s) geomagnetic field oscillations observed on the Earth surface during solar flares is considered. Impulse of ionizing radiation of solar flare is caused by perturbation of the ionospheric conductivity. The variation of conductivity leads to perturbation of the ionosphere electric current, heating release and acoustic gravity waves generation. Interaction of these waves with the ionosphere is caused by generation of geomagnetic field oscillation. Calculation of magnetic field perturbation has been derived. The result of calculation is agreed with observation data.

Ионизирующее излучение солнечных вспышек, поглощаясь в атмосфере Земли на разных высотах, может генерировать электромагнитные возмущения в широком диапазоне периодов. Обсуждаются различные механизмы генерации. Геомагнитные вариации с периодами 10-100 с связаны с возбуждением магнитосферного резонатора и резонаторными свойствами слоя Земля–ионосфера. Одним из механизмов возникновения вариаций геомагнитного поля с периодами 100-1000 с, который вносит вклад в их формирование, связан с распространением в ионосфере акустико-гравитационных волн [1]. Их источником является импульсный нагрев нижней ионосферы в результате возмущения ионосферного электрического тока под действием ионизирующего излучения солнечной вспышки. В работе проведен расчет временной зависимости возмущения геомагнитного поля на основе этого механизма.

На Рис.1 приведен пример наблюдения геомагнитного возмущения во время вспышки класса X2.2, которая произошла 10.06.2014 г. Начало вспышки было зарегистрировано в 11:36, максимум – в 11:42, конец – в 11:44. Длительность вспышки составила 8 минут. Планетарный Кр-индекс был равен 2. График потока рентгеновского излучения от вспышки приведен на левом верхнем рисунке. Верхний график – это поток в интервале энергией 2.48–12.4 КэВ или 0.1–0.8 нм, а нижний график – это поток в интервале 4.96–62.0 КэВ или 0.05–0.4 нм. На правом верхнем рисунке приведена запись возмущения геомагнитного поля, полученная на расстоянии 400 км от подсол-

нечной точки, с вертикальной шкалой от -5 до 20 нТл. После первого всплеска наблюдаются колебания с периодом порядка 400 с.

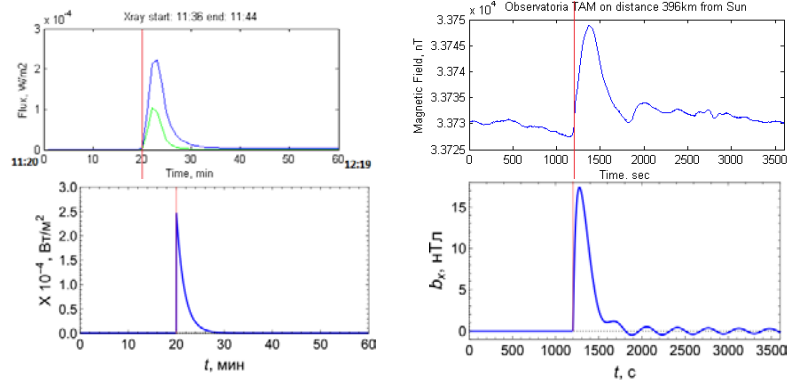


Рис.1. Результаты наблюдения потока рентгеновского излучения солнечной вспышки и возмущения магнитного поля (верхние панели); результаты расчета возмущения магнитного поля при заданном потоке рентгеновского излучения (нижние панели).

Введем декартову систему координат с осью z , направленной вертикально вверх, а осями (x, y) - вдоль меридиана к экватору и на восток, соответственно. Вектор геомагнитного поля \mathbf{B}_0 расположен в плоскости (x, z) под углом α к оси z . Вектор геоэлектрического поля \mathbf{E}_0 расположен в горизонтальной плоскости (x, y) . Примем горизонтально-однородное приближение, справедливое вследствие больших горизонтальных масштабов возмущений ионосферы, генерируемых солнечными вспышками. В этом приближении проводимости Холла σ_H и Педерсена σ_P зависят от высоты. В рассматриваемом диапазоне периодов можно пренебречь током смещения. Возмущение геомагнитного поля \mathbf{b} определяется из уравнения Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{b} = \mu_0 (\hat{\sigma}_1 \mathbf{E}_0 + \hat{\sigma}_0 \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0), \quad (1)$$

где \mathbf{v} - скорость ионосферной плазмы в акустико-гравитационной волне, μ_0 - магнитная постоянная, $\hat{\sigma}_0$ - невозмущенная проводимость ионосферы, а $\hat{\sigma}_1$ - ее возмущение ионизирующим излучением солнечной вспышки. Интегрируя компоненты равенства (1) по z с граничным условием $\mathbf{b}(\infty) = 0$, получим выражения для компонент возмущения геомагнитного поля на поверхности Земли:

$$b_{xg}(t) = \mu_0 \left(\frac{\Sigma_{H1}(t)}{\cos \alpha} E_{0x} - \Sigma_{P1}(t) E_{0y} \right) - \mu_0 B_0 \sin \alpha \int_0^{\infty} \sigma_P(z, t) v(z, t) dz$$

$$b_{yg}(t) = \mu_0 \left(\frac{\Sigma_{P1}(t)}{\cos^2 \alpha} E_{0x} + \frac{\Sigma_{H1}(t)}{\cos \alpha} E_{0y} \right) + \mu_0 B_0 \tan \alpha \int_0^{\infty} \sigma_H(z, t) v(z, t) dz \quad (2)$$

В равенствах (2) обозначено $v(z, t)$ - вертикальная компонента скорости газа в АГВ, распространяющейся в ионосфере, и введено обозначение возмущения интегральной проводимости ионосферы $\Sigma_{P,H1}(t)$:

$$\Sigma_{P,H1}(t) = \int_0^{\infty} \sigma_{P,H1}(z, t) dz \quad (3)$$

В модели изотермической атмосферы и двухкомпонентной ионосферной плазмы возмущение проводимости ионосферы пропорционально концентрации электронов:

$$\sigma_{P,H1}(z, t) = \sigma_{P,H0}(z) \frac{n_{e1}(z, t)}{n_{e0}(z)}, \quad (4)$$

Возмущение электронной концентрация в нижней ионосфере определяется из уравнения:

$$\frac{\partial n_{e1}(z, t)}{\partial t} = q(z, t) - \beta(z) n_{e1}(z, t) [n_{e1}(z, t) + 2n_{e0}(z, t)], \quad (5)$$

где $q(z, t)$ - возмущение скорости образования ионов, вызванное ионизирующим излучением солнечной вспышки, $\alpha(z)$ - скорость электрон-ионной рекомбинации, $n_{e0}(z)$ - невозмущенное высотное распределение электронной концентрации.

Пространственно-временное распределение вертикальной компоненты скорости $v_z \equiv v$, генерируемой нестационарным возмущением проводимости ионосферы $\hat{\sigma}_1(z, t)$, $\hat{\sigma}(z, t) = \hat{\sigma}_0(z) + \hat{\sigma}_1(z, t)$ и распространяющейся вдоль оси z , получим из линеаризованной системы уравнений движения, непрерывности и энергетического баланса. В изотермическом приближении атмосферы без вязкости для скорости v в волне получим:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{1}{H} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = r(z, t); \quad r(z, t) = \frac{(\gamma - 1)}{a^2 \rho_0(z)} \frac{\partial Q_1}{\partial z}; \quad (6)$$

$$Q_1 = (\hat{\sigma}_1 \mathbf{E}_0 + \hat{\sigma} \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0) \cdot \mathbf{E}_0$$

В этой системе уравнений H - высота однородной атмосферы, $a = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0}$ - скорость звука, $\gamma = 1.4$ - показатель адиабаты, $\rho_0(z)$ - фоновое значения плотности воздуха, \mathbf{E}_0 - ионосферное электрическое поле, Q_1 - количество выделенного тепла, вызванное возмущением проводимости ионосферы $\hat{\sigma}_1(z, t)$ (см. Lu et al., 1995; Vasyliūnas, 2005):

$$Q_1 = \sigma_{P1} [E_{x0}^2 / \cos^2 \alpha + E_{y0}^2].$$

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$v(z,t) = \exp\left(\frac{z}{2H}\right) \int_0^t dt' \int_{-\infty}^{\infty} dz' G(z-z', t-t') r(z', t');$$

$$G(z,t) = -a J_0 \left[\omega_a \sqrt{t^2 - (z/a)^2} \right] \eta(t - |z|/a); \quad , \quad (7)$$

$$r(z,t) = \frac{1-\gamma}{a \rho_0(0)} \exp\left(\frac{z}{2H}\right) \left(\frac{E_{x0}^2}{\cos^2 \alpha} + E_{y0}^2 \right) \frac{\partial \sigma_{p1}(z,t)}{\partial z}$$

где $\omega_a = a/2H$, $\gamma = 1.4$, $\rho_0(0)$ - плотность воздуха на нижней границе ионосферы, $J_0(x)$ - функция Бесселя, $\eta(x)$ - функция Хэвисайда.

Ниже приведены результаты расчета по формуле (2) возмущения геомагнитного поля. Для этого проведен расчет временной зависимости интегральной проводимости (3) подстановкой (4) и решения уравнения (5). Далее в (2) подставляем (3) и решение уравнения (7). Результаты расчета приведены на Рис.1. Для расчета выбраны следующие значения параметров: зависимость потока энергии излучения от времени в виде $W(t) = W_0 \exp(-t/t_0)$, $W_0 = 2.5 \times 10^{-4} \text{ Bm/m}^2$, $t_0 = 100 \text{ c}$, энергия кванта излучения вспышки $\varepsilon = 5 \text{ кэВ}$, высоты максимумов слоев проводимости Холла и Педерсена ионосферы $z_H = 100 \text{ км}$, $z_P = 140 \text{ км}$, невозмущенные интегральные проводимости: $\Sigma_{P0} = \Sigma_{H0} = 15 \text{ См/м}$, значения компонент фонового электрического поля $E_{x0} = E_{y0} = 7 \text{ мВ/м}$, угол наклона геомагнитного поля 45° . Расчеты показали, что вслед за первым всплеском наблюдаются колебания магнитного поля с периодом порядка 400 с.

Литература

1. Метелкин, Е.В., Сорокин, В.М., Федорович, Г.В., 1982. О природе колебаний геомагнитного поля, генерируемых солнечными вспышками. Геомагнетизм И Аэрономия 22, 803–808.
2. Lu, G., Richmond, A.D., Emery, B.A., Roble, R.G., 1995. Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling: Effect of neutral winds on energy transfer and field-aligned current. J. Geophys. Res. 100, 19643. doi:10.1029/95JA00766.
3. Vasyliūnas, V.M., 2005. Meaning of ionospheric Joule heating. J. Geophys. Res. 110. doi:10.1029/2004JA010615.

ДНК И ДРУГИЕ БИОПОЛИМЕРЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Текуцкая Е.Е.

*ФГБОУ ВО КубГУ, г. Краснодар, Россия
tekytska@mail.ru*

DNA AND OTHER BIOPOLYMERS UNDER THE INFLUENCE OF PHYSICAL FACTORS

Tekutskaya E.E.

Kuban State University, Krasnodar, Russia

The effect of an electromagnetic field in the frequency range 5-50 Hz on the fluorescence characteristics of aqueous solutions of DNA and HAS was studied by the classical fluorescence spectroscopy method, and the possible denaturation and conformational transitions occurred. It was suggested that the observed effects are associated with the formation of active oxygen species in water.

Вода в биологических объектах представляет собой сложную систему, содержащую растворенные в ней атмосферные газы, ионы и другие компоненты, среди которых важная роль принадлежит активным формам кислорода. Значительная часть (60–80%) повреждений ДНК, вызванных радиацией, формируется за счет активных форм кислорода (АФК), образующихся при радиолизе воды [1]. Известно, что АФК в биологических системах являются как повреждающими, так и сигнальными агентами. Вероятно, именно вода является первичной мишенью, а АФК – первичными медиаторами при воздействии на живые организмы различных физических факторов. Именно изменение уровня этих соединений в атмосфере определяют обнаруженную Чижевским корреляцию между солнечной активностью и биологической активностью живых организмов на Земле [2].

Особый интерес при исследовании влияния электромагнитного поля (ЭМП) при частотах, близких к геомагнитному полю, на живые системы привлекают биополимеры на основе нуклеиновых кислот. Низкочастотное ЭМП используется для изменения скорости ряда важных биохимических процессов: репарации отдельных участков ДНК с выделенными соматическими мутациями; генерации активных форм кислорода нейтрофилами. Известными проявлениями стресс-реакции в клетках являются повреждения биологически значимых молекул и, прежде всего, ДНК [3-5].

Сывороточный альбумин человека (HAS), помимо поддержания осмотического давления крови и белкового резерва организма, выполняют важную функцию, осуществляя транспорт эндогенных и экзогенных субстанций. В основе транспортной функции альбумина лежит способность к обра-

тимому связыванию лигандов различной химической структуры, а также лекарственные вещества и их метаболиты.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния низкоинтенсивного электромагнитного поля в диапазоне частот 5-50 Гц и СВЧ-излучения на флуоресцентные характеристики водных растворов ДНК и HSA методом классической флуоресцентной спектроскопии и выявление происходящих при этом возможных денатурационных и конформационных переходов природных биополимеров.

Объектом исследований были водные растворы ДНК и HSA. ДНК из собранных образцов крови у добровольцев, выделяли с помощью реактивов наборов АмплиСенс – «ДНК–сорб–В» (Москва) сорбционным способом. Флуоресцентные исследования проводились на спектрофлуориметре Hitachi F-2700 при температуре, равной 22 °С. Триптофановая флуоресценция водных растворов HSA регистрировалась в диапазоне 270 – 500 нм при возбуждении светом с длиной волны $\lambda_{возб} = 295$ нм, а растворов ДНК в диапазоне 220 - 900 нм и длине волны возбуждения $\lambda_{возб} = 320$ нм. Обработку водных растворов ДНК и HSA ЭМП проводили в стерильной пластиковой посуде при толщине облученного слоя 2 мм. В ходе экспериментов использовалось разработанное нами устройство для автоматизированного исследования биологических жидкостей в переменном магнитном поле, описанное в статье [6]. Время обработки составляло 10 мин. Напряженность магнитной составляющей поля достигала 24 ± 4 А/м, частота изменялась с шагом 2 Гц от 5 до 30 Гц.

Наблюдаемый на спектрах флуоресценции растворов ДНК первый пик связан с наличием в составе молекул ДНК хромофоров, поглощающих УФ-излучение, - сопряженные π -связи азотистых оснований [5]. При возбуждении водного раствора ДНК излучением с длиной волны 320 нм, наблюдали появление, кроме этой полосы флуоресценции, дополнительной полосы с длиной волны 640 нм, что свидетельствовало об образовании в растворе синглетного кислорода, который при переходе в основное триплетное состояние испускает фотоны света в данном диапазоне. Это согласуется с мнением, изложенным в работах [3-4], в которых указывается, что одной из причин изменения хемилюминесценции водных растворов ДНК при действии на них ЭМП НЧ может быть образование активных форм кислорода в водном растворе.

Исследование спектральных характеристик собственной флуоресценции HSA после обработки ЭМП в широком диапазоне рН, в том числе и при физиологическом значении 7,4, выше изоэлектрической точки альбумина (рI = 4,7) показало, что при воздействии ЭМП происходит дестабилизация третичной и вторичной структур белка и разрыхление глобулы, поскольку молекула альбумина лабильна и чувствительна даже к слабым влияниям. Значительно изменяются параметры одного из основных центров связывания альбумина – центра I по G.Sudlow, который связывает варфарин, иодипамид, фенилбутазон, азапропазон, билирубин.

С помощью флуоресцентной спектроскопии нами было определено количество однонитевых разрывов (ОР) ДНК в лимфоцитах периферической крови человека при воздействии СВЧ-излучением. Было показано, что с увеличением частоты СВЧ-излучения количество ОР ДНК в лимфоцитах также увеличивается по сравнению с контрольными образцами: при воздействии на них частотой 3 ГГц на $32,3 \pm 0,9\%$, частотой 50 ГГц на $40,1 \pm 1,1\%$, частотой 70 ГГц на $49,8 \pm 0,7\%$ [6].

Колебания электромагнитных полей, если даже амплитуда их колебаний невелика, а так как реакции с участием АФК — это, по существу, реакции, в которых происходит перенос неспаренных электронов, и которые протекают в электронно-возбуждённой среде, оказывают существенное воздействие на водную среду [7]. Несмотря на то, что порог ионизации ДНК составляет несколько десятков эВ, разрыв нитей может эффективно идти и ниже порога ионизации, а сам механизм, с помощью которого низкоэнергетическая частица порождает такие разрывы, включает в себя короткоживущие промежуточные состояния, связанные с образованием в водной среде гидроксид-радикалов. Энергия излучения составляла 2-3 эВ, следовательно, ионизация воды под действием такого излучения невозможна. Однако, этой энергии достаточно для перехода кислорода из триплетного в синглетное состояние (≈ 1 эВ). Синглетный кислород восстанавливается до супероксид-анион радикала, протонированная форма которого дисмутирует с образованием наиболее долгоживущей АФК — перекиси водорода. Скорость этих реакций в природных условиях коррелирует с солнечной активностью.

Согласно Брускову В.И. [8], цикл образования АФК запускается кавитацией — схлопыванием микропузырьков, образованием синглетного кислорода ($O_2\uparrow$), и заканчивается также выделением синглетного кислорода. В пользу существования кавитации воздушных пузырьков под действием света свидетельствуют процессы активации молекул N_2 , растворенного в воде, приводящие к образованию NO. Циклический механизм реакции, вероятно, и определяет квазипериодичность реакции образования H_2O_2 в водных системах. Запуск процесса окисления воды приводит к циклическому автокаталитическому процессу образования-распада перекиси водорода. Однако выход синглетного кислорода заключительной реакции меньше 100%, поэтому процесс постепенно должен затухать, если он не использует тепло и энергию, которая поддерживает кавитацию. В связи с тем, что при смене дня и ночи температура всех водоемов периодически изменяется эти реакции можно рассматривать как один из базовых процессов, определяющих уровень АФК в среде обитания.

При воздействии солнечного света на воду образуется перекись водорода в концентрациях от 40 до 130 нМ за 2 час светового воздействия при естественном солнечном освещении в зависимости от погодных условий. При этом кинетика образования H_2O_2 в воде под воздействием солнечного света имеет нелинейный характер. В течение первых 2-3 часов происходит быстрое накопление перекиси водорода в воде, в последующие часы уровень

увеличения концентрации H_2O_2 замедляется, приближаясь к насыщению. Наблюдается суточный ритм реакции синтеза H_2O_2 в воде [7-8].

Таким образом, наблюдаемые изменения конформации природных биополимеров на основе нуклеиновых кислот и триптофансодержащих белков при слабых воздействиях (тепла, видимого света, низкочастотного ЭМП), а также живых организмов на их основе, связаны с изменением уровней АФК в окружающей среде, что является одним из важнейших каналов связи живых организмов с активностью Солнца. Живые организмы неотделимы от внешней среды и фактически являются его неотъемлемой, и, более того, управляемой составной частью [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ р_а № 16-42-230187

Литература

1. Gaziev A.I. DNA damage in cells exposed to ionizing radiation // Radiacionnaja biologija. Radiojekoologija. V. 39. № 6. P.630–638. 1999.
2. Чижевский А.Л. Земля в объятиях Солнца. М7, ЭКСМО. 2004
3. Tekutskaya E.E., Barichev M. G. Study of influence of the low-frequency electromagnetic field on DNA molecules in water / В сб. XIII Odessa Int. ast. Gamow's Conf.: ASTROPHYSICS, COSMOLOGY AND GRAVITATION, COSMOMICROPHYSICS, RADIOASTRONOMY AND ASTROBIOLOGY. Editor-in-Chief S.M. Andrievsky. С. 303-306. 2013
4. Tekutskaya E. E., Barishev M. G., Pchenko G. P. The Effect of a Low Frequency Electromagnetic Field on DNA Molecules in Aqueous Solutions // Biophysics. V. 60. №6. P. 913–916. 2015
5. Текуцкая Е.Е., Василяди Р.В. Структурные повреждения ДНК лимфоцитов периферической крови человека при воздействии физических факторов // Экология человека. № 12. С. 9-14. 2017.
6. Ильченко Г.П., Барышев М.Г., Текуцкая Е.Е., Шелистов В.С., Никитин А.В. Устройство для поиска оптимальных параметров обработки биологических объектов переменным магнитным полем // Измерительная техника. 2017, № 6. С. 69-72.
7. Текуцкая Е.Е., Барышев М.Г., Ильченко Генерация активных форм кислорода под влиянием СВЧ-излучения и их генотоксическое действие // Авиакосмическая и экологическая медицина. Т.52. №1. С. 56-61. 2018.
8. Брусков В.И., Масалимов Ж.К., Черников А.В. Образование активных форм кислорода под действием тепла при восстановлении растворенного кислорода воздуха // Докл. РАН. Т.381. № 2. С.1-4. 2001.

ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ В НУЛЕВОЙ ТОЧКЕ НАД ЛИМБОМ СОЛНЦА

Филиппов Б.П.

*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
bphilip@izmiran.ru*

CORONAL LOOP RECONNECTION AT THE CORONAL NULL POINT ABOVE THE SOLAR LIMB

Filippov B.P.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

Observations of the coronal loop dynamics near a saddle-like structure in the corona above the western limb of the Sun on 18 July 2017 are analysed. The structure was clearly outlined by coronal loops with typical coronal temperature no more than 1 MK. Coronal loops converged toward the center of the saddle in the vertical (radial) direction and diverged in the horizontal direction. Velocities of their movement are in the range of 2 – 6 km/s. Potential magnetic field calculations, which use as the boundary condition the SDO/HMI magnetogram taken on July 14, confirmed the presence of the null point at the height of about 120" above the photosphere just at the centre of the saddle structure. The event is a clear example of smooth coronal magnetic field reconnection. No heating manifestations in the reconnection region or magnetically connected areas were observed.

Нулевые точки магнитного поля в солнечной атмосфере привлекают большое внимание исследователей в связи с проблемами топологии полей на Солнце и быстрого внезапного энерговыделения вследствие перезамыкания силовых линий [1]. Структура трехмерного магнитного поля вблизи нулевой точки похожа на две кисточки, прижатые с двух сторон к плоской поверхности (рис. 1). Отдельные силовые линии имеют форму гипербол, кроме тех линий, что расположены в плоскости F , разделяющей два семейства линий. Одна из простейших и, по-видимому, самых распространенных ситуаций – появление нулевой точки над вкраплением паразитной полярности внутри униполярной области. Магнитное поле в солнечной короне пока практически недоступно измерению, во всяком случае, картографированию, поэтому обнаружить нулевые точки можно только благодаря характерной структуре окружающего поля, обрисовываемого корональными петлями. Действительно, иногда наблюдаются области, весьма наглядно демонстрирующие седловую структуру, весьма похожую на ту, что должна существовать в окрестностях нулевой точки [2-4]. В некоторых случаях удается проследить за динамикой корональных петель вблизи нулевой точки, и обнаружить признаки пересоединения. В основном такие примеры наблюдаются в эруптивных событиях [5-7]. В данной работе анализируется динамика корональных петель вблизи устойчивой долгоживущей корональной нулевой точки, отчетливо демонст-

рирующая медленное пересоединение петель без признаков дополнительного нагрева.

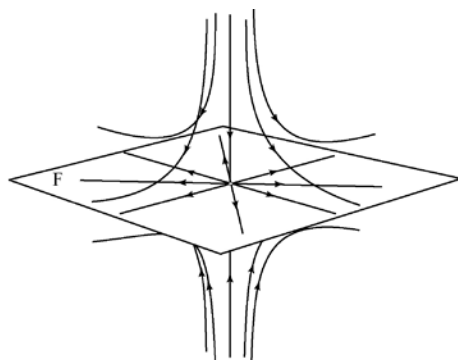


Рис. 1. Структура трехмерного магнитного поля вблизи нулевой точки.

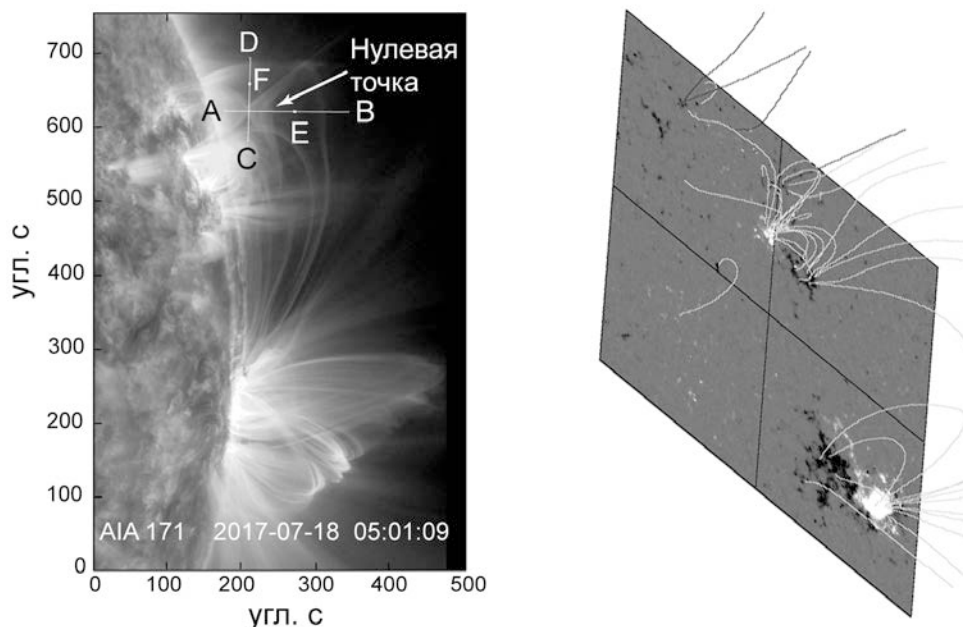


Рис. 2. Вид корональных петель над активной областью NOAA 2666 (слева) и силовые линии потенциального магнитного поля над участком фотосферной магнитограммы за 14 июля 2017 г.

На рис. 2 слева показан вид корональных петель над активной областью NOAA 2666 18 июля 2017 г. в 05 UT, а справа – силовые линии потенциального магнитного поля над участком фотосферной магнитограммы за 14 июля, когда область находилась на некотором удалении от лимба. Седловую структуру в окрестностях нулевой точки можно было различить в течение нескольких дней, но отчетливей всего она стала видна, когда область вышла на лимб. Расчеты потенциального поля по данным магнитографа SDO/HMI подтверждают наличие нулевой точки на высоте около 120", что хорошо соответствует центру седловой структуры (рис. 2).

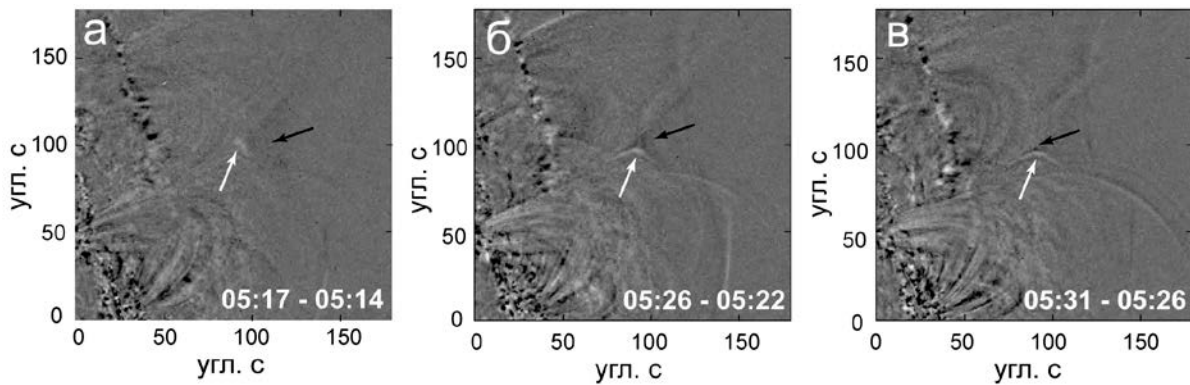


Рис. 3. Разностные изображения SDO/AIA 171 Å, демонстрирующие перемещения корональных петель при пересоединении.

В интервале между 4 UT и 6 UT корональные петли демонстрируют динамику, хорошо соответствующую ожидаемой при двумерном магнитном пересоединении [1]. Петли приближаются к центру седловой структуры сверху и снизу и расходятся от центра в горизонтальном направлении. Эту динамику иллюстрируют разностные изображения (рис. 3), где более раннему положению трубок соответствуют темные структуры (помеченные черными стрелками), а более позднему – светлые структуры (помеченные белыми стрелками). Петля с кривизной, направленной вверх, что нетипично для корональных петель, подходит к нулевой точке сверху и исчезает. В этот момент появляется вертикальная петля, перемещающаяся от нулевой точки. Еще нагляднее движение петель у нулевой точки видно на диаграммах расстояние-время (рис. 4). Каждая из них показывает изменения яркости короны вдоль щелей, обозначенных на рис. 2. Диаграммы в нижнем ряду имеют лучшее временное и пространственное разрешение при меньшем контрасте изображений.

Вдоль вертикальных отрезков АВ и АЕ петли движутся к нулевой точке с обеих сторон со скоростями 4–5 км/с. Вдоль горизонтальных отрезков CD и CF петли расходятся от нулевой точки со скоростями 2,5–5,5 км/с. Эти петли соответствуют пересоединившимся силовым трубкам. Скорость вытекания плазмы из области пересоединения довольно низкая по сравнению с результатами работ [5-7]. Однако в отличие от событий, исследованных в этих работах, данная структура не связана с эруптивными явлениями. Вероятно, это пример медленного, спокойного пересоединения. Следует отметить, что седловая структура отчетливо проявлялась на изображениях в относительно холодном канале SDO/AIA 171 Å (~ 1 МК) и практически не различалась в более горячих корональных линиях. Также не зарегистрировано каких-либо следов нагрева во время пересоединения.

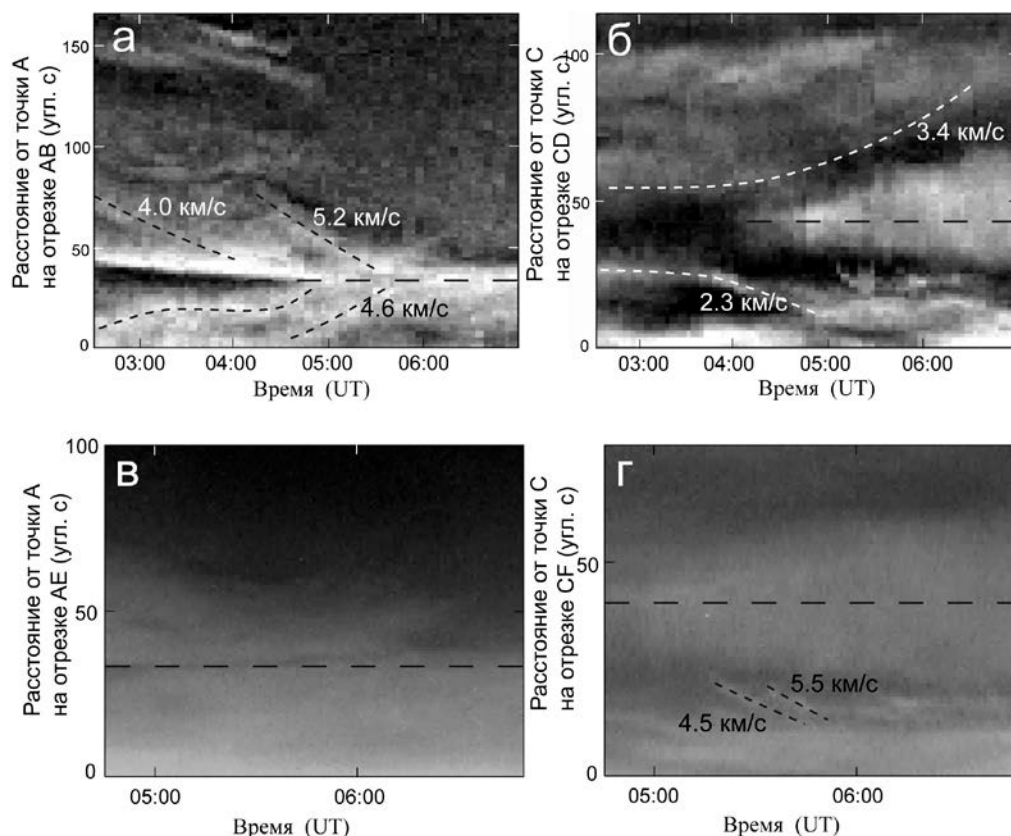


Рис. 4. Диаграммы расстояние-время, демонстрирующие перемещения корональных петель при пересоединении. Белые и черные штриховые линии подчеркивают перемещение петель. Горизонтальная штриховая линия показывает положение нулевой точки.

Наблюдаемая картина похожа на двумерное пересоединение, хотя нулевая точка – "трехмерная", то есть в ноль обращаются все три компонента поля, и нет какого-то выделенного направления. Трехмерное пересоединение – более сложное, однако в анализируемом примере ввиду локальных условий оказались выделенными те петли, которые обозначают трубки, расположенные приблизительно в плоскости, проходящей через нулевую точку. В таком случае их динамика оказывается близкой к картине двумерного пересоединения [1].

Литература

1. Прист Э., Форбс Т., Магнитное пересоединение, М.: Физматлит, 2005.
2. Filippov B., 1999, *Solar Phys.*, 185, 297.
3. Su Y., Veronig A. M., Holman G. D., Dennis B. R., Wang T., Temmer M., Gan W., 2013, *Nature Physics*, 9, 489.
4. Freed M. S., Longcope D. W., McKenzie D. E., 2015, *Solar Phys.*, 290, 467.
5. Sun J. Q., et al., 2015, *Nature Communications*, 6, 7598.
6. Li L., Zhang J., Peter H., Priest E., Chen H., Guo L., Chen F., Mackay D., 2016, *Nature Physics*, 12.
7. Xue Z., et al., 2016, *Nature Communications*, 7, 11837.

ОЦЕНКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ПО РАДИОДАНЫМ

Фомичев В.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

fomichev@izmiran.ru

ESTIMATIONS OF MAGNETIC FIELD IN THE SOLAR CORONA BY RADIODATA

Fomichev V.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

On the basis of the analysis of types I, II and III solar radio bursts at meter radio waves a possibility of estimation of the magnetic field in the solar corona is discussed.

Исследования магнитных полей на Солнце различных пространственных и временных масштабов занимают центральное место в физике Солнца и солнечно-земных связей. На уровне фотосферы и нижних слоев атмосферы Солнца исследования магнитных полей основаны на измерениях магнитного расщепления спектральных линий (эффекта Зеемана). В солнечной короне из-за высокой температуры ($T \geq 10^6$ К) такие методы оказываются не эффективными, и для получения информации о магнитных полях на этих высотах могут быть использованы данные о спорадическом радиоизлучении Солнца. Некоторые результаты таких исследований описаны ниже.

1. Радиовсплески II типа. Физическим агентом, приводящим к генерации медленно дрейфующих по частоте радиовсплесков II типа (в сторону низких частот), являются ударные волны, распространяющиеся во внешние слои солнечной атмосферы и межпланетное пространство [1]. Наиболее последовательная теория радиовсплесков II типа была выдвинута в [2] и затем развита в [3-5]. Она основана на ламинарной теории слабых бесстолкновительных ударных волн (число Маха $M < 2$), распространяющихся перпендикулярно магнитному полю [6]. Когда соударения в плазме несущественны, МГД-ударный фронт состоит из последовательности солитонов сжатия, в которых из-за неоднородности магнитного поля возникает дрейф электронов и ионов в плоскости фронта ударной волны. Относительная скорость дрейфа при выполнении условия $M > M_{кр} = 1 + \frac{3}{4}(8\pi n_0 T_e H_0 - 2)^{1/3}$ превышает тепловую скорость электронов $V_{Te} = (T_e/m_e)^{1/2}$. В этом случае во фронте ударной волны развивается бунемановская неустойчивость, приводящая к генерации плазменных волн. Последующая трансформация плазменных волн в электромагнитные волны приводит к генерации радиовсплесков II типа.

В рамках этой теории наблюдаемые характеристики радиовсплесков II типа (наблюдаемая частота излучения основного тона радиовсплесков II типа f , относительная скорость частотного дрейфа $f^{-1}df/dt$, расщепление дина-

мических спектров δf всплесков II типа) связаны как с параметрами солнечной короны, так и с параметрами ударных волн. Можно составить систему уравнений, связывающих определяемые из динамического спектра величины f , $f-1df/dt$ и δf с неизвестными значениями концентрации N_0 , магнитного поля H_0 и числа Маха M [5,7]. Эта система уравнений включает в себя не только эффекты, связанные с неоднородностью концентрации и магнитного поля в солнечной короне, но и эффекты, обусловленные изменением интенсивности ударных волн.

Распределение напряженности магнитного поля H_0 с высотой в короне по усредненным данным всплесков II типа и модели Ньюкирка распределения электронной концентрации $N(R)$ показывает, что магнитное поле в короне монотонно уменьшается с высотой. Если представлять изменение поля зависимостью типа $H \propto R^{-n}$, где R отсчитывается от поверхности Солнца, то для высот больше 500 тыс. км $n = 1$, для меньших высот $n = 2$. Можно предположить, что на малых высотах в короне преобладает вклад активных областей (в том числе групп пятен). Это поле является квазидипольным и уменьшается с высотой как R^{-2} . На больших высотах начинает преобладать вклад крупномасштабных, фоновых магнитных полей.

2. Шумовые бури I типа. Термин «шумовая буря» объединяет два тесно связанных между собой явления: медленный подъем интенсивности радиоизлучения с характерным временем порядка часов и дней в широком диапазоне частот от 30 до 500 МГц и многочисленные узкополосные и кратковременные всплески длительностью порядка секунд и долей секунд. Всплесковый компонент получил название радиовсплески I типа. Часто указанные всплески I типа группируются в виде узкополосных цепочек, напоминающих радиовсплески II типа. Можно предположить, что цепочки всплесков I типа могут быть также связаны с движением ударных волн в солнечной короне. В [8] было показано, что цепочки всплесков I типа возбуждаются более слабыми (по сравнению с источниками всплесков II типа) ударными волнами в областях, где $\omega H \geq \omega_0$ ($\omega H = eH_0/mec$ – гирочастота электронов). По аналогии с радиовсплесками II типа, можно составить систему уравнений, связывающих определяемые из динамического спектра величины f , $f-1df/dt$, δf и Δf (ширина полосы частот) с неизвестными значениями концентрации N_0 , магнитного поля H_0 и числа Маха M . Полученные значения H_0 в источниках шумовых бурь I типа примерно на порядок превышают магнитные поля в источниках радиовсплесков II типа.

3. Радиовсплески III типа. Быстро дрейфующие (от высоких частот к низким) радиовсплески III типа генерируются потоками ускоренных электронов, пронизывающих корональную плазму со скоростью $\sim 1/3$ с. Теория радиовсплесков этого типа основывается на «плазменной теории», включающей возбуждение плазменных волн в короне ускоренными частицами и последующую трансформации части энергии этих волн в электромагнитное излучение на частотах, близких к ленгмюровской частоте электронов ω_0 и ее второй гармонике $2\omega_0$.

Среди характеристик этих всплесков наиболее тесно связанной с магнитным полем в солнечной короне является поляризация излучения на частоте ω_0 (основной тон). Поляризация радиовсплесков III типа может возникнуть как вследствие процессов в источнике, так и вследствие эффектов, которые могут иметь место на пути распространения радиоизлучения в короне. К процессам в источнике относятся различная эффективность конверсии плазменных волн в обыкновенные и необыкновенные волны и различные условия выхода обыкновенных и необыкновенных волн из области генерации.

Для радиоизлучения на частоте ω_0 (основной тон) условия выхода и распространения радиоизлучения становятся определяющими для его поляризации. В магнитоактивной корональной плазме уровни выхода обыкновенных и необыкновенных волн, где соответствующие показатели преломления обращаются в нуль, находятся на разных высотах. Для обыкновенных волн это уровень $v = 1$, а для необыкновенных волн – расположенный выше уровень $v = 1 - u^{1/2}$ ($v = \omega^2_0/\omega^2$, $u = \omega^2_H/\omega^2$). Радиоизлучение, генерируемое между этими уровнями, полностью поляризовано, так как из этой области может выйти только волна обыкновенного типа.

Для анализа влияния условий выхода и распространения радиоизлучения нужно знать размеры области излучения h_0 и ее соотношение с расстоянием между уровнями $v = 1$ и $v = 1 - u^{1/2}$ для данной частоты. При выполнении условия $\omega_H/\omega \ll 1$ (что имеет место в источниках всплесков III типа) всегда выполняется соотношение $\Delta h \ll h_0$. Установленная структура источника основного тона всплесков III типа с необходимостью приводит к появлению интервала полной поляризации радиоизлучения в начале временного профиля всплеска, затем степень поляризации уменьшается. Наличие такого поляризационного профиля радиовсплесков III типа было подтверждено в наблюдениях [9]. Обращается внимание на возможность оценок магнитного поля в короне по легко измеряемым характеристикам радиовсплесков III типа. Так, например, $\omega_H = 2 \Delta t_{100} d \omega/dt$, где Δt_{100} - длительность участка 100% поляризации.

Для получения информации о характере изменения напряженности магнитного поля с высотой можно воспользоваться частотной зависимостью степени поляризации радиовсплесков III типа. На основе многочисленных измерений на различных частотах можно заключить, что в широком диапазоне частот от 300 до 20 МГц степень поляризации всплесков III типа слабо зависит от частоты и близка к 20%. Анализ показал, что эффект Фарадея и зависимость от частоты разности оптических толщин обыкновенных и необыкновенных волн (как в солнечной короне, так и в ионосфере Земли) не могут объяснить постоянство средней степени поляризации в широком диапазоне частот [10]. Согласно схеме образования поляризации, рассмотренной выше, степень поляризации P основного тона всплесков III типа определяется отношением Y расстояния Δh между уровнями выхода обыкновенных и необыкновенных волн к размеру излучающей области h_0 : $Y = \Delta h/h_0$. Для

объяснения наблюдаемой зависимости степени поляризации всплесков III типа от частоты необходимо, чтобы $dY/d\rho \geq 0$. Отсюда получаем соотношение $N/dN/d\rho \leq 2N/dN/d\rho$. Для распределения электронной концентрации по модели Ньюкирка $N \propto 10^{4,32/\rho}$ и напряженности магнитного поля $H \propto (\rho-1)^{-n}$ это условие выполняется при $n \leq 5/\rho (1 - 1/\rho)$. Тогда, для высот $\rho = (1,2 \div 2,5)$ получим следующее ограничение на n , $n \leq (1,2 \div 0,7)$.

Заключение, что магнитное поле уменьшается с высотой достаточно медленно, согласуется с результатом, полученным по данным о радиовсплесках II типа.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 17-02-00308).

Литература

1. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М. Наука, 1964.
2. Пикельнер С.Б., Гинцбург М.А. О механизме всплесков II типа радиоизлучения Солнца // Астрон. ж. Т.40. №5. С.842-846, 1962
3. Железняков В.В. О происхождении всплесков солнечного радиоизлучения в метровом диапазоне волн // Астрон. ж. Т.42. №2, С.244-252. 1965.
4. Зайцев В.В. К теории всплесков II типа радиоизлучения Солнца // Астрон. ж. Т.42. №4. С.740-748. 1965.
5. Зайцев В.В. О параметрах ударных волн, генерирующих солнечные радиовсплески II типа, и магнитных полей в короне // Астрон. ж. Т.45. №4, С.766-772. 1968.
6. Сагдеев Р.З. Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме // В кн. Вопросы теории плазмы. Атомиздат. вып.4. С. 20-79. 1964.
7. Фомичев В.В. О распространении в солнечной короне ударных волн, вызывающих радиовсплески II типа // Астрон. ж. Т.49, №2, С. 348-354. 1972.
8. Зайцев В.В., Фомичев В.В., О происхождении цепочек всплесков I типа // Астрон. ж. Т.49, №4, С. 817-826. 1972.
9. Slottje C. Research note. Polarization fine structure in solar radiobursts of type III on short meter wavelengths. // Astron. and Astrophys. V.32, №1, PP. 107-110. 1974.
10. Фомичев В.В., Черток И.М., О частотной зависимости степени поляризации солнечных радиовсплесков III типа // Астрон. ж. Т. 48, № 6. С. 1244-1250. 1971.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

ahariton@izmiran.ru

SOME RESULTS OF ANALYSIS OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS TO STUDY THE IRREGULARITIES OF THE DIFFERENTIAL ROTATION OF THE EARTH

Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

ahariton@izmiran.ru

The analysis of available representations about the role of Solar-Terrestrial relations on processes of the differential rotation of the various layers of the Earth's tectonosphere, atmosphere is carried out in the report. It is shown that layers of differential rotation of an Earth's mantle (mantle zonality) have the identical cross sizes at all depths. Mantle zonality causes fault tectonic zonality of oceanic crustal. By results of the analysis of the allocated periodicity in the various geophysical data the possible model of the role of Solar-Terrestrial relations on processes of differential rotation of layers of the Earth's tectonosphere, atmosphere, hydrosphere has been formulated.

Выбор темы данного доклада обусловлен интересом многих ученых к актуальным в настоящее время вопросам влияния физических процессов, происходящих на Солнце, на изменения климата Земли, связанные, в том числе, и с изменением границ дифференциально-вращающихся слоев различных геосфер. В докладе сделана попытка проанализировать причины подобных изменений. По-видимому, изменения климата это только лишь небольшая часть общего изменения различных физических процессов на Земле, происходящих в течение ее естественной эволюции, за счет процессов дифференциального вращения различных физических слоев Земли.

Структура солнечной короны показывает, что электромагнитное поле Солнца может быть аппроксимировано мультипольным магнитным моментом в периоды максимума его активности [2], образующего многосекторную спиралевидную структуру межпланетного магнитного поля (ММП), показанную на рис. 1, за счет инжектированной Солнцем замагниченной водородно-гелиевой плазмы (так называемый солнечный ветер), двигающейся в границах этих секторов.

Известно, что направление части мультипольных моментов Солнца имеет разную полярность, и направление их наклона от оси вращения составляет более 45 градусов, что и создает в плоскости околосолнечного вращения Земли спиралевидную секторную структуру ММП. Однако Солнце

периодически меняет величину своего суммарного магнитного момента, соотношение величин магнитного поля мультиполюсных магнитных моментов, количество мультиполей, их полярность (положительный или отрицательный знак на полюсах мультиполя), что периодически изменяет секторную спиралевидную структуру межпланетного магнитного поля (ММП) на большее или меньшее количество секторов.

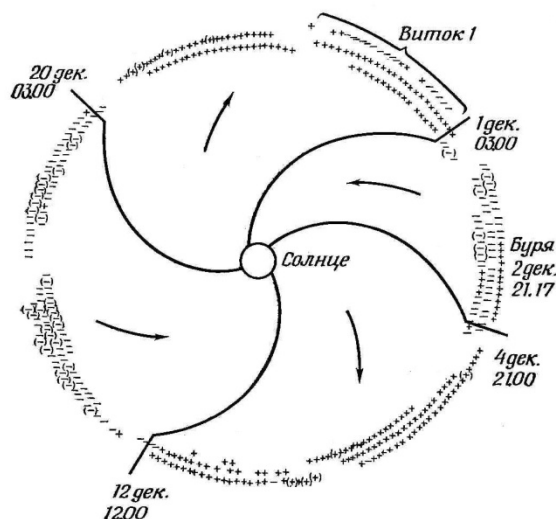


Рис. 1. Спиралевидная структура межпланетного магнитного поля солнечно-планетарной системы на орбите вращения Земли. Знаки плюс (+) показывают магнитное поле, направленное от Солнца, а знаки минус (-) - магнитное поле, направленное к Солнцу [1].

Планета Земля, хотя и генерирует достаточно сильное магнитное поле, которое, в первом приближении, на значительном удалении от ее поверхности (более трех радиусов Земли) может считаться дипольным на 90%, однако не образует вокруг себя спиралевидную структуру магнитного поля в околоземном космическом пространстве, поскольку величина квадрупольного магнитного момента Земли, значительно меньше той, которая необходима для создания отчетливо выраженной в плоскости вращения спиралевидной структуры электромагнитного поля, в окружающем Землю космическом пространстве. Величины квадрупольного магнитного момента Земли хватает только для образования спиралевидной структуры во внутренних оболочках Земли, приводящих к дифференциальному вращению их слоев. Земля, также как и Солнце имеет дифференциальное вращение своих внутренних геосфер, то есть разную среднюю скорость вращения различных радиальных физических слоев геосфер (внешнего ядра, мантии нижней, тектоносферы, гидросферы, нижней атмосферы) в центре планеты и на ее поверхности (рис. 2).

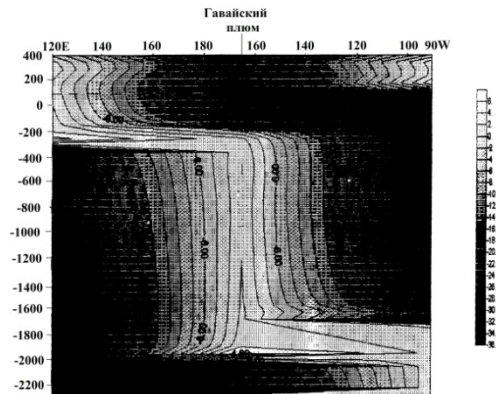


Рис. 2. Пример разной скорости вращения различных радиальных слоев в электромагнитном разрезе Земли (атмосферы, гидросферы, литосферы, мезосферы) [3].

Кроме того, за счет того, что Земля имеет почти сферическую форму (форму геоида, близкую по форме к эллипсоиду вращения), ее ядро относительно небольшого размера не может вращаться с одинаковой скоростью все слои Земли, в зависимости от их широты месторасположения (приполярные и около экваториальные слои), за счет разной вязкости слоев мантии, с разной по широте температурой, в около экваториальных областях и ближе к магнитным полюсам Земли, а также за счет разной площади сцепления приполярных и около экваториальных слоев мантии. Это образует уже не только радиальное (радиальная зональность), но и широтное дифференциальное вращение (широтная зональность) геосфер. Необходимо показать, что, нами выделено по экспериментальным спутниковым данным «MAGSAT», «СНАМР», широтное дифференциальное вращение (широтная зональность) различных физических оболочек Земли (рис. 3-5) [3, 4] (тектоносферы, атмосферы, гидросферы Земли).

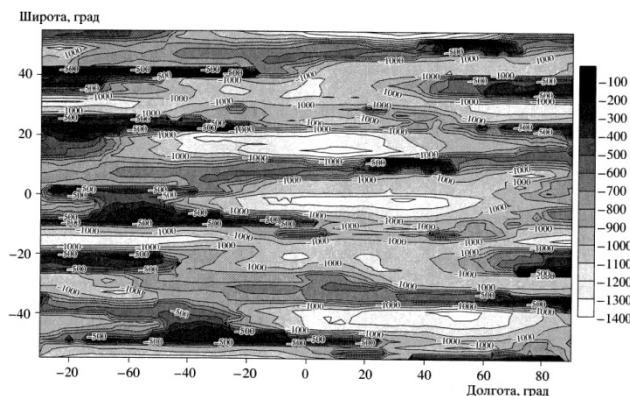


Рис. 3. Структура дифференциального вращения широтных слоев тектоносферы Земли, рассчитанная по данным космического аппарата «MAGSAT» [3, 4].

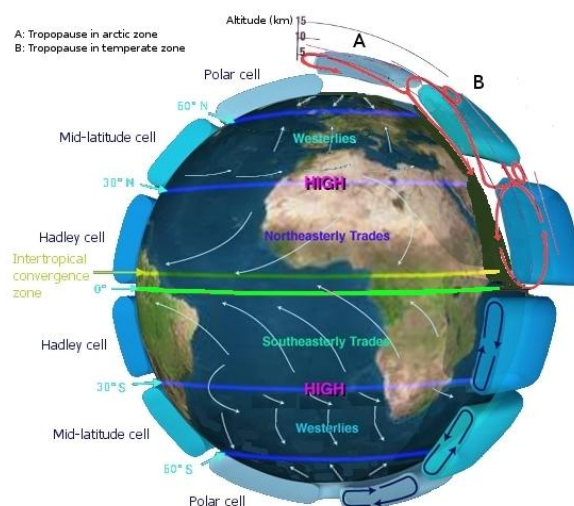


Рис. 4. Структура дифференциального вращения различных широтных слоев атмосферы Земли [3].

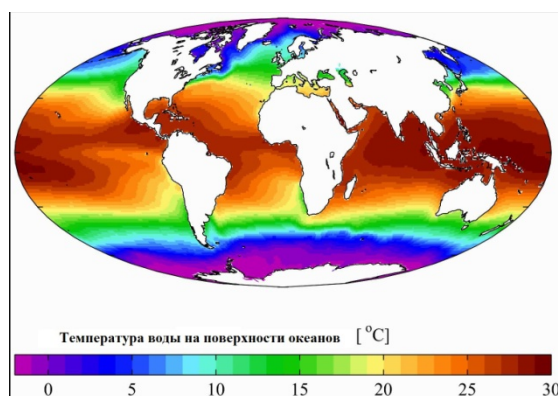


Рис. 5. Структура дифференциального вращения различных широтных слоев гидросферы Земли (широтная поверхностная гидросферная зональность) [3].

Смещение границ дифференциально-вращающихся слоев геосфер приводит к изменению климата в смежных широтных слоях Земли.

Литература

1. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир. 384 с. 1974.
2. Бронштэн В.А. The structure of the far outer corona of 19 June 1936 // Советская астрономия. № 3. С. 821-826.1960.
3. Харитонов А.Л., Харитонов Г.П. Связь закономерностей дифференциального вращения глубинных физических оболочек Солнца, Земли, других планет и закономерностей биологической, атмосферной, гидрохимической зональности планет // Тезисы международной конференции «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле». Москва. ИКИ РАН. С. 105. 4-8 июня 2012.
4. Kharitonov A.L., Fonarev G.A., Serkerov S.A., et al. The calculation of the topology of deep magnetic inhomogeneous of the Earth's mantle from MAGSAT, CHAMP geomagnetic satellite deep-sounding methods // Proceedings of the First International Science Meeting "SWARM". European Space Agency. Nantes. WPP-261. 2006.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ГАЛАКТИКЕ И ИХ СВЯЗЬ С НАКОПЛЕНИЕМ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЗЕМЛЕ

Харитонов А.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

ahariton@izmiran.ru

ANALYSIS OF DYNAMIC CHANGES OF SOME PHYSICAL PARAMETERS IN THE GALAXY AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE ACCUMULATION OF HYDROCARBONS ON EARTH

Kharitonov A.L.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

ahariton@izmiran.ru

The analysis of available representations about the role of physical parameters of space environment in our Galaxy, in global changes of the environment and geological processes of the Earth (for example, the concentration of hydrocarbons on the Earth) is carried out in the report. By results of the analysis of the allocated periodicity in the various geophysical data the possible model of geophysical changes which are connected with periodic influences to the Earth space factors (change of the value of the Galactic magnetic field, change of concentration of the ionized hydrogen in the Galaxy, Galactic space rays) at movement of the Earth on the Galactic orbit, in the course of its evolutionary development has been discussed.

Основная цель данного доклада состояла в том, чтобы проанализировать влияние изменений некоторых физических параметров в галактической среде и их воздействия на долговременные геолого-геофизические изменения (например, концентрация CO₂, C и других углеводородов), в зависимости от периодических воздействий на Землю космических факторов (изменения параметров галактического электромагнитного поля, изменения поверхностной плотности ионизированного и нейтрального водорода в Галактике, концентрации вещества остатков сверхновых) при движении Земли по орбите вместе с Галактикой в процессе ее эволюционного развития. В связи с этой задачей рассмотрены некоторые вопросы динамических изменений, происходящих в нашей Галактике, и вытекающих из этого периодических изменений в развитии природных физических процессов и, в особенности, процессов накопления углеводородов на Земле.

Существуют различные физические (электромагнитные, гравитационные) поля и радиационные излучения, генерируемые различными природными объектами в нашей Галактике, проявляющиеся на Земле в различных диапазонах длин волн в современный период эволюции Земли. Рассмотрим теоретические исследования, позволяющие проследить, как менялось во времени воздействие некоторых физических полей и излучений дальнего и ближнего космоса в процессе эволюционного движения Земли. Теоретические исследования [1, 2] показывают, что в процессе эволюционного развития

нашей Галактики – Млечного пути – имелись разные временные периоды, когда воздействие физических полей дальнего и ближнего космоса было значительно более сильным, что, естественно, должно было оказывать существенное влияние на изменения в развитии многих геофизических процессов на Земле. На рис. 1 представлена теоретическая схема физических процессов эволюционного развития нашей Галактики из газовой туманности после завершения синтеза атомных ядер [1].



Рис. 1. Теоретическая схема эволюционного развития Галактики из газовой туманности, после завершения синтеза атомных ядер [1].

Основным видом физических полей, генерируемых различными источниками в Галактике и влияющих на многие геофизические процессы на Земле, являются электромагнитные поля. Кроме того, определенное влияние на развитие многих геофизических процессов на Земле (например, накопление углеводородов) оказывало также и изменение других физических параметров (например, количества остатков вещества сверхновых, значение величины поверхностной плотности числа гигантских областей), измеренных в нашей Галактике (рис. 2).

Из графиков (рис. 2-4) видно, что имеется определенная корреляция тренда и локального периодического изменения величин некоторых физических параметров (количества остатков вещества сверхновых, значение величины поверхностной плотности числа гигантских областей), изменяющихся в процессе эволюционного развития нашей Галактики и геофизических процессов на Земле, связанных с накоплением углеводородов (C, CO₂) в ее недрах.

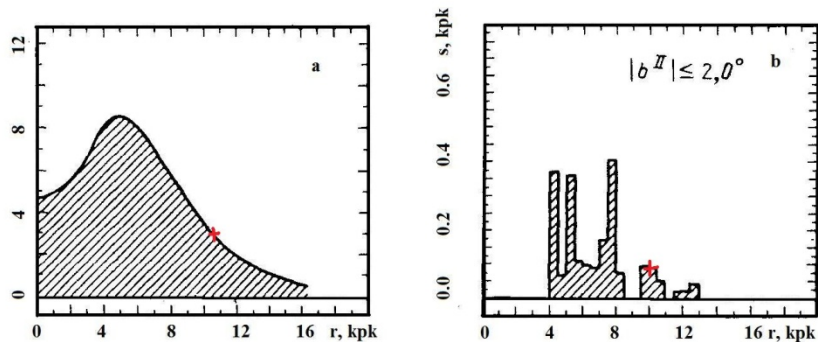


Рис. 2. Распределение вдоль радиуса Галактики: а – количество остатков вещества сверхновых (в условных единицах) [2, 4]; б – поверхностной плотности числа гигантских областей [2, 3]. Знаком + отмечено современное положение СПС (Земли) на удалении от ядра Галактики.

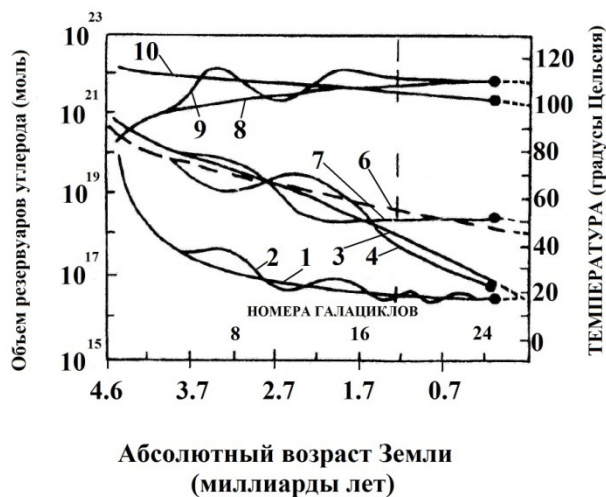


Рис. 3. Волнообразное периодическое изменение накопления углерода (С) в осадочных породах (в единицах измерения - моль) в зависимости от абсолютного возраста Земли (по нижней горизонтальной шкале от 4.6 миллиардов лет назад до настоящего времени), рассчитанное по экспериментальным данным (сплошные линии).

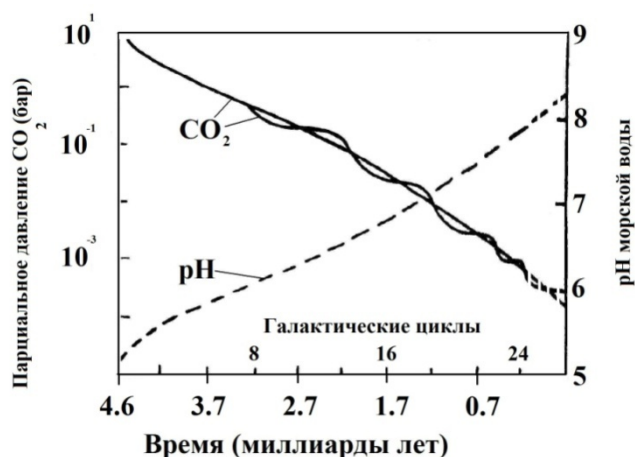


Рис. 4. Волнообразное периодическое изменение парциального давления CO_2 (в барах) и значений pH морской воды, в зависимости от абсолютного возраста Земли (по нижней горизонтальной шкале от 4.6 миллиардов лет назад до настоящего времени), рассчитанные по экспериментальным данным (сплошные линии).

В результате спектрального анализа методом максимальной энтропии выделена основная периодичность изменения цикличности накопления углеводородов на Земле, соответствующая временному периоду $T_1=740\pm 100$ млн. лет.

Литература

1. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир. 384 с. 1974.
2. Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д., Шукуров А.М. Магнитные поля галактик. М.: Наука. 280 с. 1988.
3. Burton N.P. The morphology of hydrogen and of other traces in the Galaxy // Ann. Rev. Astron. Astrophys. V.14, P. 1683-1693. 1976.
4. Kodaira K. Distribution of the galactic supernova remnants // Publ. Astron. Soc., Japan. V. 26. P. 255-261. 1974.

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ И УРОВНЕМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 21, 22 И 23 ЦИКЛАХ

Хегай В.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

hegai@izmiran.ru

CORRELATION BETWEEN STRONG EARTHQUAKES AND THE LEVEL OF SOLAR ACTIVITY IN CYCLES 21, 22 AND 23

Hegai V.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

A comparative analysis was made between the number of strong crustal earthquakes in the year ($N_{EQ/Year}$) and the annual level of solar activity (annual flux of solar radiation at a wavelength of 10.7 cm - $F_{10.7_{Year}}$) in the time interval covering 21, 22 and 23 cycles of solar activity. On the investigated time interval there is a moderate anticorrelation between the parameters considered, which is in agreement with the results of other researchers obtained earlier. The value of the corresponding statistically significant correlation coefficient is -0.39. The obtained estimates of the regression equation allow us to use it for the forecast in the 24th cycle of solar activity.

1. Введение

Связь сейсмической активности Земли (САЗ) с уровнем солнечной активности (СА) обсуждается давно (см., например [1]). В относительно недавней работе [2] исследовалась взаимосвязь между СА и САЗ за период 1900-2002 гг. В основе этих исследований лежало представление о сейсмичности как о части единого физического процесса в системе "Солнце-Земля". При таком подходе сейсмические явления определяются процессами как солнечного, так и земного происхождения. В работе было показано, что существуют 11-летние циклы сейсмической активности на Земле, которые имеют существенную отрицательную корреляцию с циклами солнечной активности (с циклами солнечных пятен), а на протяжении 11-летнего солнечного цикла сейсмическая активность возрастает в периоды минимальной солнечной активности и во время крупных солнечных вспышек. В качестве меры уровня СА в этой работе рассматривались годовые числа Вольфа (W), а САЗ оценивалась по величине годового энерговыделения сейсмической энергии (E) в сильных землетрясениях. Оказалось также, что минимальная наблюдаемая абсолютная величина коэффициента корреляции в этой паре (отрицательного!) $|\rho|$ равна 0.54, что по шкале Чеддока, характеризующей тесноту связи, определяется как «заметная» ($0.5 < |\rho| < 0.7$).

В настоящем исследовании проводится сопоставительный (корреляционный) анализ между числом сильных (магнитуда $M \geq 6.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в году ($N_{EQ/Year}$) и годовым уровнем

СА (годовой поток солнечного излучения на длине волны 10.7 см – $F10.7_{Year}$) на временном интервале, охватывающем 21, 22 и 23 цикла солнечной активности. Такой выбор корреляционной пары обусловлен, во-первых, высокой надежностью каталога Национального Центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC, USGS) [3] с 1973 г., во-вторых, тем, что параметр $F10.7$, хорошо коррелирующий с числами Вольфа (W), сам по себе является интегральным параметром, характеризующим СА в целом. Кроме того, рассмотрение корреляции на указанном временном промежутке может дать информацию прогностического характера.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 ниже показано поведение $N_{EQ/Year}$ (левая шкала ординат, точечная линия) и $F10.7_{Year}$ (правая шкала ординат, сплошная линия) на выбранном временном промежутке.

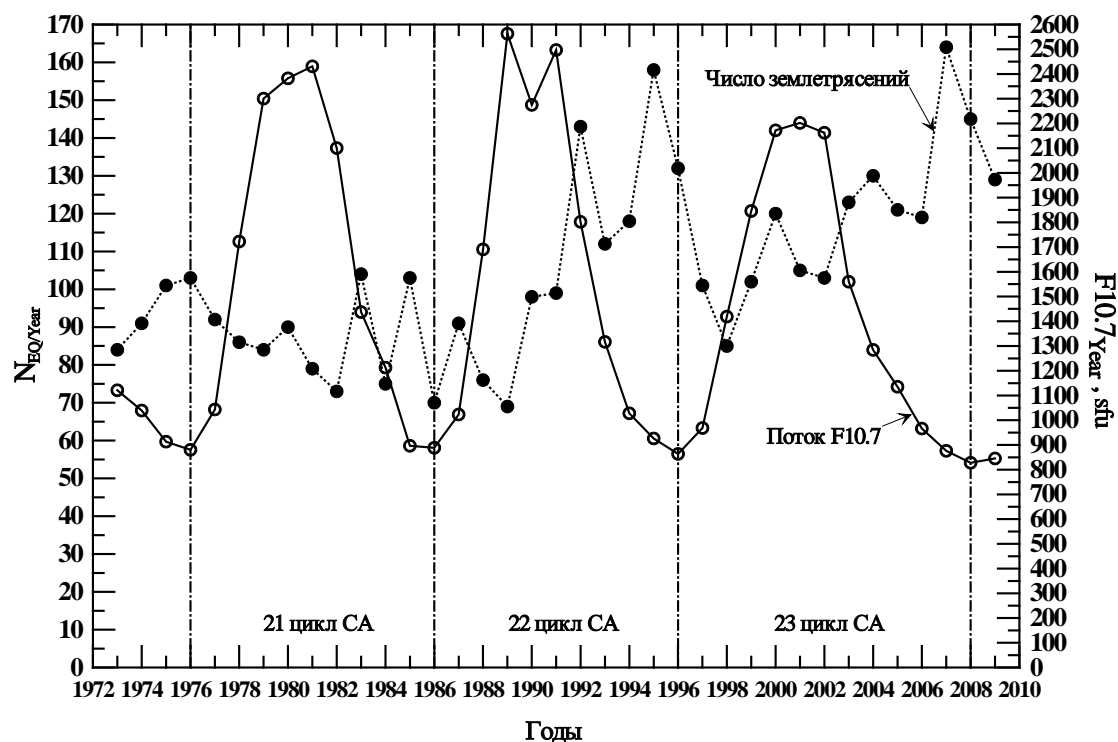


Рис. 1.

Границы циклов СА показаны вертикальными штрих-пунктирными линиями в соответствии с [4], а данные для вычисления суммарного годового потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см взяты из каталога геофизических данных OMNIWeb Data Explorer – NASA [5]. Увеличение числа сильных землетрясений ($N_{EQ/Year}$) при пониженных значениях $F10.7_{Year}$ отчетливо видно на рисунке.

Для выбранной пары параметров на изучаемом временном отрезке эмпирическое уравнение линейной регрессии может быть записано следующим образом:

$$N_{EQ/Year} = - 0.01616 \times F10.7_{Year} + 128.66, \quad (1)$$

При этом, в соответствии со статистикой Стьюдента с уровнем значимости $\alpha = 0.05$, получается статистически значимая величина коэффициента корреляции $\rho = - 0.392$, т. е. теснота связи между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$ по шкале Чеддока определяется как «умеренная» ($0.3 < |\rho| < 0.5$) и оказывается в диапазоне на ранг ниже, чем наименьшая из абсолютных величин ρ , приводимых в [2]. Тем не менее, этот результат в целом согласуется с выводами, сделанными в [2] о наличии устойчивой антикорреляции между СА и СА3 в циклах СА на более длинном временном интервале. Стандартная ошибка регрессии S , характеризующая меру разброса $N_{EQ/Year}$ вокруг линии регрессии, равна 22.54. Статистическая значимость уравнения (1) проверена с помощью критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации, по крайней мере, 15% общей вариабельности $N_{EQ/Year}$ объясняется изменением $F10.7_{Year}$. Полученные оценки уравнения регрессии позволяют использовать его для прогноза. При $F10.7_{Year} = 1624$, количество сильных коровых землетрясений за год $N_{EQ/Year}$ будет находиться в пределах от 56 до 149 и с вероятностью 95% не выйдет за эти пределы.

Физическая природа антикорреляции между $N_{EQ/Year}$ и $F10.7_{Year}$ может быть обусловлена следующими обстоятельствами (см. также [2]): поскольку Земля обладает своим внутренним источником энергии, то, по мере того как она получает меньший приток энергии от основного внешнего источника – Солнца – в периоды низкой СА, устанавливается такой баланс и тип энергообмена с внешней средой, при котором в окружающее пространство энергия выбрасывается через механизмы, связанные именно с СА3, т. е. возрастает роль внутреннего источника энергии. В результате увеличивается количество сильных землетрясений.

3. Выводы

Проведен сопоставительный анализ между числом сильных коровых землетрясений в году ($N_{EQ/Year}$) и годовым уровнем солнечной активности (годовой поток солнечного излучения на длине волны 10.7 см – $F10.7_{Year}$) на временном интервале, охватывающем 21, 22 и 23 циклы солнечной активности. Получено уравнение линейной регрессии и оценены её параметры методом наименьших квадратов. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью критерия Фишера. Установлено также, что параметры модели статистически значимы. На исследованном временном промежутке наблюдается умеренная антикорреляция между рассматриваемыми параметрами, что согласуется с полученными ранее результатами других исследователей. Величина соответствующего статистически значимого коэффициента корреляции

ляции составляет -0.39 . Полученные оценки уравнения регрессии позволяют использовать его для прогноза в 24 цикле СА.

Литература

1. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 352 с.
2. Шестопалов И. П., Харин Е. П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений, III Междунар. конф. с. Паратунка Камч. обл. 16-21 августа 2004, сб. докл. — Петропавловск – Камч.: ИКИР ДВО РАН, 2004. С. 130-141.
3. <http://neic.usgs.gov>
4. Ишков В.Н. Периоды «пониженной» и «повышенной» солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Сб. «Солнечная и солнечно-земная физика- 2013», под ред. Ю. А. Наговицина, Изд. ВВМ, Санкт- Петербург, 2013, С. 111-114.
5. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЗЕБРА-СТРУКТУРЫ В СОЛНЕЧНОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ

Чернов Г.П., Фомичев В.В.

ИЗМИРАН, г Москва, Троицк, Россия

gchernov@izmiran.ru

ALTERNATIVE MODELS OF ZEBRA-PATTERNE IN SOLAR RADIO EMISSION

Chernov G.P., Fomichev V.V.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

In the literature, discussion continues about the nature of the zebra–structure (ZS) in type IV radio bursts, and understanding even the most extended mechanism associated with double plasma resonance has been improved in series of works. Moreover, in the recent work [1] its ineffectiveness was shown under the usually adopted conditions in the radio source. In this case in a number of works we demonstrated the possibility of modeling with whistlers to explain many thin components of ZS stripes, taking into account the effects of scattering whistlers on fast particles. This situation stimulates the search for new mechanisms. For example, earlier we showed the importance of explosive instability, at least for large flares with the ejections of protons.

Зебра-структура (ЗС) в виде периодических полос в излучении и поглощении на динамическом спектре радиоизлучения остается самой интригующей тонкой структурой солнечных континуальных радиовсплесков IV типа, несмотря на десяток предложенных механизмов [2]. Прежде всего, это связано с большим разнообразием полос в каждом новом явлении, когда становится невозможным объяснение всех тонких деталей единым механизмом. Наиболее распространенным объяснением считается излучение на различных уровнях двойного плазменного резонанса (ДПР), где верхняя гибридная частота (ω_{UH}) становится равной целому числу электронных циклотронных гармоник $s\omega_{Be}$: $\omega_{UH} = (\omega_{Pe}^2 + \omega_{Be}^2)^{1/2} = s\omega_{Be}$. Все аспекты ДПР-механизма описаны в недавнем обзоре [3]. В этой модели все изменения полос зебры обычно связываются с изменениями магнитного поля в источнике, в частности, с распространяющимися магнитозвуковыми волнами. В особо сложных случаях допускаются разнообразные сочетания градиентов плотности и магнитного поля или одновременное присутствие в источнике трех разных функций распределения быстрых частиц.

В недавней работе [1] проведены новые расчеты инкрементов верхних гибридных волн в условиях ДПР с кольцевым распределением быстрых электронов с релятивистскими поправками для различных температур фоновой плазмы и быстрых частиц. Было показано, что четкий максимум инкремента получается только для скоростей электронов $0.1c$ с узкой дисперсией. Для скорости $0.2c$ инкремент резко уменьшается, и максимумы замываются в континууме уже для нескольких циклотронных гармоник s .

Рассматриваемое в данной работе явление 1 августа 2010 г. было богато тонкой структурой радиоизлучения во всем диапазоне от 25 до 3500 МГц: кроме быстрых пульсаций в метровом диапазоне, наблюдалось большое разнообразие зебра-структуры и радиоволокон (fiber bursts) в дециметровом и микроволновом диапазонах волн.

На Рис. 1 представлена зебра-структура в дециметровом диапазоне волн в пульсирующем режиме в правом канале поляризации радиоспектрографа obs. YNAO (г. Куньмин, КНР). Радиоволокна с прямым дрейфом частоты ограничивают зебра-структуру с НЧ-края спектра.

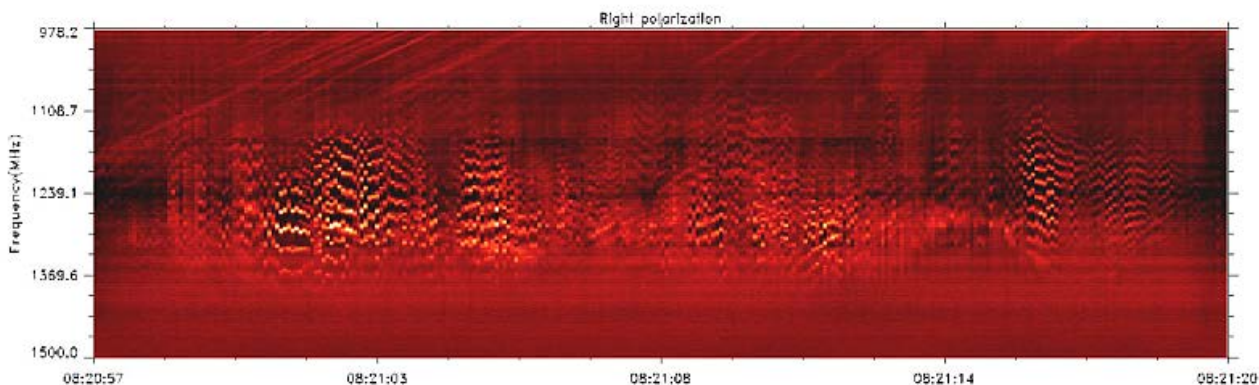


Рис. 1. Зебра-структура в дециметровом диапазоне волн в пульсирующем режиме в правом канале поляризации спектрографа obs. Юннань (YNAO, г. Куньмин, КНР).

Вспышка балла C3.2 началась в AR 11092 (N13 E23) в 07:25 с максимумом в 08:57 и продолжалась до 10:05 UT. Явного метрового всплеска II типа не было (спектры ИЗМИРАН и Hiraiso), хотя было два KBM.

Это явление может служить наглядным примером невозможности объяснения такой сложной ЗС в рамках ДПР механизма. Тогда необходимо предположить, что магнитное поле должно резко меняться несколько раз в секунду, и каждую секунду должно меняться соотношение градиентов магнитного поля и плотности, что трудно реализуемо. Уровни ДПР не могут мгновенно появляться и исчезать в большом интервале высот.

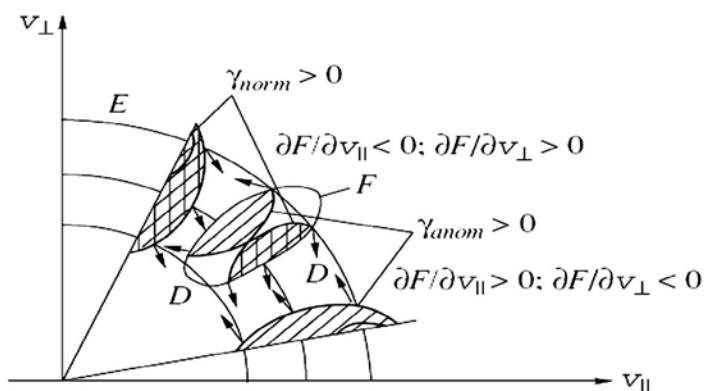
Явление 1 августа 2010 г. уже было предметом исследования в нескольких работах. В четырех работах анализировались различные аспекты взаимодействия нескольких корональных выбросов массы (КВМ) в межпланетном пространстве и представлены наглядные наблюдения и анализ распространения быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн из области вспышки с помощью фильмов в крайнем ультрафиолете SDO AIA 171 Å (*Solar Dynamic Observatory/ Atmospheric Imaging Assembly*). Затем на основе этих наблюдений было показано, что БМЗ-волны вызвали пульсации радиоизлучения в диапазоне 25–2000 МГц с периодами ~ 181 с вследствие модуляции процессов ускорения быстрых частиц. Однако сложная динамика ЗС оставалась без внимания.

В данной работе показана возможность объяснения основных особенностей полос зебры в модели с вистлерами. Анализ спектров

позволяет предположить, что в радиисточнике идет пульсирующий процесс формирования полос ЗС. В рамках модели с вистлерами такой процесс связан с пульсирующим взаимодействием пламенных ленгмюровских волн с вистлерами. Смена частотного дрейфа полос связывается с переключением неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный вследствие диффузии быстрых частиц на вистлерах. Возможность такого переключения неустойчивости вистлеров показана с помощью Рис. 2 [4]. Постепенное переключение неустойчивости вистлеров с преимущественного вклада нормального эффекта Доплера на аномальный происходит в соответствии со знаком оператора Λ в выражении для инкремента неустойчивости γ , который зависит от знаков производных функции распределения F по продольным V_{\parallel} и поперечным скоростям V_{\perp} :

$$\Lambda = (s\omega_{Be}/\omega V_{\perp})(\partial/\partial V_{\perp}) + (k_{\parallel}/\omega)(\partial/V_{\parallel}) \quad | \quad V_{\parallel} = (\omega - s\omega_{Be})/k_{\parallel} .$$

Рис. 2. Переключение неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный, согласно Gendrin, [1981]. (Фрагмент рис. 2 из [4]).



Оператор Λ имеет простой физический смысл производной по энергии E вдоль диффузионной кривой (D на Рис. 2). Известно, что на нормальном эффекте Доплера ($s = +1$ в циклотронном резонансе $\omega - k_{\parallel}V_{\parallel} - s\omega_{Be} = 0$) частицы и волны направлены в противоположные стороны, а на аномальном ($s = -1$) – в одну сторону, но под большим углом к магнитному полю. Резонансное переключение оперирует с периодичностью, определяемой временем диффузии, которое составляет порядка секунды в солнечной короне. Этот эффект производит плавное изменение групповой скорости вистлеров и тем самым изменение частотного дрейфа полос ЗС. Этот эффект назывался разворотом пучка вследствие диффузии. Дополнительная инжекция пучка электронов производит почти мгновенное переключение неустойчивости вистлеров на аномальный резонанс. Промежуточное положение пучка на Рис. 2 создает условие для расщепления полосы зебры на две, одновременно на обоих резонансах. Этот эффект расщепления, например, можно видеть на рис. 1 в 08:21:01 UT. Радиоволокна обычно образуются при неустойчивости вистлеров на нормальном эффекте Доплера с преобладанием в пучке поперечных скоростей, а ЗС – на аномальном резонансе. Поэтому переход зебры в радиоволокна (и обратно) на Рис. 1 в 08:21:11 и 08:21:17 UT (и многократно в другие моменты) связан с таким переключением. Переключение неустойчивости

вистлеров с разворотом групповой скорости вистлеров должно сопровождаться синхронным изменением направления частотного дрейфа полос ЗС на спектре с изменением направления пространственного дрейфа их радиоисточников.

Функция распределения постепенно становится более пологой вследствие диффузии на вистлерах, что приводит к ослаблению неустойчивости плазменных волн в объеме волнового пакета вистлеров. Это затухание является главной причиной формирования темных полос с НЧ-края радиоволокон и полос зебры. В модели с вистлерами сверхтонкая структура полос зебры находит естественное объяснение в рамках пульсирующего режима взаимодействия вистлеров с ионно-звуковыми волнами [2]. Узкополосные цепочки (жгуты) радиоволокон связываются с периодической неустойчивостью вистлеров между фронтами быстрых ударных волн в области магнитного пересоединения [4].

Общие свойства тонкой структуры радиоизлучения обычно связаны с динамикой вспышечного процесса в источнике типа магнитного острова после магнитного пересоединения: знак и степень круговой поляризации, разнообразные сочетания зебра-структуры и радиоволокон, пульсирующий характер на динамическом спектре. В одной статье невозможно рассмотреть десяток других моделей ЗС, значимость которых еще требует дополнительного анализа. В частности, для крупных вспышек может работать модель взрывной неустойчивости, которая может быть более перспективной и для объяснения ЗС в радиоизлучении пульсара в Крабовидной туманности. Детальное изложение наблюдательных свойств ЗС и радиоволокон и их современные теоретические модели представлены в двух обзорах [Chernov, 2012, 2016] (в свободном доступе на сайте <http://www.izmiran.ru/~gchernov/>).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 17-02-00308).

Литература

1. Benáček J., Karlický M., Yasnov L.V. Temperature dependent growth rates of the upper-hybrid waves and solar radio zebra patterns // *Astron. Astrophys.* V. 598. A108, 2017.
2. Chernov G.P. Fine structure of solar radio bursts. Heidelberg: Springer ASSL 375. 282 p.
3. Железняков В.В., Злотник Е.Я., Зайцев В.В., Шапошников В.Е. Эффект двойного плазменного резонанса и его роль в радиоастрономии // *УФН.* Т. 186. № 10. С. 1090-1116. (*Physics- Uspekhi.* V. 59. N 10. P. 997), 2016.
4. Chernov G.P. Whistlers in the solar corona and their relevance to fine structures of type IV radio emission // *Solar Phys.* V. 130. P. 75–82, 1990.

АНАЛИЗ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК СЕНТЯБРЯ 2017 г. ПО ИХ РАДИОВСПЛЕСКАМ

Чертюк И.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, г.Троицк, Россия

ichertok@izmiran.ru

ANALYSIS OF SOLAR PROTON FLARES OF SEPTEMBER 2017 BY THEIR RADIO BURSTS

Chertok I.M.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

It is shown that the fluxes and energy spectra of protons with energy of tens of MeV coming to Earth in early September 2017 qualitatively and quantitatively correspond to the intensity and frequency spectra of microwave radio bursts in the range 2.7–15.4 GHz.

В заканчивающемся 24-м цикле, при приближении к минимуму, в связи с рекордно быстрым развитием крупной активной области AR12673 на западной половине диска 4–10 сентября 2017 г. имел место выдающийся всплеск активности, включавший в себя большое число мощных вспышек вплоть до рентгеновского балла X9.3 и, по крайней мере, три значительные солнечные протонные события (СПС). Настоящая работа посвящена диагностическому анализу этих СПС на основе методики количественной радиодиагностики протонных вспышек, разработанной в ИЗМИРАН в 1970–1980-х гг. (см. [1–4]).

Методика исходит из того, что параметры интенсивности микроволновых всплесков на частотах $f \sim 3\text{--}15$ ГГц, хотя последние и генерируются электронами, распространяющимися к фотосфере, отражают количество ускоренных частиц, в том числе приходящих к Земле протонов с энергией десятки МэВ. Более того, в [4] было показано, что существует прямая статистическая зависимость между частотным спектром микроволновых всплесков и показателем степенного энергетического спектра наблюдаемых у Земли потоков протонов с энергией десятки МэВ. Практически диагностика вспышек начинается с выделения протонных событий на основе сформулированного в методике критерия, который предусматривает наличие достаточно интенсивного и продолжительного (неимпульсного) микроволнового всплеска, а также существенной метровой компоненты (всплесков II, IV типа) (см. [2]). На современном языке это соответствует событиям с сильной вспышкой большой длительности (LDE), крупным корональным выбросом (CME) и развитым постэруптивным (ПЭ) энерговыделением.

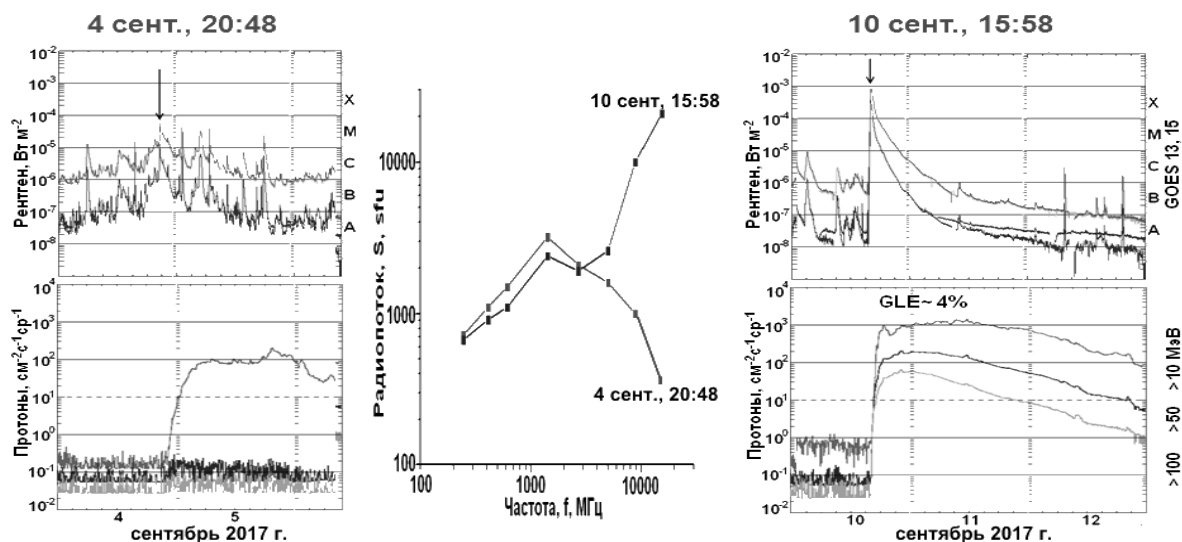


Рис. 1. Временные профили рентгеновских вспышек (каналы 0,5–4, 1–8 Å) и потоков протонов ($E > 10, 50, 100$ МэВ) у Земли для постэруптивного события 4 сент. 2017 г. с мягким радио и энергетическим спектром (левый ряд) и для мощной длительной вспышки 10 сент. 2017 г. (правый ряд) с жестким радио и энергетическим спектром протонов. В центре - частотный спектр микроволновых всплесков этих двух вспышек.

Анализ показал, что критерию протонности полностью удовлетворяют только три вспышки: балла M5.5, 20:48 UT 4 сент.; X9.3, 11:56 6 сент.; и X8.2, 15:58 10 сент. Это согласуется с наблюдениями, поскольку именно они явились источниками трех дискретных СПС, зарегистрированных на GOES (ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2017/2017_plots/). Оценки количественных параметров СПС (масштаба возможного протонного возмущения в канале $E > 10$ МэВ по интенсивности J_{10} и показателя степенного энергетического спектра γ) проводились с использованием полученных при разработке методики и слегка уточненных затем эмпирических соотношений (см. [5]). Наблюдаемые характеристики метрового радиоизлучения, включая всплески II, IV типа, позволили для всех трех вспышек считать условия выхода частиц из области ускорения умеренными, по терминологии, принятой в методике ИЗМИРАН. В данном случае исходными параметрами служили максимальные плотности радиопотока S_f на частотах $f = 2,7, 8,8$ и $15,4$ ГГц по данным RSTN (ftp://ftp.sec.noaa.gov/pub/warehouse/2017/2017_events/), которые мы будем обозначать, соответственно, как S_3, S_9 и S_{15} . Оценки показателя спектра протонов γ производились по частоте спектрального максимума радиовсплесков f_m и по отношению пиковых потоков на $f \sim 9$ и 15 ГГц, т.е. S_9/S_{15} .

Применение методики ИЗМИРАН к трём выделенным разным по характеру вспышкам показало, что, в целом, оценки по радиоданным достаточно хорошо отражают наблюдаемый масштаб и энергетический спектр соответствующих СПС. Сравним две наиболее сильно различающиеся вспышки (Рис. 1). Главной отличительной особенностью вспышки 4 сент. (Рис. 1) является мягкий радиоспектр с максимальным потоком в интересующем нас диапазоне $S_3 \sim 2000$ sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$) на $f_m \sim 3$ ГГц (фактически

частотный спектр достигает пика даже в дециметровом диапазоне). Этим определяются основные оценочные и наблюдаемые характеристики потока протонов: мягкий энергетический спектр с показателем $\gamma \sim 2,7$ (оценка) и $\gamma \sim 3,0$ (наблюдения). Радиоданные дают также правильную оценку масштаба СПС с J_{10} в диапазоне 10 – 250 rfu ($1 \text{ rfu} = 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$) при наблюдаемой интенсивности $J_{10} \sim 100 \text{ rfu}$. К тому же, типичный для событий с мягким радиоспектром временной профиль СКЛ характеризуется медленным нарастанием потока протонов и большой ($\sim 10 \text{ ч}$) задержкой максимальной интенсивности J_{10} относительно пика вспышки. Все это дает основания предполагать, что в данной вспышке преобладало ПЭ энерговыделение и ускорение частиц. Подъем потока J_{10} во второй половине дня 5 сентября до уровня $\sim 200 \text{ rfu}$, скорее всего, связан с вкладом приближающихся к Земле межпланетных СМЕ и ударной волны.

Самое значительное СПС имело место 10 сент. после продолжительной прилиम्бовой вспышки балла X8.2 (Рис. 1). Характеристики и параметры этого СПС типичны для мощных западных протонных событий с существенным вкладом первичного вспышечного ускорения частиц. Поток протонов быстрой компоненты в этом случае достиг $J_{10} \sim 1000 \text{ rfu}$, и после небольшого последующего повышения медленно спадал в течение нескольких суток. Поток быстрой компоненты в каналах $E > 50$ и 100 МэВ был тоже значительным $J_{50} \sim 130 \text{ rfu}$ и $J_{100} \sim 40 \text{ rfu}$. Это указывает на то, что энергетический спектр этого СПС был весьма жестким и имел показатель $\gamma \sim 1.4$. В результате это событие было зарегистрировано на наземных нейтронных мониторах как Ground Level Enhancement (GLE) (см. [6]). Оно получило наименование GLE72 и было только вторым за весь 24-й цикл. Его амплитуда, например, на ст. Москва (ИЗМИРАН) составила $\sim 4\%$ (<http://cosrays.izmiran.ru>). Именно такие характеристики СПС можно было ожидать, исходя из радиационного излучения вспышки 10 сент. (см. Рис. 1). Эта вспышка обладала самым мощным радиовсплеском с $S_{15} \sim 21000 \text{ sfu}$ при резком росте радиопотока вплоть до $f_m \sim 15 \text{ ГГц}$ и, следовательно, наиболее жестким частотным спектром. Соответственно, оценки по радиоданным приводят к значительной интенсивности потока протонов $J_{10} \sim 2600 \text{ rfu}$ и расчетному показателю энергетического спектра при энергиях десятки МэВ в диапазоне $\gamma \sim 1,2-1,7$, близкому к наблюдаемому $\gamma \sim 1,4$. Существенно, что такие оценочные параметры соответствуют не только наблюдаемому масштабу и спектру СПС, но также и зарегистрированному в данном случае GLE.

Самая мощная по рентгеновскому баллу (X9.3) вспышка в 24-ом цикле и СПС 6 сент. имели промежуточные характеристики как по радиоданным, так и по наблюдавшимся параметрам потока протонов. Она сопровождалась радиовсплеском с максимальным потоком на $f_m \sim 15 \text{ ГГц}$ $S_{15} \sim 8100 \text{ sfu}$ и умеренно жестким частотным спектром в микроволновом диапазоне. Соответствующее СПС происходило на фоне сильного межпланетного возмущения и имело $\gamma \sim 1.5$ при $J_{10} \leq 40 \text{ rfu}$.

Проведенный анализ дает основания заключить, что применение методики количественной радиодиагностики протонных вспышек, разработанной в ИЗМИРАН, к серии мощных вспышек сентября 2017 г. приводит, в целом, к положительным результатам (см. также [5, 7]). Методика позволила по радиоданным: (1) правильно выделить три дискретные СПС и затем (2) достаточно корректно оценить масштаб и, что особенно важно, (3) энергетический спектр СПС, связанных как с ПЭ фазой (4 сент.), так и с первичным вспышечным ускорением (10 сент.). Это еще раз демонстрирует, что данные о радиовсплесках могут быть с успехом использованы как для анализа, так и для заблаговременных оценок интенсивности и энергетического спектра потоков протонов, в частности, с применением методики ИЗМИРАН.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 17-02-00308).

Литература

1. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Определение параметров солнечных протонов в окрестности Земли по радиовсплескам. I. Функция интенсивности // Геомагн. аэрономия. Т. 17. С. 10–15. 1977.
2. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Результаты количественной диагностики протонных вспышек по данным о радиовсплесках за контрольный интервал 1970–1977 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 20. С. 385–393. 1980.
3. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Оценки параметров потоков протонов по характеристикам радиовсплесков на частотах 15–19 ГГц // Phys. Solariterr. No. 17. P. 135–143. 1981.
4. Черток И.М. Оценки показателя энергетического спектра протонов по данным о солнечных микроволновых всплесках // Геомагн. и аэрономия. Т. 22. С. 182–186. 1982.
5. Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // Геомагн. и аэрономия. Т. 58. № 4. 2018.
6. Kurt V., Belov A., Kudela K., Yushkov B. Some characteristics of GLE on 2017 September 10 // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. V. 48. P. 329–338. 2018.
7. Chertok I.M. Powerful solar flares of 2017 September: correspondence between parameters of microwave bursts and proton fluxes near Earth // Research Notes of the AAS . V. 2. Id. 20. 2018.

О ПРИРОДЕ КОМПЛЕКСОВ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

Язев^{1,2} С.А.

¹ИГУ, г. Иркутск, Россия

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

syazev@gmail.com

ON THE NATURE OF ACTIVITY COMPLEXES ON THE SUN

Yazev^{1,2} S.A.

¹ISU, Irkutsk, Russia

²ISTP SD RAS, Irkutsk, Russia

Some properties of activity complexes (AC) on the Sun (regular ascent of the magnetic flux portions at the same place in the Carrington coordinate system) require an explanation. Three hypotheses linking the phenomenon of AC with a magnetoplasma toroid, with the magnetic tree in the convective zone and with a large-scale convective cell are considered. The argument in favor of the latter hypothesis is given.

Комплексами активности (КА) на Солнце в интерпретации иркутской школы, заложенной В.Г.Баниным [1-2], называются долгоживущие крупномасштабные магнитные структуры, в составе которых одновременно и/или последовательно возникают несколько активных областей (АО). Важным свойством КА является следующее обстоятельство. Вне зависимости от широты возникновения (от 0° до 35°), ядро КА (центральная зона пятнообразования в КА, где пятна наблюдаются на протяжении не менее 3 кэррингтоновских оборотов подряд), отличается кэррингтоновским вращением [3]. Фактически это означает, что в одном и том же месте в кэррингтоновской системе координат на протяжении нескольких месяцев (в отдельных случаях более года) на Солнце происходит последовательное всплытие новых порций магнитного потока, в результате чего формируются новые АО. Ядро КА выглядит как область на поверхности Солнца (фотосферное сечение некоего канала, погруженного в конвективную зону), где регулярно происходит выход новых порций сильных магнитных полей из недр Солнца. Этот феномен требует объяснения.

Одна из гипотез принадлежит Э.И.Могилевскому [4], юбилей которого отмечается в 2018 г. Предполагалось, что на внешней поверхности солнечного ядра могут возникать неоднородности (например, неоднородности температуры и плотности гелия-3), откуда восходящие волны типа солитонов переносят энергию снизу ко дну конвективной зоны. Здесь возникает магнитоплазменный тороид, который, всплывая к фотосфере, усиливает магнитное поле и структурирует его, формируя сложные активные области, характерные для КА. Однако с помощью этой версии сложно объяснить долговременный характер существования КА, где постоянно появляются новые пор-

ции потока магнитного поля – разве что неоднородность неясного происхождения на поверхности ядра Солнца также существует много месяцев.

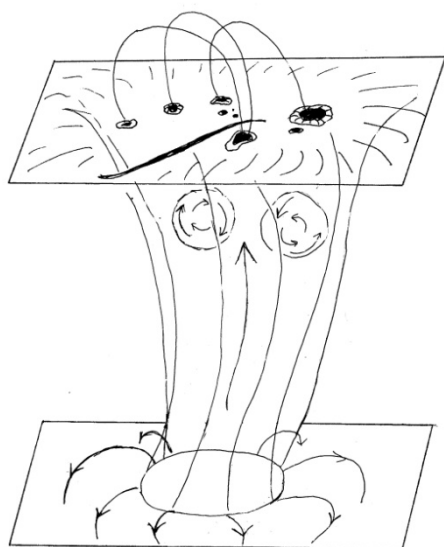


Рис. 1. Иллюстрация применения гипотезы Э.И.Могилевского к модели КА. Верхняя плоскость – уровень хромосферы, нижняя – дно конвективной зоны. На хромосфере – АО в ядре КА. На дне конвективной зоны формируется магнитоплазменный тороид, порождаемый солитоном от неоднородности на поверхности ядра Солнца. Всплывающий тороид структурирует поле вблизи поверхности, формируя под фотосферой субконвективный вихрь Хилла, а на фотосфере – АО.

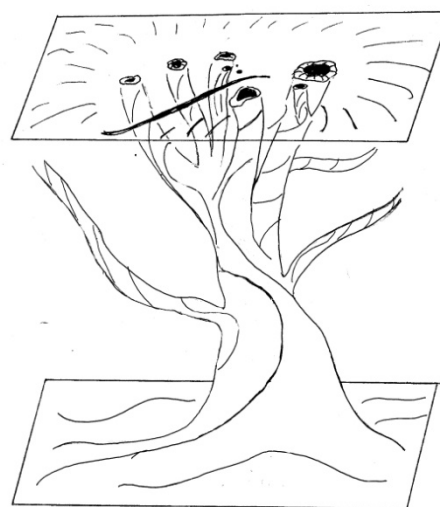


Рис. 2. Иллюстрация применения гипотезы Дж. Пиддингтона к модели КА. Пятна АО (ядро КА) связаны с сечением «ствола» магнитного дерева, закрепленного на дне конвективной зоны и поэтому вращающегося с кэррингтоновской скоростью.

Еще одна гипотеза (строго говоря, имеющая отношение к попытке объяснения не КА, а феномена солнечных пятен) принадлежала Дж. Пиддингтону [5] (Ю.Паркер назвал эту концепцию «пиддингтоновской ересью»). Согласно этой версии, магнитное поле АО имеет структуру, подобную структуре дерева. Фотосферное сечение «ствола» магнитного дерева проявляется в виде пятна, а ветви, отматывающиеся от центрального «магнитного жгута», всплывая на уровень фотосферы, порождают факелы и узелки хромосферной сетки на периферии АО (рис. 2). Критика концепции Пиддингтона была связана с данными гелиосейсмологии, подтвердившими, что пятна – суть околоповерхностные образования, которые формируются не глубже 5 Мм ниже фотосферы. Позднее методами гелиосейсмологии удалось выявить неоднородность на глубине 75 Мм за двое суток до появления активной области [6] (впрочем, речь идет о нестандартной суперобласти в октябре 2003 г.). Но и 75 Мм – явно недостаточно для модели, предусматривающей обязательную связь поверхностных структур с дном конвективной зоны для объяснения кэррингтоновской скорости вращения долгоживущего ядра КА.

Третья гипотеза, предложенная В.И.Сидоровым и С.А.Язевым [7-8], связывает с КА гигантские конвективные ячейки, простирающиеся до дна конвективной зоны, вращающейся недифференциально с кэррингтоновской скоростью. Согласно этой концепции, в центральной части ячейки горячая плазма поднимается к фотосфере и выше, растекается к периферии ячейки по квазигоризонтальным фибриллам и нитям и погружается обратно до дна конвективной зоны. Вмороженное в плазму магнитное поле концентрируется на дне в центральной части ячейки, «сгребаемое» потоком плазмы. Магнитная плавучесть ускоряет всплытие в центре ячейки. В итоге здесь формируется ядро КА – область квазивертикальных магнитных полей, в том числе сильных полей пятен и флоккул. Пока существует ячейка, в ее центральной части могут периодически всплывать новые порции магнитного потока (новые АО) фактически на том же месте, что и ранее.

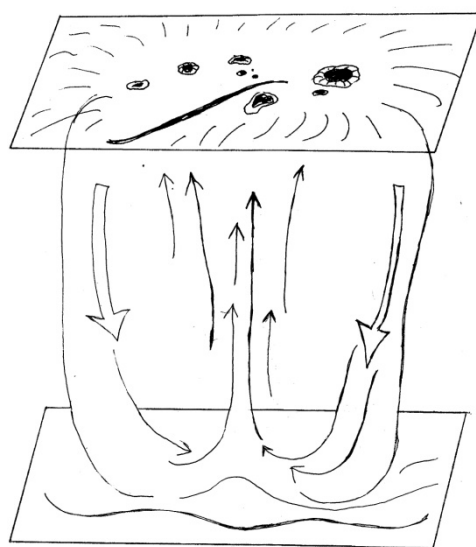


Рис. 3. Иллюстрация применения гипотезы В.И.Сидорова и С.А.Язева к модели КА. Квазистационарная циркуляция плазмы с вмороженным магнитным полем формирует ядро КА в центре крупномасштабной долгоживущей конвективной ячейки с характерным размером порядка глубины конвективной зоны

Вопрос о том, какая из упомянутых или иных гипотез (или какое их сочетание) является адекватной, остается открытым. Изучение многоядерных КА в 24 цикле показало, что поблизости от ядра КА спустя 1-3 кэррингтоновских оборота на расстоянии порядка 400 тысяч км (удвоенная глубина конвективной зоны) довольно часто формируется новое ядро КА, – как правило, к западу (в 63% случаев) от ранее существовавшего ядра. Если новое ядро КА возникало к западу от уже существующего, в 74% случаев оно оказывалось ближе к экватору на 2-5°, чем предыдущее; если формировалось к востоку, то в 64% случаев оно появлялось на большей широте.

Схожие закономерности отмечены и для 22, и для 23 циклов [8]. Иногда цепочка возникновений новых ядер КА состояла из десятка звеньев и про-

должалась больше года. Можно предположить, что само существование гигантской конвективной ячейки как основы для ядра КА увеличивает (или инициирует) вероятность формирования по соседству еще одной сходной структуры. По-видимому, именно таким образом формируются многоядерные КА.

С точки зрения автора, описанные свойства динамики многоядерных КА свидетельствуют в пользу третьей гипотезы о происхождении КА. Тем не менее, для решения вопроса о происхождении КА на Солнце необходимо продолжение исследований этого феномена.

Работа выполнена при поддержке базовой части госзадания по науке ИГУ (проект 3.9620.2017/БЧ Минобрнауки РФ).

Литература

1. Банин В.Г. Комплекс активности и большие вспышки в мае 1981 года. – Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.Наука, 1983, вып. 65, С. 129-150.
2. Банин В.Г., Боровик А.В., Язев С.А. Комплексы активности на 1705-1709 оборотах. Солнечные данные, 1988, № 5, С. 82-88.
3. Язев С.А. Комплексы активности на Солнце в 24-м цикле солнечной активности / Астрономический журнал.– 2015, том. 92, № 3.– С. 260-269.
4. Могилевский Э. И. Импульсы солнечной активности М. Н. Гневышева в свете современных наблюдений // Современные проблемы солнечной цикличности : тр. конф., посвящ. памяти М. Н. Гневышева и А. И. Оля. СПб. : ГАО РАН, 1997. С. 164–167.
5. Пиддингтон Дж. Солнечные магнитные поля и конвекция. Обзор теории первичного поля // Проблемы солнечной активности. М. : Мир, 1979. С. 173–202.
6. Pionidis S., Zhao J., Kosovichev A. Detection of emerging sunspot regions in solar interior // Science. 2011. August 19, vol. 333. P. 993–996.
7. Язев С. А., Сидоров В. И. Феномен комплексов активности на Солнце. Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы : тр. X конф. мол. ученых. Иркутск : ИО ИСЗФ СО РАН, 2007. С. 65–71.
8. Язев С.А. Феномен комплексов активности на Солнце. / Иркутск, изд-во ИГУ, 2014, 377 С.

АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ КАК ФОРМА ПРОЯВЛЕНИЯ КОСМО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Якушин Л.М.

Москва, Россия

lm Yakushin3709@mail.ru

THE ATMOSPHERE OF THE EARTH AS A FORM OF MANIFESTATION OF COSMOS-EARTH RELATIONS

Yakushin L.M.

Moscow, Russia

The atmosphere of the Earth is divided by different classifications and parameters into separate structural elements. The report attempts to identify the main processes that cause the formation of a certain structure of the atmosphere.

По различным классификациям, атмосфера Земли подразделяется на отдельные слои по вертикали (структурные элементы). Разные классификации отличаются по характеру изменения используемого основного параметра: давления, температуры, концентрации электронов и другие. При этом барометрическое распределение давления связывается с весом вышележащей атмосферы. На изменение по высоте температуры и концентрации электронов оказывают влияние магнитные и электромагнитные поля и другие факторы.

В соответствии с представлениями классической физики, для Галилея и Ньютона главным предметом поиска был закон движения, объект движения был очевиден — это частицы (тело) в механике, жидкость в гидродинамике, Ситуация меняется во второй половине 19 века в связи с появлением электро- и термодинамики, где вопрос уже стоял о самом объекте, в том числе о физических полях.

В работах Яковскового И.О., Ацюковского В.А., Блинова В.Ф. и в наших работах [1-5] сделана попытка вскрыть физическую сущность полей весомой материи путём выхода на более тонкий уровень её дискретности, далее неделимые частицы (амеры). Из последних состоят как поля, так и другие, более сложные формы материи от «элементарных частиц» вещества до галактик. При этом мы исходили из всеобщего свойства материи — её движения с образованием динамических структур различного иерархического уровня. Это направление мы трактуем как кинетическую картину мира (ККМ).

Ниже мы кратко рассмотрим структурные элементы атмосферы Земли, их формирование и устойчивость с позиции как господствующих представлений в настоящее время, так и интерпретацию их с позиций ККМ. В ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная, параметры» представлены зависимости давления и плотности атмосферы от высоты над уровнем моря до 500 км. Они отвечают логарифмической зависимости, но градиенты давления и плотности на 1 км высоты (в полулогарифмическом масштабе) не постоянны

и на отдельных отрезках прямых значительно отличаются, как для давления, так и плотности атмосферы. На высотах от 0 до 90 км градиенты практически равны для указанных зависимостей, но выше соответствующие прямые постепенно расходятся.

Значительные изменения градиентов по вертикали, в основном, связано со слоями повышенной температуры атмосферы. Сами же величины давления изменяется с высотой от 10^5 Па на уровне океана до $3,0 \cdot 10^{-7}$ Па на высоте 500 км, а плотность, соответственно, от 1,22 до $5,2 \cdot 10^{-13}$ кг/м³. В тоже время, в соответствии с нашей работой «Физические поля и их взаимодействие между собой и веществом» [5] указанная плотность атмосферы на высоте 500 км на три порядка меньше плотности эфира ($3,1 \cdot 10^{-10}$ кг/м³).

Попытаемся прокомментировать распределение давления и плотности атмосферы по вертикали из представления гравитационного поля как потока эфира, поглощаемого Землёй. Наличие наибольшего давления и плотности атмосферы у поверхности земли, уменьшающееся при удалении от неё. Это должно приводить к диффузионному потоку газа вверх, для выравнивания его плотностей. Но этого не происходит, так как образуется динамическое равновесие между противоположно направленными потоками газа и эфира. Это равновесие нарушается за счёт движения циклонов и антициклонов, которые в свою очередь формируются за счёт неравномерного по площади и во времени потоков солнечного излучения,

На рисунке 1 представлен график распределения температуры в атмосфере Земли. В самом нижнем из слоёв — тропосфере (h J 11 км) температура падает на высоты 350 км и выделение в ней слоёв по различным классификациям. $6,5^\circ$ С каждым км. Через тропопаузу, в среднем на высотах от 12 до 50 км, тропосфера переходит в стратосферу.

На больших высотах значение и знак вертикального градиента температуры меняются от слоя к слою, а начиная с высоты 400 км температура достигает 995 К и практически не меняется с высотой.

Для определения влияния температуры на другие параметры атмосферы Земли необходимо уточнить физический смысл понятия теплоты. Френсис Бэкон впервые высказал идею, что тепло есть движение. Представление о том, что тепло связано с движением мельчайших частиц вещества было распространено в учёном мире в 17 и первой половине 18 века.

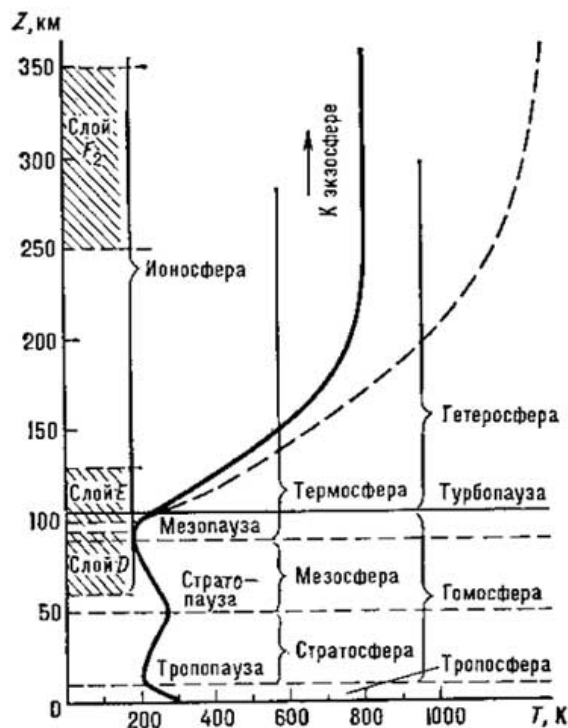


Рис. 1. График распределения температуры в атмосфере до высоты 350 км и выделение в ней слоёв по различным классификациям.

Во второй половине вновь стала преобладать субстанциональная теория теплоты. Эта теория, основателем которой считается Платон, постулировала существование флюида — теплорода, ответственного за тепловые явления. Теплород считался невесомым, рассеянным по всей материи, способным проникать в тела, сочетаться с ними и превращать твёрдые тела в жидкости, а жидкие переводить в газообразные состояния. Анализируя две теории о связи движения частиц материи с понятием теплоты можно констатировать, что теория, связанная с введением понятия теплорода — то есть с более тонкой невесомой субстанцией, является практически близкой с понятием эфира. К этому лишь надо добавить, что в газообразном или другом фазовом состоянии вещества плотность эфира должна увеличиваться в процессе роста температуры. Только за счёт этого может увеличиться скорость движения атомов или молекул (как броуновское движение по сравнению с движением амеров). С высоты около 20 км (температура около 220 К) она растёт с высотой, достигая максимума около 270 К на высоте 50 – 55 км. В качестве причины увеличения температуры в этой области приводится фотохимическая реакция разложения озона.

Выше мезопаузы начинается термосфера, в которой температура, сначала медленно, а потом быстро вновь начинает расти. Причиной считается поглощение ультрафиолетового, излучения Солнца на высотах 150 – 300 км, обусловленное ионизацией атомарного кислорода. Таким образом, появляются свободные электроны и ионы атмосферы, в основном связано с разрушением электронов и переходом их в эфирное состояние [4,5]. Процесс же

вырывания электрона из атома, превращения его в свободный электрон, а также присоединение его к нейтральному атому, с образованием отрицательного иона, хорошо иллюстрируется не планетарной моделью атома.

Связь теплоты, относительного холода, изменения энергии мы находим в работе Богачева С.А. «Солнечные нано вспышки» [6], в которой указывается, что с одной стороны в фотосфере имеется температурный минимум (около 5800 К), с другой стороны солнечная корона раскалена до 2 млн. градусов, хотя термодинамика говорит нам, что тепло не может передаваться от холодного тела к горячему. По нашему мнению, здесь мы явно сталкиваемся с парадоксом. Исходя из представления, о связи температуры с плотностью эфира, указанный минимум температуры мог образоваться в результате следующих процессов: расхода здесь части эфира на восстановление позитрон-электронных пар, после вырывания электронов из атомов (водорода, гелия); формированием восходящего потока свободных электронов из фотосферы в хромосферу и корону. При этом происходит рост температуры с высотой за счёт превышения процесса разрушения свободных электронов (с переходом их в эфирное состояние).

Таким образом, изменение температуры связано с процессом преобразования форм существования материи в системе (а не разных форм энергии), то есть через переформировку второго начала термодинамики. Указанный процесс можно рассматривать как одну из форм круговорота эфира в природе [7].

Более подробно эти вопросы рассматриваются и обосновываются в сборнике наших статей «Аспекты кинетической картины мира» [5].

Литература

1. Ярковский И.О. Всемирное тяготение как следствие образования весомой материи внутри небесных тел. М.: 1889.
2. Ацюковский В.А. Общая эфиродинамика. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Блинов В.Ф. Растущая Земля: из планет в звезды. - М.: Едиториал УРСС, 2003.
4. Якушин Л.М. Физические поля и их взаимодействие между собой и веществом// Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых
5. Якушин Л.М. Аспекты кинетической картины мира. Сборник статей. LAMBERT Academic Publishing.
6. Богачев С.А. Солнечные нановспышки// Техника молодежи, 2013, №8.
7. Якушин Л.М. Существующие и новые физические модели эруптивных процессов на Солнце// Аспекты кинетической картины мира. Сборник статей. LAMBERT Academic Publishing, 2015.