

Воздействие гравитационной волны, приводящее к появлению разницы длин плеч, крайне мало — в интерферометре AdLIGO предполагается зарегистрировать разностное смещение порядка $10^{-17} - 10^{-16}$ см за время $\sim 10^{-2}$ с при длине плеча 4 км. Регистрация такого малого смещения предполагает чрезвычайно малые смещения зеркал, вызванные другими причинами — тепловыми, сейсмическими и техническими шумами. Даже незначительные смещения зеркал приводят к тому, что лучи приходят к светоделителю с изменёнными фазами, имитируя тем самым обнаружение гравитационной волны.

Для предсказания неустойчивых комбинаций мод необходима полная информация как об упругих модах, так и об оптических стоксовых модах. Частоты и распределения оптических полей на поверхностях зеркал легко рассчитываются аналитически для гауссовых мод резонатора Фабри–Перо [25], в то время как частоты и распределения вектора смещений для упругих мод определяются только численно. (Используется метод суперпозиции в применении только к аксиально-симметричным упругим модам цилиндрического зеркала [26].) Из условия (3) видно, что собственные частоты упругих мод должны иметь ошибку расчёта, меньшую, чем значение коэффициента затухания оптической стоксовой моды. При типичных значениях механических частот в интервале от 10 кГц до 100 кГц и времени оптической релаксации, соответствующего частотному интервалу 10–100 Гц, это означает, что относительная точность численного расчёта частот упругих мод должна быть не хуже 10^{-4} . Это требование не всегда выполняется при расчёте упругих мод с использованием, например, численного пакета COMSOL. Заметим также, что неоднородности в распределении плотности, модуля Юнга материала зеркала могут приводить к сдвигу частот упругих мод на уровне 10^{-3} . Например, при использовании пакета ANSYS для численного решения сеточных задач точность расчёта упругих мод составила около 0,5% [8–10, 27]. Таким образом, существующая точность расчёта упругих мод является недостаточной.

К этому надо добавить неточность, вносимую вследствие неоднородности материала зеркал, например, для плавленого кварца относительные вариации плотности находятся на уровне $\delta\rho/\rho \approx 10^{-3}$.

3. Заключение

Итак, перечислим возможные пути избежать параметрической неустойчивости в лазерных гравитационных антенных второго поколения.

Во-первых, можно искать предвестники, т.е. обнаруживать слабые колебания на стоксовых и механических частотах. Это позволит внести малошумящее затухание в акустические моды или изменить спектр оптических мод.

Во-вторых, поскольку теоретический и численный анализ недостаточен, необходимо наблюдение параметрической неустойчивости в реальной антенне. Это позволит отрабатывать различные методики подавления неустойчивости.

Третий путь — понизить оптическую мощность, циркулирующую в плечах интерферометра. Дело в том, что в гравитационных антенных второго поколения предполагается достичь точности стандартного квантового предела [5] на частотах около 100 Гц. Эта частота

определяется хорошим качеством изоляции от сейсмических шумов. Важно, что необходимая оптическая мощность пропорциональна кубу частоты. Поэтому если удастся перейти от частоты 100 Гц к частоте 30 Гц, то циркулирующая мощность существенно уменьшится — вместо 800 кВт достаточно будет иметь около 20 кВт. Кроме того, в более низком диапазоне частот интенсивность гравитационного излучения, согласно прогнозу, возрастёт.

Список литературы

1. Мигулин В *Труды ФИАН* (3) 77 (1938)
2. Мигулин В *Радиотехника и электроника* 5 995 (1960)
3. Мигулин В *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3* (6) 67 (1960)
4. Мигулин В В и др. *Основы теории колебаний* (М.: Наука, 1978) [Migulin V V et al. *Basic Theory of Oscillation* (Moscow: Mir, 1983)]
5. Брагинский В Б *Физические эксперименты с пробными телами* (М.: Наука, 1970)
6. Braginsky V B, Strigin S E, Vyatchanin S P *Phys. Lett. A* **287** 331 (2001)
7. Braginsky V B, Strigin S E, Vyatchanin S P *Phys. Lett. A* **305** 111 (2002)
8. Zhao C et al. *Phys. Rev. Lett.* **94** 121102 (2005)
9. Ju L et al. *Phys. Lett. A* **355** 419 (2006)
10. Ju L et al. *Phys. Lett. A* **354** 360 (2006)
11. Polyakov I A, Vyatchanin S P *Phys. Lett. A* **368** 423 (2007)
12. Kippenberg T J et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 033901 (2005)
13. Matsko A B et al. *Phys. Rev. A* **71** 033804 (2005)
14. Rokhsari H et al. *Opt. Express* **13** 5293 (2005)
15. Savchenkov A A et al. *Phys. Rev. Lett.* **101** 093902 (2008)
16. Grudinin I S, Yu N, Lute M *Opt. Lett.* **34** 878 (2009)
17. Del'Haye P et al. *Nature Photon.* **3** 529 (2009)
18. Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A *Science* **332** 555 (2011)
19. Kells W, D'Ambrosio E *Phys. Lett. A* **299** 326 (2002)
20. Abramovici A et al. *Science* **256** 325 (1992)
21. Sigg D et al. (for the LIGO Scientific Collab.) *Class. Quantum Grav.* **25** 114041 (2008)
22. Acernese F et al. *Class. Quantum Grav.* **25** 114045 (2008)
23. Grote H (for the LIGO Scientific Collab.) *Class. Quantum Grav.* **25** 114043 (2008)
24. Takahashi R et al. (TAMA Collab.) *Class. Quantum Grav.* **25** 114036 (2008)
25. Kogelnik H, Li T *Appl. Opt.* **5** 1550 (1966)
26. Meleshko V V, Strigin S E, Yakymenko M S *Phys. Lett. A* **373** 3701 (2009)
27. Gras S, Blair D G, Zhao C *Class. Quantum Grav.* **26** 135012 (2009)

PACS numbers: 91.25.Mf, 94.30.-d, 96.60.-j

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203h.0327

Солнечно-земная физика и её приложения

В.Д. Кузнецов

1. Введение

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН (ИЗМИРАН), которым Владимир Васильевич Мигулин руководил в течение почти 20 лет (с 1969 г. по 1988 г.), является политехническим институтом. В нём представлены разные разделы физики: астрономия и астрофизика, геофизика, радиофизика и физика плазмы, ядерная

В.Д. Кузнецов. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН, г. Троицк, Московская обл., РФ. E-mail: kvd@izmiran.ru

физика и т.д. Солнечно-земная физика, которая изучает процессы в системе Солнце–Земля, является одним из магистральных направлений ИЗМИРАН. В.В. Мигулин как директор ИЗМИРАН и как председатель Научного совета РАН по проблеме солнечно-земных связей (Совет "Солнце–Земля") в течение многих лет был связан с солнечно-земной физикой, руководил целым рядом программ и проектов.

Солнечно-земная физика сегодня, наряду с изучением фундаментальных явлений и процессов в системе Солнце–Земля, имеет много практических приложений, связанных с различными сферами человеческой деятельности [1]. Последнее время для обозначения этой области исследований используется более широкий термин — гелиофизика [2], поскольку стало ясно, что не только явления на Солнце, но и многие процессы, которые происходят в гелиосфере — огромной области вокруг Солнца, заполняемой солнечным ветром, также влияют на Землю и земные процессы.

Для понимания процессов в системе Солнце–Земля необходимо прежде всего понять, как устроено и как работает Солнце, что представляет собой космическое окружение, в котором находится Земля, и как оно изменяется.

2. Модель Солнца — от ядра до гелиопаузы

Современная модель Солнца включает в себя плотное ядро ($\sim 160 \text{ г см}^{-3}$) размером около одной четверти радиуса Солнца, в котором происходят термоядерные реакции и связанное с ними выделение энергии. Эта энергия в виде излучения переносится через радиационную зону во внешние слои, где на расстоянии, немного большем двух третей солнечного радиуса от центра, образуется конвективная зона, в которой отвод тепла из внутренних слоёв наружу более эффективен уже не за счёт лучистой теплопроводности, а за счёт движений плазмы. Далее идут слои внешней атмосферы Солнца — тонкая фотосфера, которую мы видим невооружённым глазом, хромосфера, переходный слой и корона, которая переходит в солнечный ветер, формирующий гелиосферу (рис. 1).

Информацию о процессах в ядре Солнца мы получаем по наземным измерениям нейтрино [3]. Методы

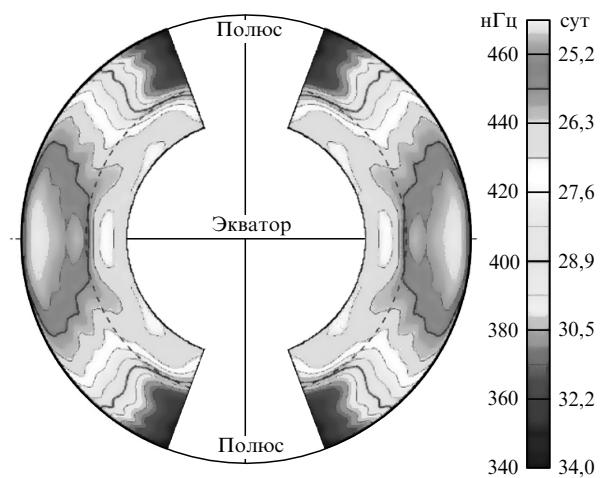


Рис. 2. Профиль угловой скорости дифференцированного вращения по сечению конвективной зоны [5].

гелиосеймологии по наблюдениям на поверхности Солнца его глобальных колебаний позволяют моделировать строение и динамику внутренних слоёв [4]. Внутри Солнца вращается дифференцированно — скорость вращения зависит от глубины и широты (рис. 2), приэкваториальные зоны врачаются быстрее, чем высок широтные, с глубиной скорость вращения возрастает. Штриховая линия на рис. 2 — это так называемая область тахоклина, в которой имеется резкий скачок угловой скорости, т.е. движения носят сдвиговый характер. Именно эта область, особенно там, где градиенты угловой скорости максимальны, считается основным элементом солнечного динамо и основным генератором магнитного поля.

Дифференцированный характер вращения Солнца проявляется в том, что на экваторе плазма вместе с вмороженным в неё магнитным полем движется быстрее, чем на высоких широтах. В результате из полоидального поля Солнца в конвективной зоне образуется тороидальное магнитное поле, которое усиливается и в какой-то момент вследствие эффекта магнитной плавучести всплывает из конвективной зоны на поверхность Солнца, образуя там области сильного магнитного поля — солнечные пятна и активные области, порождающие во внешней атмосфере Солнца различные спорадические явления.

Солнечное пятно представляет собой выход на поверхность фотосфера магнитной силовой трубки, величина поля в которой может достигать 4000 Гс. Это сильное поле подавляет конвекцию, которая приносит тепло снизу, поэтому выход магнитной трубки на поверхность фотосфера выглядит более тёмным по сравнению с окружающей горячей фотосферой, оправдывая само название "пятно". Температура пятна примерно на 1000°C меньше окружающей (4500°C), и такое пятно на фотосфере является указанием на наличие сильных магнитных полей, которые генерируются, передаются, распадаются и диссирируют в течение солнечного цикла.

За последние годы, начиная с 1996 г. (23-й и 24-й солнечные циклы), наблюдается уменьшение напряжённости поля пятен (рис. 3) со средней скоростью около 50 Гс в год [6]. Экстраполяция этой тенденции свидетель-

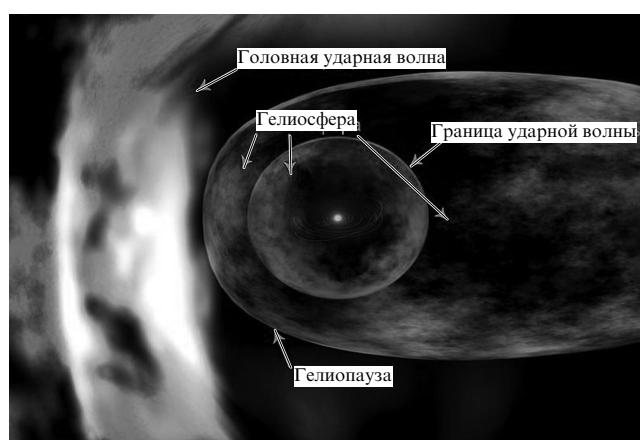


Рис. 1. Гелиосфера — область от Солнца до гелиопаузы (границы с межзвёздной средой). (Обработанное изображение с сайта NASA (см. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>)).

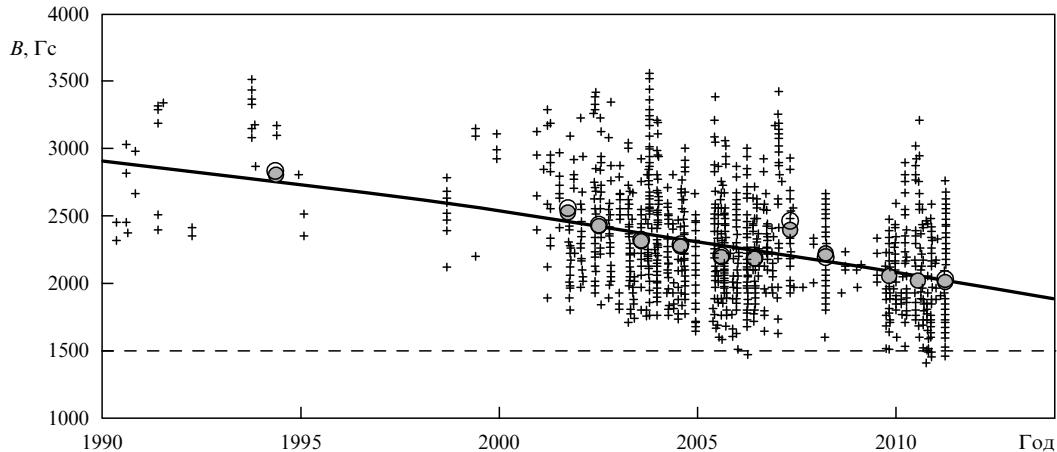


Рис. 3. Уменьшение напряжённости магнитного поля солнечных пятен со временем, согласно В. Ливингстону и М. Пену [6].

ствует об исчезновении активности солнечных пятен в конце текущего десятилетия, т.е. к 2020 г., что считается аномалией в поведении Солнца и с чем связываются аномалии и на Земле (похолодание и т.д.), по аналогии с теми, которые наблюдались в прошлые годы, о чём будет сказано в разделе 3. При уменьшении напряжённости поля в пятнах до 1500 Гс они становятся невидимыми на фотосфере и исчезает возможность отслеживания динамики магнитных полей в 11-летнем солнечном цикле по пятнам. Сохраняется ли при этом сам солнечный цикл — остаётся вопросом. Возможно, в период маундеровского минимума (1640–1710 гг.) на Солнце была такая ситуация, при которой солнечных пятен не было видно, а сам цикл продолжался, и когда магнитное поле в пятнах опять возросло, то они стали видны и наблюдения циклов по пятнам возобновились и продолжаются вплоть до настоящего времени.

Наблюдаемое уменьшение напряжённости магнитного поля в солнечных пятнах, о котором сказано выше, может служить аргументом в пользу того, что на Солнце возможно наступление периода типа маундеровского минимума. Причина такого явления пока не раскрыта, и ответ на этот вопрос следует искать в динамо-процессе генерации магнитного поля. Здесь возникает также вопрос о той компоненте магнитного потока в солнечном цикле, которая содержится в невидимых пятнах с малой напряжённостью магнитного поля: сколько таких пятен, а также какова величина этого потока?

2.1. Вспышки и выбросы

Всплытие магнитных полей из-под фотосферы на поверхность Солнца порождает в его атмосфере топологически сложные магнитные конфигурации, которые деформируются непрекращающимися конвективными движениями на фотосфере, генерируют в плазменной атмосфере сильные токи и в конечном счёте становятся неустойчивыми, приводя к многочисленным активным явлениям, которые имеют нетепловую природу и характеризуются нестационарными плазменными процессами, ускорением частиц, различными видами излучений и т.д.

К наиболее мощным проявлениям спорадической солнечной активности относятся вспышки и выбросы массы, которые обладают наибольшей геоэффективностью в смысле их воздействия на Землю. Сегодня

основная проблема в изучении солнечных вспышек и выбросов массы состоит в том, чтобы понять их триггерные механизмы [7]. Мы не умеем их прогнозировать, и это является одной из проблем солнечно-земной физики, которая может быть решена на основе более детальных наблюдений за эволюцией магнитных полей в активных областях и на основе постоянно совершенствующихся моделей. Ещё в 1979 г. В.В. Мигулин совместно с М.М. Молоденским и С.И. Сыроватским предложили подход к решению этой проблемы на основе теории токовых слоёв Сыроватского [8]. Сегодня эта теория полностью подтвердилась данными наблюдений, и, возможно, именно на её основе будут созданы методы прогнозирования вспышек.

2.2. Солнечный цикл

Солнце, как известно, испытывает 11-летний солнечный цикл, состоящий в изменении числа солнечных пятен во времени. Хотя цикл называется 11-летним, длительность периода цикла изменяется в пределах от 8–9 до 13–14 лет. Изменяется и амплитуда солнечных циклов — усреднённое относительное число солнечных пятен в максимуме цикла. В основе объяснения солнечного цикла лежит квазипериодическое действие магнитогидродинамического динамо-процесса в конвективной зоне Солнца, однако пока мы не умеем уверенно предсказывать предстоящие циклы — их длительность, амплитуду и другие характеристики.

Одна из гипотез о причине изменения периода и амплитуды солнечных циклов связана с разбиением вихря меридиональной циркуляции в конвективной зоне на два вихря (рис. 4), что меняет время циркуляции большого вихря. Другая гипотеза основана на нелинейном характере динамо-процесса — влиянии магнитного поля на движения, приводящие к усилению поля [9]. В разрабатываемом сейчас солнечном космическом проекте "Интергелиозонд" [10] предполагается провести наблюдения приполярных областей Солнца и более детально изучить эффекты взаимодействия магнитных полей и движений плазмы.

Недавно на основе наземных наблюдений установлено, что зональные течения (в направлении восток–запад) внутри Солнца, или так называемые торсионные колебания, которые испытывают регулярные изменения по широте, связаны с солнечным циклом [11]. Проис-

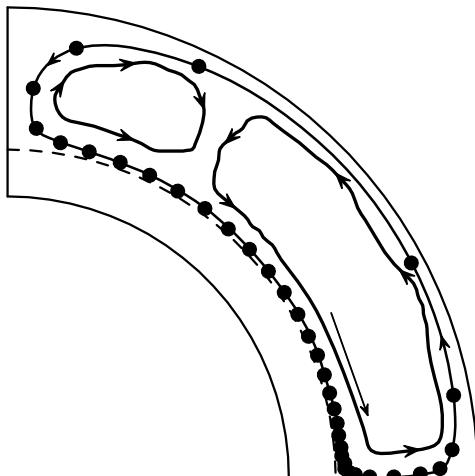


Рис. 4. Распад вихря меридиональной циркуляции как одна из гипотез о причине изменения длительности и амплитуды 11-летних солнечных циклов.

хождение таких изменяющихся зональных течений, исходящих из глубин конвективной зоны, пока не выяснено. Широта, на которой обнаруживается такое зональное течение, определяет широту нового пятнообразования в каждом цикле. Наблюдения этих течений позволили успешно предсказать задержку начала текущего, 24-го, солнечного цикла (2008 – 2019 гг.), которая произошла по причине ослабления этих течений. Ождалось, что в 2011 г. можно будет увидеть начало зонального течения, отвечающего за следующий, 25-й, цикл, однако проявлений этого течения пока не обнаружено. Это указывает на то, что 25-й цикл может начаться в 2021 – 2022 гг. (а не в 2019 г.) или не начаться совсем [12].

Обычно в солнечном цикле происходит перенос распадающихся магнитных полей к полюсам Солнца, на которых происходит смена знака полоидального поля (рис. 5). По наблюдениям за последние 40 лет [13] обнаружено замедление такого переноса, а в настоящий момент такого переноса к полюсам не происходит, видимо, по причине более позднего наступления 24-го цикла и медленного его развития. Если текущий 24-й цикл, который продолжает оставаться очень слабым, не сможет восстановить такой перенос и заменить поле 23-го цикла полем другого знака, как это происходит обычно, то будет трудно предсказать действие динамопроцесса и поведение Солнца в этой ситуации.

2.3. Солнечный ветер и гелиосфера

Из Солнца непрерывно истекает солнечный ветер — поток заряженных частиц. Солнечный ветер обтекает магнитосферу Земли и является источником геомагнитной возмущённости. На Солнце образуются так называемые корональные дыры, которые видны как тёмные области в короне. Это области открытых силовых линий, из которых истекает высокоскоростной солнечный ветер. Когда Земля попадает в сектор межпланетного магнитного поля, соответствующий корональной дыре на Солнце, то на Земле возникают магнитные бури. Из полюсов Солнца истекает быстрый солнечный ветер ($\sim 800 \text{ км с}^{-1}$), из плоскости экватора — медленный ($\sim 400 \text{ км с}^{-1}$). Приполярные корональные дыры с быстрым солнечным ветром иногда опускаются в пло-

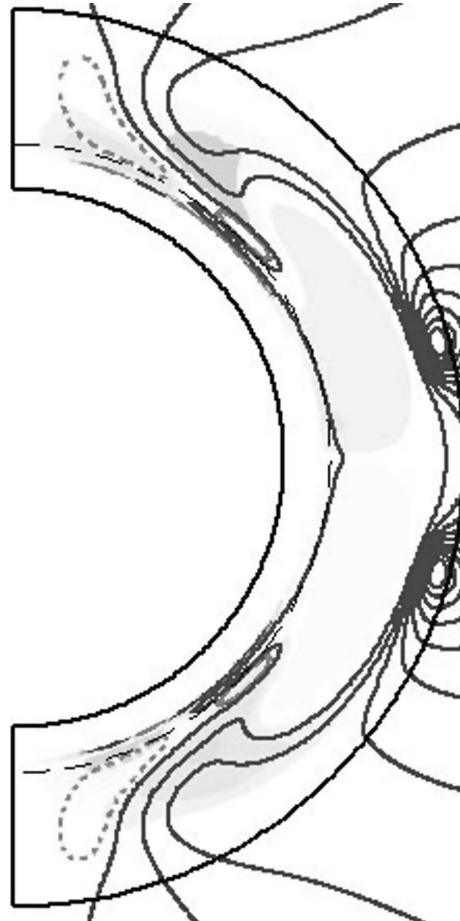


Рис. 5. Изменение знака магнитного поля в полярных зонах Солнца в солнечном цикле вследствие переноса магнитного поля от экватора к полюсам [14] (сплошная и штриховая линии соответствуют полям разного знака).

скостью эклиптики, и Земля попадает в сектор этих высокоскоростных потоков, что сопровождается повышением геомагнитной активности.

Источники солнечного ветра на Солнце неизвестны. Существует предположение, что солнечный ветер истекает из границ хромосферной сетки. Вещество в конвективной ячейке поднимается вверх в её центре и вместе с магнитными полями переносится к краям, где маленькие магнитные петли пересоединяются с петлями другой ячейки, возникает диссиляция поля, нагрев плазмы и давление плазмы вместе с магнитными силами "выдувают" вещество вверх. Из этих потоков и формируется солнечный ветер. Гипотеза будет проверяться в проекте "Интергелиозонд" при наблюдениях Солнца с высоким пространственным разрешением с близких расстояний [10].

Вследствие вращения Солнца межпланетное магнитное поле (ММП) имеет спиральную структуру (рис. 6). Наклон магнитной оси Солнца к плоскости эклиптики ($\sim 7^\circ$), а также наличие активных областей на поверхности Солнца приводят к тому, что гелиосферный токовый слой, который разделяет полярности магнитного поля, помимо спиральной структуры, имеет гофрированную структуру в виде юбочки балерины. Земля при своём орбитальном движении пересекает гофрированную структуру гелиосферного токового слоя, при этом пере-



Рис. 6. Гофрированный и закрученный по спирали гелиосферный токовый слой ("юбочка балерины") и движение Земли вокруг Солнца. (T. Hoeksema).

сечении меняется знак ММП и характер взаимодействия ММП с магнитным полем Земли.

На расстоянии примерно 100 а.е. давление солнечного ветра уравнивается с давлением межзвёздной среды и образуется граница Солнечной системы, которая называется гелиопаузой (контактная поверхность) (см. рис. 1). Так как и солнечный ветер, и набегающий поток межзвёздной среды (вследствие вращения Солнца вокруг центра Галактики) — сверхзвуковые, то при их столкновении образуются две ударные волны по разные стороны от гелиопаузы. Такая сложная и довольно протяжённая структура отделяет Солнечную систему от галактической среды. Размер гелиосферы изменяется в зависимости от мощности солнечного цикла и напора солнечного ветра.

Выше мы рассмотрели основные физические объекты гелиофизики и теперь перейдём собственно к солнечно-земной физике, имея в виду воздействие солнечной активности на Землю и связанные с этим приложения.

3. Приложения солнечно-земной физики

Основные агенты солнечной активности — вспышки, выбросы массы, солнечный ветер — являются источниками космической погоды, которая рассматривается сегодня как неотъемлемая часть среды обитания человека и сфер его деятельности [15]. Солнечная активность возмущает гелиосферу и околоземное космическое пространство, вызывая многообразие солнечно-обусловленных явлений на Земле. Эти явления, происходящие в магнитосфере, атмосфере и ионосфере Земли, а также на её поверхности, влияют на среду обитания и деятельность человека на Земле и в космосе.

Магнитное поле Земли защищает нас от пагубных воздействий солнечной активности — потоков ускоренных заряженных частиц, солнечного ветра и наиболее мощных проявлений солнечной активности — выбросов массы из Солнца. Под действием солнечного ветра магнитосфера Земли вытягивается в направлении от Солнца (рис. 7) и наочной стороне образуется хвост магнитосферы, а дневная сторона магнитосферы поджимается.

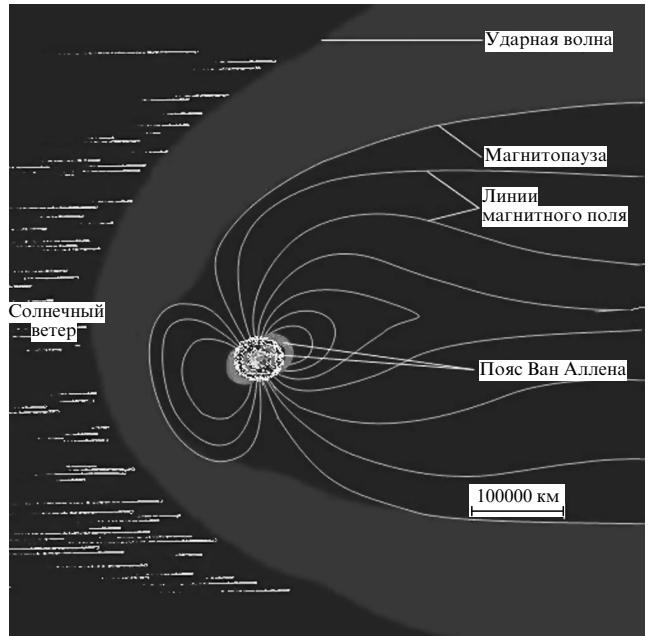


Рис. 7. Структура магнитосферы Земли, формирующаяся в результате её обтекания солнечным ветром.

Внутренняя объёмная структура магнитосферы довольно сложна, она содержит магнитопаузу (границу с солнечным ветром), плазмосферу, токовые системы, каспы. Дневная сторона (лобовая часть) магнитосферы поджата напором солнечного ветра, граничная точка магнитосферы находится здесь примерно на расстоянии 10 земных радиусов, а ночная, вытянутая хвостовая часть магнитосферы прослеживается на расстояниях более 100 земных радиусов.

Распространяясь от Солнца по межпланетной среде, выбросы массы из Солнца и потоки солнечного ветра сталкиваются с магнитосферой Земли, приводя к магнитным бурям. При взаимодействии солнечного ветра и выбросов массы с магнитосферой Земли происходит пересоединение магнитных линий в её хвостовой части, захват частиц и их высыпание в области магнитных полюсов с образованием овала полярных сияний, что является результатом вторжения энергичных частиц в атмосферу и свечения возбуждённых атомов атмосферы.

Наиболее сильны геомагнитные возмущения вблизи магнитных полюсов в зоне овала полярных сияний и на прилегающих территориях. Зоной сильных геомагнитных возмущений обычно охвачены северные регионы России, территории Северной Америки и Скандинавии. Во время очень мощных событий на Солнце в октябре–ноябре 2003 г. полярные сияния были видны в Москве и даже с широты Одессы, откуда следует, что сильные геомагнитные возмущения охватывают значительную часть территории земного шара.

Максимальное число магнитных бурь наблюдается вблизи максимума солнечного цикла, с небольшим смещением вправо от максимума цикла.

Рассмотрим примеры и механизмы воздействий факторов солнечной активности на сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе.

Во время магнитной бури в основе одного из эффектов воздействия лежит закон электромагнитной индукции. Изменение магнитного поля Земли во время магнит-

ной бури вызывает вихревое электрическое поле, которое пронизывает всё пространство, и если имеется замкнутый проводящий контур, то в нём возникает электродвигущая сила и электрический ток [16]. Вихревое электрическое поле во время магнитной бури проявляется в виде короткого, длительностью в несколько секунд, импульса. Величина разности потенциалов составляет около $2-3 \text{ В км}^{-1}$, так что на концах проводника длиной в $70-110 \text{ км}$ возникает напряжение 220 В . Глобальное вихревое электрическое поле во время магнитной бури в первые несколько секунд пронизывает всё околосземное космическое пространство, атмосферу и саму Землю.

В результате во время магнитной бури во всех проводящих системах, как природных (земля, океан, атмосфера, ионосфера, магнитосфера), так и технических (протяжённые линии электропередач, линии связи, нефте- и газопроводы, железнодорожные рельсы и линии электроснабжения и т.д.), возникают так называемые геомагнитно-индукционные токи, которые являются наиболее опасным фактором с точки зрения воздействия на работу вышеуказанных объектов энергоинфраструктуры [17]. Чем больше пространственный масштаб энергосистемы, тем больше индукционный ток и тем сильнее эффект воздействия.

На подстанциях линий электропередач геомагнитно-индукционные токи текут в земле через трансформаторные обмотки и по заземлению, т.е. там, где никаких защитных релейных устройств нет, и в этом состоит опасность. В энергетических системах эти токи приводят к таким опасным эффектам, как насыщение трансформаторов, их перегрев и разрушение, генерация паразитных гармоник тока, а также к нарушению работы защитных реле и, как следствие, к отключению линий электропередач.

Самым тяжёлым последствием сильной магнитной бури была энергетическая катастрофа 13–14 марта 1989 г. в Канаде, в провинции Квебек, когда мощный овал полярных сияний покрыл всю территорию Северной Америки, Северную Европу и северные регионы России, в результате чего вся провинция Квебек, включая столицу Канады Оттаву, на девять часов была отключена от электроэнергии [18].

Рассмотрим кратко последовательность событий в системе Солнце – Земля, приведших к такой катастрофе.

С 5 по 19 марта 1989 г. по диску Солнца проходила активная область, которая пересекла центральный меридиан 12 марта. В течение этого времени данная область произвела 11 рентгеновских вспышек, четыре из которых были большими. Эти вспышки сопровождались выбросами массы в виде облаков плазмы. Выбросы 9 и 10 марта были направлены к Земле. Приход ударных волн и выбросов к Земле был зарегистрирован 13 марта в виде внезапных скачков в записях магнитного поля. Путь от Солнца до Земли ударные волны прошли соответственно за 82 и 61 ч, что отвечает скоростям их распространения в межпланетной среде примерно $500-700 \text{ км с}^{-1}$.

Во время развития магнитной бури в энергосистеме провинции Квебек отключились стационарные компенсаторы переменного тока, что привело к отключению линий электропередач, при этом трансформаторы были разрушены перегрузкой напряжения и в итоге отключилась вся энергосистема.

Не только в Квебеке, но и в США, а также в Европе, в Великобритании, произошло перегорание трансформаторов от перегрева и отключение электроэнергии. Одним из самых опасных моментов этой катастрофы явился выход из строя повышающего трансформатора на атомном заводе в Нью-Джерси, который, к счастью, не привёл к другой катастрофе, но нанёс большой ущерб и заставил непосредственно ощутить и понять реальность и масштабность угрозы, исходящей от влияния космической погоды.

За всё время наблюдений самым мощным считается солнечное событие 1 сентября 1859 г. — так называемое Каррингтонское событие [19], при котором возмущение от мощной солнечной вспышки дошло до Земли за рекордно короткое время (17,5 ч) и вызвало сильнейшую магнитную бурю. В Америке и Европе были зарегистрированы серьёзные нарушения телеграфной связи, продолжавшиеся несколько часов. Ночью полярные сияния наблюдались там, где их никогда ранее не наблюдали: в Риме, Гаване, на Гавайях и даже вблизи экватора. Если бы событие такой мощности, которая превысила мощность Квебекского события в несколько раз, произошло сегодня, в эпоху развитой технической инфраструктуры общества, то, по оценке специалистов, оно имело бы последствия намного более тяжкие, чем последствия Квебекского события [20]. Таким образом, природа уже предупредила, что развитие технических систем достигло уровня, при котором воздействие на них факторов космической погоды может привести к серьёзным катастрофам [21].

Геомагнитно-индукционные токи в периоды магнитных бурь, регулярно регистрируемые в энергетических сетях стран Северной Америки и Северной Европы, приводят к нештатной работе энергосистем, с чем связаны экономические ущербы, вопросы технической безопасности производств и многие другие аспекты жизни общества.

Трубопроводы, нефтяные и газовые, также подвержены воздействиям со стороны геомагнитно-индукционных токов [22]. Примером может служить регулярная регистрация таких токов в Аляскинском трубопроводе, где их величина может достигать нескольких сотен ампер. Геомагнитно-индукционные токи в трубопроводах изменяют электрический потенциал трубы и тем самым нарушают систему защиты от коррозии. Там, где потенциал выше критического, на трубопроводах образуются локализованные коррозийные пятна, приводящие к сокращению срока службы трубопровода. Время жизни трубопровода оценивается в 20–40 лет, а коррозийные пятна, связанные с эффектом геомагнитно-индукционных токов, возникают уже через три года.

В Архангельской области на Северной железной дороге регулярно возникают приводящие к нештатной работе светофоров сбои в работе электроники железнодорожного транспорта, обусловленные геомагнитной активностью и возникновением в линиях электропередач и рельсах геомагнитно-индукционных токов. Такие же сбои происходят на других участках железной дороги. Здесь необходимы систематическая работа и выполнение специальной программы — исследовательской и технической — для разработки системы защиты.

Магнитные бури приводят к разбуханию атмосферы Земли, плотные слои атмосферы поднимаются вверх, вызывая аномальное торможение Международной кос-

мической станции (МКС) и спутников. Возникает необходимость поднятия орбит и доставки топлива на МКС, что требует дополнительного времени и дополнительных затрат. В период Квебекского события 1989 года американская спутниковая система определения местоположения оказалась парализованной, так как спутники вследствие аномального торможения изменили параметры своих орбит, и некоторые из спутников были потеряны. В 1970-х годах американская орбитальная станция *Skylab* неуправляемо сошла с орбиты, поскольку при расчёте времени её жизни на орбите не были учтены факторы повышенной солнечной активности, приведшей к разрушению атмосферы.

Серьёзной опасности подвергается космическая инфраструктура. Электромагнитное и корпускулярное излучение вспышек на Солнце оказывает целый спектр опасных воздействий. Прежде всего, это радиационная опасность как для космонавтов, так и для электроники спутников. Магнитное поле Земли играет роль щита, не позволяя высоконергетичным солнечным частицам проникать внутрь магнитосферы. Внутри магнитосферы образуются так называемые радиационные пояса, внешний и внутренний, из которых во время магнитной бури в ионосферу и атмосферу поступают частицы радиации, создавая радиационную опасность. Жёсткое ультрафиолетовое излучение и рентгеновское излучение вспышек изменяют ионизацию в ионосфере и нарушают радиосвязь.

В течение солнечного цикла на Солнце происходит около 37000 вспышек, Земля испытывает более 600 магнитных бурь, 10 из которых очень сильные и одна — исключительно сильная, способная привести к катастрофе, подобной Квебекской.

Важным во многих отношениях является вопрос о переполюсовке магнитного поля Земли [23, 24]. Это очень редкое явление, происходящее на больших временах, состоит в том, что северный и южный магнитные полюсы Земли меняются местами (магнитный диполь как бы переворачивается). Предполагается, что последняя переполюсовка произошла около 780 тыс. лет назад. В прошлом переполюсовки происходили нерегулярно, с интервалами от нескольких тысяч до нескольких сотен лет. Так как имеются магнитные аномалии, не связанные с глубинными источниками дипольного поля, то при переполюсовке магнитное поле не исчезает до нуля, смена знака поля происходит медленно и неоднородно по планете.

В течение 400 лет наблюдается ослабление напряжённости магнитного диполя Земли [25], за это время она уменьшилась примерно на 20 %. Это в какой-то мере рассматривается как тенденция к переполюсовке геомагнитного поля. На рисунке 8 показано движение южного магнитного полюса (находящегося на северном географическом полюсе, этот "южный" магнитный полюс в обиходе называют Северным полюсом) за последние примерно 200 лет, измеренное в прошлом (т.е. фактическое), рассчитанное по модели для современного периода и прогнозируемое в будущем.

На основе анализа движения магнитных полюсов за последнее время [27] установлено, что наблюдавшееся ранее ускоренное движение северного магнитного полюса прекратилось примерно в 2003 г., достигнув значения скорости приблизительно 62,5 км в год. Затем движение полюса начало замедляться, и в 2009 г. его

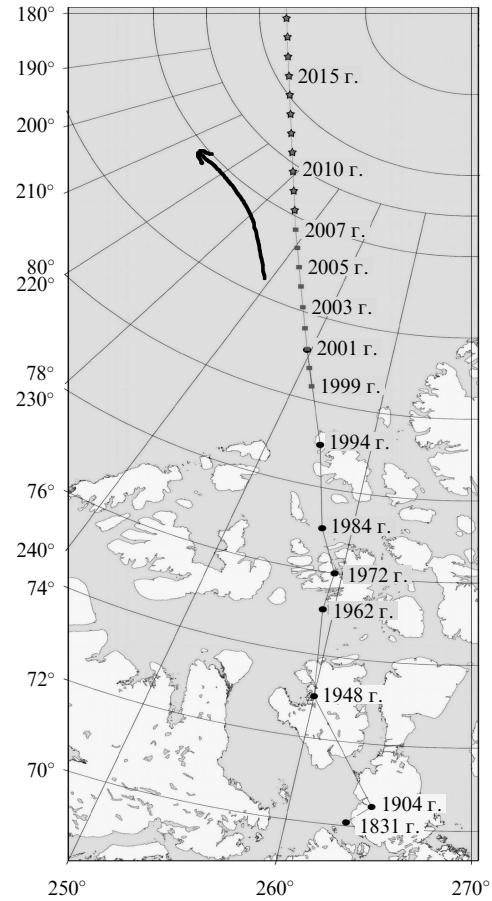


Рис. 8. Картина движения магнитного полюса Земли за последние столетия [26]. Стрелкой показано отклонение реального перемещения полюса от прогнозируемого ранее.

скорость уменьшилась примерно до 45 км в год. При этом полюс стал немного разворачиваться в сторону Канады, двигаясь по-прежнему в северо-западном направлении. Так, скорость движения полюса в исследуемом временному интервале (2001–2009 гг.) по широте уменьшилась от 58 до 35 км в год, в то время как скорость движения по долготе увеличилась от 23 до 32 км в год. Это даёт основания считать, что магнитный полюс просто "блуждает" и что он не покинет области Канадской аномалии и не достигнет примерно через 50 лет Сибири, как прогнозировалось ранее.

Авиационные перелёты через северный полюс выгодны с точки зрения сокращения расстояния, однако они проходят через овал полярных сияний, и существует риск, что пилоты и пассажиры могут получить повышенную дозу радиации в период магнитной бури. При этом нарушается также радиосвязь с самолётом. Облёт полюса означает увеличение расстояния и времени, топлива и затрат. Здесь необходимы прогнозы состояния солнечной и геомагнитной активности, для того чтобы избежать непредвиденных ситуаций.

На рисунке 9 показан пример воздействия ускоренных солнечных протонов в экстремальном событии на Солнце на европейско-американский спутник SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory), который находился за пределами магнитосферы Земли и не был защищён ею. Частицы попали в детекторы, и спутник "ослеп" — изображение Солнца покрыто "снегом". Для сравнения,

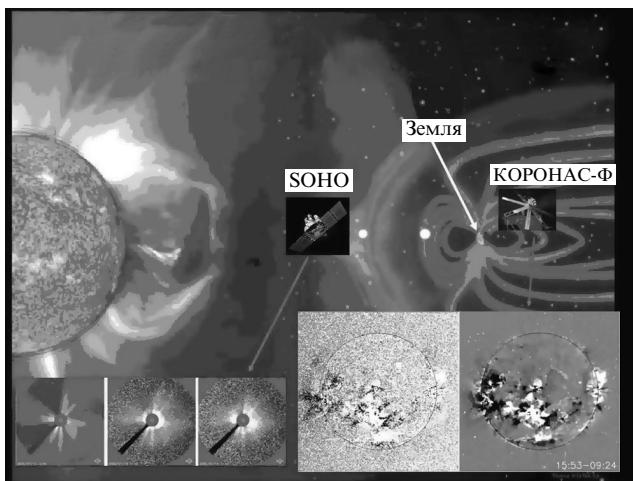


Рис. 9. Эффект воздействия ускоренных в солнечных вспышках протонов на телескопы космического аппарата SOHO, находящегося за пределами магнитосферы Земли.

спутник КОРОНАС-Ф (КОРОНАС — аббрев. от "Комплексные ОРбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца") в это время находился внутри магнитосферы и смог получить качественные изображения этого экстремального события. Светлая точка в левой части рис. 9 — это лобовая точка магнитосферы, обычно находящаяся на расстоянии десяти земных радиусов от Земли. В периоды возникновения мощных потоков солнечного ветра и выбросов на Солнце это расстояние может уменьшаться до пяти земных радиусов, так что все геостационарные спутники (светлая точка в правой части рисунка на расстоянии шести земных радиусов), которые обеспечивают мобильную связь и телевидение, оказываются в открытом космосе, и они никак не защищены от солнечной радиации. Здесь также необходимы оперативные и краткосрочные прогнозы космической погоды в системе принятия мер по безопасному функционированию космической техники.

Мощное микроволновое излучение (частоты около 10 ГГц) от солнечных вспышек "глушит" измерительные каналы некоторых спутников, приводя к потере космических данных, передаваемых на наземные пункты приёма. Радиоизлучение проходит через ионосферу и отражается от океана во все стороны, попадая в приёмники и передатчики спутников [28].

Возмущённая во время магнитной бури ионосфера рассеивает навигационный сигнал GPS (Global Positioning System)/ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), приводя к ошибкам в позиционировании объектов. В сильный туман военные самолёты садятся на палубу авианосцев по навигационному сигналу GPS, точность которого около 1 м. В периоды магнитных бурь в отдельных регионах земного шара эта точность может уменьшаться до 100 м.

Ускоренные протоны от больших солнечных вспышек приводят к уменьшению содержания верхнего слоя озона в приполярной средней мезосфере, за период длительностью от недели до месяца разрушая до 70 % озона [29]. Прогнозирование временных интервалов таких явлений, важных для экологии, непосредственно связано с прогнозами протонных солнечных вспышек.

Установлена связь моментов пересечения Землёй границ секторной структуры межпланетного магнитного поля (ММП) (см. рис. 6) с изменением завихрённости в верхней атмосфере Земли и зарождением внетропических циклонов [30]. Открытый ещё в 1970-х годах, этот эффект недавно был перепроверен на основе новых данных и получил подтверждение [31]. Если впереди Земли при её движении вокруг Солнца поместить спутник с магнитометром для регистрации предстоящих пересечений границ секторной структуры ММП и смены его знака, то можно контролировать состояние атмосферной завихрённости и связанное с ней зарождение внетропических циклонов.

Все знания и данные, которыми мы сегодня располагаем о происходящих в системе Солнце–Земля процессах, используются для прогноза космической погоды. Наиболее мощный центр прогнозов космической погоды имеется в NASA (National Aeronautics and Space Administration). Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН (см. <http://forecast.izmiran.ru>) выдаёт ежедневную информацию о состоянии космической погоды и о геомагнитной обстановке, которая сообщается по телевидению и передаётся Министерству Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Федеральному космическому агентству (Роскосмосу), Центру управления полётами и другим организациям для оперативной работы по обеспечению безопасного функционирования соответствующих инфраструктур. Эти прогнозы сегодня являются востребованными.

3.1. Солнечная активность и климат

Несколько слов следует сказать о влиянии солнечной активности на климат Земли. Исследование этой проблемы представляет собой отдельное направление, охватывающее различные аспекты солнечно-земной физики, физики атмосферы и гидросферы, геофизики и т.д. Солнечная постоянная (1367 Вт м^{-2}) — количество солнечной энергии, падающей на верхнюю атмосферу Земли, — практически не изменяется с солнечным циклом, её вариации, которые составляют порядка 0,1 %, не могут давать заметных климатических изменений. Между тем количество солнечной энергии, поглощаемой Землей и отражённой от неё, может изменяться в зависимости от состояния земной атмосферы, и здесь находится основной центр тяжести проблемы.

Из множества факторов, влияющих на климат, в солнечно-земной физике выделяют влияние через облачность [32], которая модулируется галактическими космическими лучами (ГКЛ), проникновение которых в Солнечную систему и в атмосферу Земли в свою очередь модулируется солнечной активностью (солнечным циклом) — магнитным полем Солнца и солнечным ветром (рис. 10). Повышенные потоки солнечного ветра в максимуме солнечного цикла ослабляют (выметают) потоки ГКЛ из Солнечной системы. Галактические космические лучи могут генерировать аэрозоли в земной атмосфере и стимулировать образование облачного покрова и, как следствие, изменять альbedo Земли и прохождение потоков солнечной радиации к земной поверхности.

По данным за многие годы (около 1000 лет) установлено, что имеется корреляция температуры на Земле с

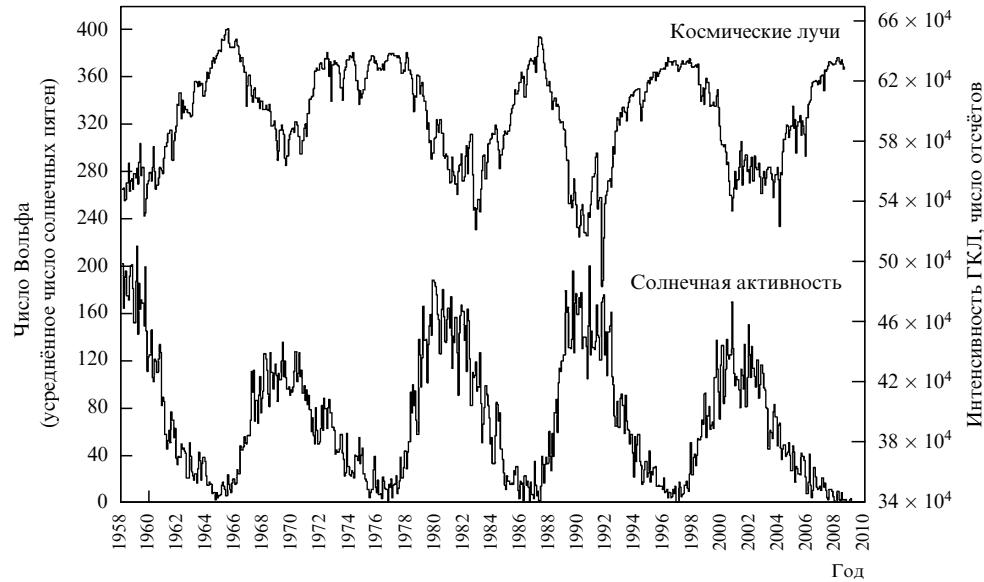


Рис. 10. Корреляция повышенных потоков галактических космических лучей с минимумами солнечной активности с 1958 г. (по данным монитора космических лучей в Киеле (Германия) и Национального геофизического центра данных (National Geophysical Data Center, NGDC) США [33]).

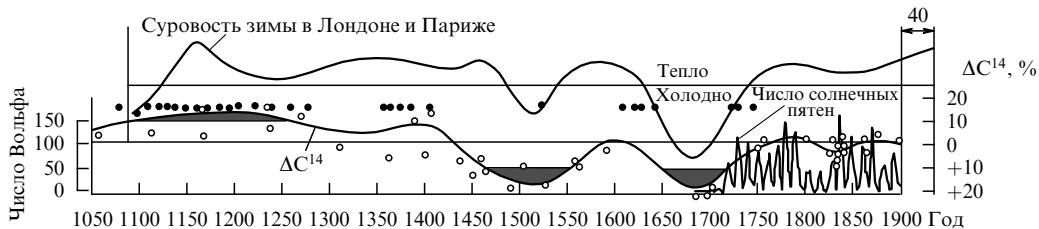


Рис. 11. Вариации уровня солнечной активности за последние 900 лет, сопоставленные с суровостью зим в Лондоне и Париже. Приведено отрицательное значение изменения содержания C^{14} , коррелирующее с низкой интенсивностью галактических космических лучей и высокой солнечной активностью [35].

уровнем солнечной активности, определяемым по изотопу C^{14} (рис. 11). Чем выше уровень солнечной активности, тем меньше интенсивность ГКЛ, тем меньше облачность и тем больше солнечной энергии попадает на Землю. В настоящее время эта гипотеза проверяется в эксперименте "Cloud" на ускорителе в ЦЕРНе — камера с воздухом облучается потоками высокоэнергичных частиц [34].

По прямым и косвенным данным установлено, что в прошлом имели место регулярные аномалии в поведении солнечной активности. Периоды пониженной солнечной

активности показаны на рис. 12. Глобальные минимумы этих периодов солнечной активности отстоят по времени друг от друга примерно на 200 лет, и с ними связаны периоды похолодания. Естественно возникает вопрос: могут ли такие периоды повторяться и если да, то когда их можно ожидать?

Существует реконструкция уровня солнечной активности и в более далёкое прошлое, вплоть до времени 5 тыс. лет до нашей эры [37] (рис. 13). Периоды повышенной активности сменялись периодами пониженной активности. Такое поведение Солнца так или иначе

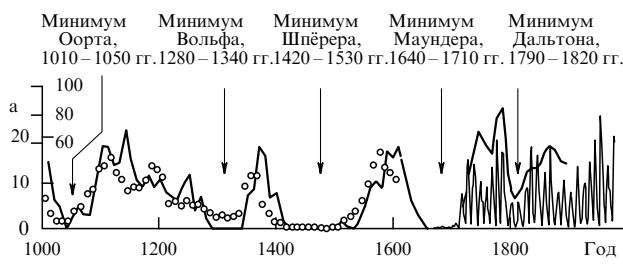


Рис. 12. Аномальные периоды пониженной солнечной активности за последнее тысячелетие [36].

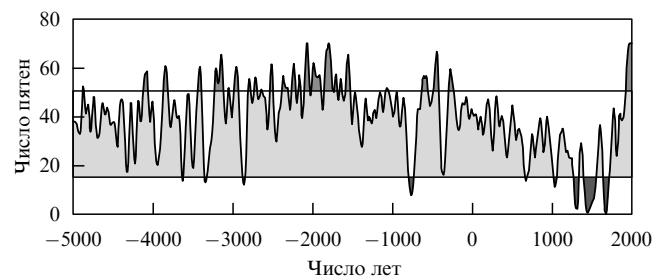


Рис. 13. Реконструкция солнечной активности в далёкое прошлое [37] (за нуль принято начало нашей эры).

связывают с действием солнечного динамо. В наше время мы видим возрастание солнечной активности и связанное с этим потепление, которое по аналогии с прошлыми периодами должно смениться понижением солнечной активности и похолоданием. Тем не менее серьёзно обсуждается, помимо природных факторов изменения климата, влияние антропогенных факторов — промышленных выбросов CO_2 , чему посвящены обширные исследования [32].

4. Заключение

Прогресс в изучении физических процессов в системе Солнце–Земля в значительной степени зависит от получения новых данных, для чего используются наблюдения и измерения на космических аппаратах. За последние годы были реализованы отечественные проекты КОРОНАС-И, "Интербол", КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-ФТОН [38, 39], а также целая серия проектов космических агентств США, Европы и Японии [40, 41]. На получение новых данных в области солнечно-земной физики направлены отечественные проекты "Резонанс" и "Интергелиозонд" [40–42], которые будут исследовать всю цепочку процессов — от процессов в Солнце до процессов в магнитосфере Земли.

В заключение можно отметить, что научное направление исследований — солнечно-земная физика, которому В.В. Мигулин отдал много сил и лет своей жизни, продолжает успешно развиваться и давать новые интересные результаты, в том числе для практического применения.

Список литературы

1. Baker D N et al. (Eds) *Solar Dynamics and Its Effects on the Heliosphere and Earth* (Dordrecht: Springer, 2007)
2. Кузнецов В Д УФН **176** 319 (2006) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **49** 305 (2006)]
3. Gavrin V N et al., in *Neutrino 90: Intern. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics, Geneva, Switzerland, 10–15 Juny 1990*; Abazov A I *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **19** 84 (1991)
4. Kosovichev A G, Duvall T L (Jr.), Scherrer P H *Solar Phys.* **192** 159 (2000)
5. Miesch M S *Astron. Nachr.* **328** 998 (2007)
6. Penn M J, Livingston W *Proc. IAU* **6** 126 (2010)
7. Кузнецов В Д, в кн. *Плазменная гелиоаэрофизика* Т. 1 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 81
8. Мигулин В В, Молоденский М М, Сыроватский С И *Вестн. АН СССР* (5) 59 (1979)
9. Зельдович Я Б, Рузмаикин А А, в сб. *Вспышки на звездах (Сверхновые, рентгеновские источники. Солнце)* (Итоги науки и техники. Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНИТИ, 1982) с. 151 [Zeldovich Ya B, Ruzmaikin A A *Sov. Sci. Rev. Astron.* **2** 333 (1983)]
10. Кузнецов В Д УФН **180** 554 (2010) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 528 (2010)]
11. Frank Hill et al., in *Ann. Meet. Solar Physics Division American Astronomical Society, Las Cruces, NM, June 13–16, 2011*, Presentation 16.10
12. Hecht L "To be or not to be: A galactic question", Booklet of the Citizens Electoral Council of Australia (2011) p. 48
13. Altrock R *ASP Conf. Ser.* **428** 147 (2010)
14. Dikpati M, in *Selected Papers from the 2007 Kyoto Symp.* (Eds T Tsuda et al.) (Kyoto, 2007) p. 171
15. Bothmer V, Daglis I A *Space Weather — Physics and Effects* (Chichester: Praxis Publ., 2007)
16. Elias A G, Silbergbeit V M *Prog. Electromagn. Res. Lett.* **1** 139 (2008)
17. Кузнецов В Д, Махутов Н А *Вестник РАН* **82** 110 (2012) [Kuznetsov V D, Makhutov N A *Herald Russ. Acad. Sci.* **82** 36 (2012)]
18. Larose D, IEEE Special Publication 90TH0291-5 PWR (1989) p. 10
19. Carrington R C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **20** 13 (1860)
20. Cliver E W *Adv. Space Res.* **38** 119 (2006)
21. Cliver E W, Svalgaard L *Solar Phys.* **224** 407 (2004)
22. Boteler D H *Adv. Space Res.* **26** (1) 15 (2000)
23. Bloxham J, Gubbins D *Sci. Am.* **261** (12) 68 (1989)
24. Cox A *Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals* (San Francisco: W.H. Freeman, 1973)
25. Barton C E, in *The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (Ed. D E James) (New York: Van Nostrand Reinhold, 1989) p. 560
26. Olsen N *Eos Trans. AGU* **88** 293 (2007)
27. Зверева Т И *Геомагнетизм и аэрономия* (2012) (в печати)
28. *Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts. A Workshop Report* (Washington, DC: The National Academies Press, 2009)
29. Jackman C H, McPeters R D *Solar Variability Effects Climate Geophys. Monograph* **141** 305 (2004)
30. Wilcox J M et al. *J. Atm. Sci.* **31** 581 (1974)
31. Prikryl P, Rušin V, Rybanský M *Ann. Geophys.* **27** 1 (2009)
32. Idso C, Singer S F *Climate Change Reconsidered. 2009 Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC)* (Eds J L Bast, D C Bast) (Chicago: The Heartland Institute, 2009)
33. "Solar activity: Cosmic ray intensity and sunspot activity", <http://www.climate4you.com/Sun.htm>
34. Kirkby J et al. *Nature* **476** 429 (2011)
35. Eddy J A *Science* **192** 1189 (1976)
36. Eddy J A, in *The Ancient Sun: Fossil Record in the Earth, Moon, and Meteorites: Proc. of the Conf., Boulder, Colorado, October 16–19, 1979* (Eds R O Pepin, J A Eddy, R B Merrill) (Oxford: Pergamon Press, 1980) p. 119
37. Usoskin I G, Solanki S K, Kovaltsov G A *Astron. Astrophys.* **471** 301 (2007)
38. Кузнецов В Д (Ред.) *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (М.: Физматлит, 2009)
39. Кузнецов В Д, Житник И А, Собельман И И *Вестник РАН* **75** 704 (2005) [Kuznetsov V D, Zhitnik I A, Sobel'man I I *Herald Russ. Acad. Sci.* **75** 370 (2005)]
40. Кузнецов В Д УФН **180** 988 (2010) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 947 (2010)]
41. Кузнецов В Д, в сб. *Пятьдесят лет космических исследований: по материалам междунар. форума "Космос: наука и проблемы XXI века", октябрь 2007 года, Москва* (Под ред. А В Захарова) (М.: Физматлит, 2009) с. 60
42. Кузнецов В Д, Зеленый Л М, в сб. *Солнечно-земная физика Вып. 12 Труды Междунар. симпозиума "Международный гелиофизический год — 2007: новый взгляд на солнечно-земную физику"*, Звенигород, 5–11 ноября 2007 г. Т. 1 (Новосибирск: Ин-т солнечно-земной физики РАН, 2008) с. 83