

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-летию со дня рождения академика В.В. Мигулина

Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 28 сентября 2011 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203e.0323

28 сентября 2011 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, посвящённая 100-летию со дня рождения академика В.В. Мигулина.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Гуляев Ю.В.** (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва). *Радиофизические методы в биомедицинских исследованиях.*

2. **Вятчанин С.П.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *Параметрическая колебательная неустойчивость в лазерных гравитационных антеннах.*

3. **Кузнецов В.Д.** (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл.). *Солнечно-земная физика и её приложения.*

Статьи, написанные на основе докладов, публикуются ниже.

PACS numbers: **01.60. + q, 01.65. + g**
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203f.0323

Вступительное слово

Ю.В. Гуляев

Наша сегодняшняя сессия посвящена памяти Владимира Васильевича Мигулина. Меня попросили сказать несколько слов о нём, поскольку он какое-то время работал у нас в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ).

В.В. Мигулин родился в 1911 г. в г. Серёда (ныне г. Фурманов) Ивановской области. В 1932 г. он окончил Ленинградский политехнический институт и с 1934 г. начал работать в Ленинградском электрофизическом институте у Н.Д. Папалекси. Когда Академия наук и большинство её институтов переехали в 1934 г. в Москву, В.В. Мигулин стал работать в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР под руководством Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси. В.В. Мигулин зани-



Владимир Васильевич Мигулин
(10.07.1911 – 22.09.2002)

мался разработкой различных параметрических усилителей, генераторов, преобразователей — фактически он был первым, кто по-настоящему разработал всю эту область.

Следующее направление работ В.В. Мигулина связано с распространением радиоволн. Им проведены исследования по радиоинтерферометрии, которые позволили определять фазовую структуру и скорость распространения волн вдоль земной поверхности.

Ю.В. Гуляев. Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Москва, РФ
E-mail: gulyaev@cplire.ru

В годы войны он занимался разработкой радионавигационных и радиолокационных систем для военной авиации.

В 1951 г. В.В. Мигулин назначается директором Сухумского физико-технического института, в котором ведутся работы по атомному проекту, в том числе связанные с созданием ракет. В этом институте работало много немецких учёных, вывезенных из Германии.

Здесь я сделаю небольшое отступление. Многие, наверное, знают немецкого учёного Клауса Тиссена. В 1953–1954 гг. он являлся студентом Московского государственного университета. Я тогда был студентом Физико-технического института, и мы с ним были знакомы. Так вот, его отец Петер Адольф Тиссен — это тот, кто создал топливо для немецкой ракеты ФАУ-2. После войны американцы, как вы знаете, захватили конструктора ракет фон Брауна, а мы, значит, — П.А. Тиссена, бывшего советника Гитлера по науке. И этот самый П.А. Тиссен, будучи, по сути дела, техническим директором Сухумского института, теперь работал на Сталина.

С 1957 г. по 1959 г. В.В. Мигулин исполнял обязанности заместителя Генерального директора МАГАТЭ в Вене.

В 1962–1969 гг. В.В. Мигулин возглавлял отдел параметрических приборов в Институте радиотехники и электроники АН СССР. Он был, по-видимому, первым, кто в 1968 г. привлек внимание к использованию скивдов, которые тогда появились, в качестве квантовых интерференционных датчиков магнитного поля. И первые скивды у нас были сделаны под его руководством в этом отделе. Он создал команду специалистов, которых многие знают: В.П. Кошелец, Г.А. Овсянников и др. Это всё его школа. И сегодня, во многом благодаря В.В. Мигулину и созданной им школе, ИРЭ РАН в области разработки скивдов и их применения находится в первых рядах. Часть моего последующего доклада по биомангнитным измерениям как раз будет посвящена использованию скивдов, которые имеют чрезвычайно высокую чувствительность.

В 1969 г. В.В. Мигулин становится директором Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР (ИЗМИРАН) и возглавляет этот институт в течение 20 лет. В.В. Мигулин внёс большой вклад в развитие новой области науки — солнечно-земной физики. Он также являлся научным руководителем программы "Интеркосмос-19". И первые результаты по исследованию космоса, которыми мы гордимся, тоже были получены фактически под его руководством.

В.В. Мигулин имел чрезвычайно широкие научные интересы. Я даже помню, хотя подробно развить эту тему не могу, что он как-то рассказывал, что они вместе с Зельдовичем даже кварки где-то обнаружили. Кроме того, Владимир Васильевич постоянно вёл большую общественную работу. В течение почти 30 лет он являлся заместителем академика-секретаря Отделения физических наук АН. И в общем, фактически вместе с академиком-секретарём руководил Отделением.

В.В. Мигулин участвовал также в международных организациях. Есть такая организация — Международный научный радиосоюз (URSI — от франц. Union Radio-Scientifique Internationale). Несмотря на то что существует много международных организаций в обла-

сти радиофизики, радиоэлектроники и т.д., большинство из них являются прикладными. Например, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) — это всё-таки институт именно инженеров в области радиоэлектроники и электротехники, и он имеет в основном практическую направленность. URSI — это, по существу, единственная организация, которая занимается фундаментальными проблемами. Так вот, Мигулин пять лет был вице-президентом всего URSI и в течение 20 лет возглавлял Российский комитет URSI. Сейчас, по сути, я являюсь его правопреемником, поскольку возглавляю этот же комитет URSI. Так что я очень хорошо знаю его деятельность и в международном масштабе.

Это была исключительно яркая личность. И вот что было характерно для Владимира Васильевича — он был очень обязательным человеком и настоящим трудолюбом и всегда очень переживал, если куда-нибудь опаздывал — у него всё было расписано по минутам. И это было не только по отношению к работе, но и по отношению к людям тоже. Когда Владимир Васильевич с вами говорил, он вас слушал и смотрел в глаза, и старался что-то всегда сделать — помочь. Даже когда он уже не работал в ИРЭ, после 1988 г., когда я стал директором ИРЭ, он постоянно приходил, интересовался работой отдела сверхпроводниковой электроники, который, по сути, был его детищем, и был всё время к нему близок.

Самая светлая память у нас о нём осталась, так же как и у всех, я думаю, кто его знал. Это был замечательный человек.

PACS numbers: 04.80.Nn, 07.60. – j, 42.60. – v
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203g.0324

Параметрическая колебательная неустойчивость в лазерных гравитационных антеннах

С.П. Вятчанин

1. Введение

Мне выпала честь знать Владимира Васильевича Мигулина, будучи студентом, аспирантом, а затем сотрудником на возглавляемой им кафедре. К сожалению, у меня не было тесного контакта с ним, но я хорошо знаю, насколько высок был его авторитет на кафедре.

В.В. Мигулин известен работами по параметрическим процессам [1–3]. Тема моего доклада — нежелательный эффект параметрической неустойчивости, также имеющий параметрическую природу.

Наглядной иллюстрацией для описания параметрической колебательной неустойчивости является модель двухконтурного параметрического усилителя (рис. 1), состоящего из двух параллельных колебательных контуров, соединённых переменной ёмкостью связи $C_0(t) = C_0 + \delta C \cos \omega_0 t$ [4]. Хорошо известно, что при достаточной большой накачке (т.е. при достаточно большой модуляционной части ёмкости связи δC) работа параметрического усилителя становится неустойчивой. Усло-

С.П. Вятчанин. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ
E-mail: svyatchanin@phys.msu.ru

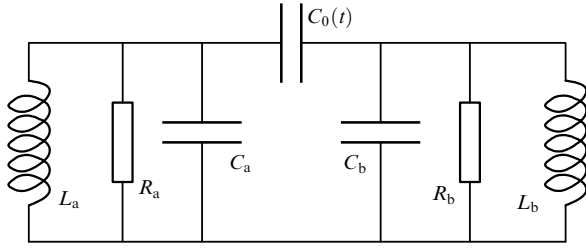


Рис. 1. Модель двухконтурного параметрического усилителя. Парциальные частоты ω_a, ω_b контуров и частота модуляции ω_0 ёмкости связи $C_0(t) = C_0 + \delta C \cos \omega_0 t$ удовлетворяют соотношению $\omega_0 \simeq \omega_a + \omega_b$.

вие неустойчивости при полном синхронизме (т.е. при $\omega_0 = \omega_a + \omega_b$) выглядит следующим образом:

$$\frac{\delta C^2}{C_a C_b} > \frac{\gamma_a \gamma_b}{\omega_a \omega_b}, \quad \gamma_a \equiv \frac{R_a}{2L_a}, \quad \gamma_b \equiv \frac{R_b}{2L_b}. \quad (1)$$

Известно также, что параметрическая накачка приводит к внесению отрицательного затухания, а условие (1) фактически описывает ситуацию, в которой вносимое затухание становится больше собственного [5].

2. Параметрическая колебательная неустойчивость

Для качественного рассмотрения явления параметрической колебательной неустойчивости (ПКН) рассмотрим схему резонатора Фабри–Перо (рис. 2), который возбуждается резонансной накачкой на частоте ω_0 . Одно из зеркал резонатора является подвижным и представляет собой механический осциллятор частоты ω_m . Пусть в резонаторе существует стоксова оптическая мода с собственной частотой ω_1 , так что выполняется следующее условие:

$$\omega_0 \simeq \omega_1 + \omega_m. \quad (2)$$

В этом случае возможно параметрическое взаимодействие между указанными модами, которое может привести к появлению параметрической неустойчивости [6–

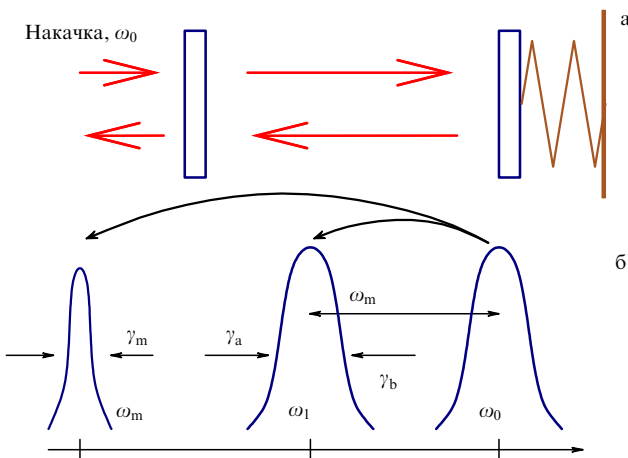


Рис. 2. (а) Схема резонатора Фабри–Перо, одно из зеркал которого является подвижным и представляет собой механический осциллятор на частоте ω_m . (б) Схема мод. Стрелками указаны потоки энергии в соответствии с соотношениями Мэнли–Роу.

10]. При наличии малых колебаний в стоксовой оптической моде возникает действующая на подвижное зеркало на разностной частоте $\omega_0 - \omega_1 \simeq \omega_m$ пондеромоторная сила, которая резонансно "раскачивает" механические колебания. С другой стороны, малые механические колебания зеркала вследствие эффекта Доплера приводят к появлению отражённых от зеркала волн с комбинационными частотами $\omega_0 \pm \omega_m$, одна из которых (на частоте $\omega_0 - \omega_m \simeq \omega_1$) резонансно возбуждает колебания в оптической стоксовой моде. Очевидно, что при увеличении мощности накачки на частоте ω_0 указанные механизмы будут приводить ко всё большей перекачке энергии. В соответствии с соотношениями Мэнли–Роу энергия от волны накачки будет передаваться оптической стоксовой и механической модам. Данный эффект может рассматриваться как внесение отрицательного затухания, поэтому при достижении некоторого порогового значения мощности накачки возникнет параметрическая неустойчивость.

ПКН является пороговым эффектом, условие его наступления удобно описывать фактором \mathcal{R} :

$$\mathcal{R} = \frac{W\omega_1}{cLm\omega_m\gamma_1\gamma_m} \frac{\Lambda}{1 + (\Delta_1/\gamma_1)^2} > 1, \quad (3)$$

$$\Delta_1 = \omega_0 - \omega_1 - \omega_m, \quad (4)$$

$$\Lambda = \frac{V_m \left| \int \mathcal{A}_{0in} \mathcal{A}_{1in}^* u_{\perp} d\mathbf{r}_{\perp} \right|^2}{\int |\mathcal{A}_{0in}(\mathbf{r}_{\perp})|^2 d\mathbf{r}_{\perp} \int |\mathcal{A}_{1in}(\mathbf{r}_{\perp})|^2 d\mathbf{r}_{\perp} \int |\mathbf{u}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}}, \quad (5)$$

где W — мощность, циркулирующая в основной моде Фабри–Перо-резонатора, γ_1 и γ_m — коэффициенты затухания стоксовой оптической и упругой мод, L — расстояние между зеркалами Фабри–Перо-резонатора, c — скорость света, m — масса зеркала, Δ_1 — величина расстройки, Λ — коэффициент перекрытия распределений основной, стоксовой оптических мод и упругой моды, $\mathcal{A}_0, \mathcal{A}_1$ — функции распределения светового поля по сечению пучка основной и стоксовой мод, u_{\perp} — перпендикулярная к поверхности зеркала компонента вектора смещения \mathbf{u} упругой моды, $d\mathbf{r}_{\perp}$ соответствует интегрированию по поверхности зеркала, а $d\mathbf{r}$ — интегрированию по объёму зеркала V_m .

При выполнении условия параметрической неустойчивости (3) и дальнейшем увеличении мощности лазера накачки W энергия \mathcal{E}_0 в основной моде на частоте ω_0 перестаёт увеличиваться, но начинают возрастать энергии в стоксовой и механической модах [11] (рис. 3). Это возрастание может привести к тому, что стоксова мода будет играть роль накачки для возбуждения следующей подходящей пары стоксовой и механической мод. Таким образом, возможно каскадное развитие параметрической неустойчивости.

Явление ПКН наблюдалось в оптических микрорезонаторах [12–14] при скромных мощностях оптической накачки, порядка 10^{-4} Вт, — это связано с высокими добротностями оптических мод (порядка 10^9) и малой эффективной массой механических колебаний (около 10^{-10} кг). Поэтому в таких микрорезонаторах относительно легко получить каскадную ПКН, что даёт возможность генерации оптических гребёнок [15–18].

Отметим, что в резонаторе может существовать и подходящая антистоксова оптическая мода с частотой $\omega_{1a} \simeq \omega_0 + \omega_m$. Тогда, в соответствии с соотношениями Мэнли–Роу, накачка будет вносить положительное

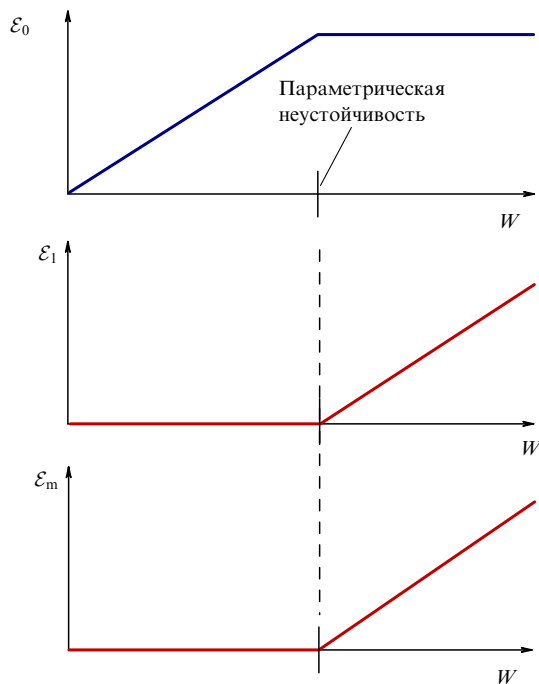


Рис. 3. Зависимости энергий ε_0 , ε_1 , ε_m в основной, стоксовой и механической модах соответственно от мощности накачки W для случаев ниже и выше порога параметрической неустойчивости.

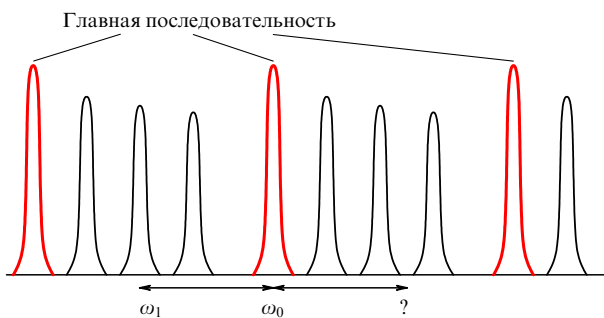


Рис. 4. Структура оптических мод Фабри–Перо-резонатора. Моды главной последовательности соответствуют высоким пикам. Стоксова оптическая мода имеет частоту ω_1 , возможная антистоксова мода обозначена знаком вопроса.

затухание в механическую моду, которое может быть больше отрицательного трения, вносимого стоксовой модой, и параметрическая неустойчивость станет невозможной [19]. При этом фотон волны накачки будет рассеиваться на упругом фоне, создавая фотон антистоксовой волны, а часть энергии будет забираться из упругой волны. Поэтому, с одной стороны, наличие стоксовой оптической моды приводит к внесению отрицательного затухания в механическую моду (и, следовательно, к эффекту параметрической неустойчивости), с другой — наличие антистоксовой моды вызывает затухание механической моды. Однако вероятность того, что антистоксова мода полностью подавит параметрическую неустойчивость, достаточно мала — это иллюстрирует рис. 4.

Параметрическая неустойчивость в лазерных интерференционных антеннах. В настоящее время несколько лабораторий в разных странах продемонстрировали работу лазерных гравитационно-волновых детекторов

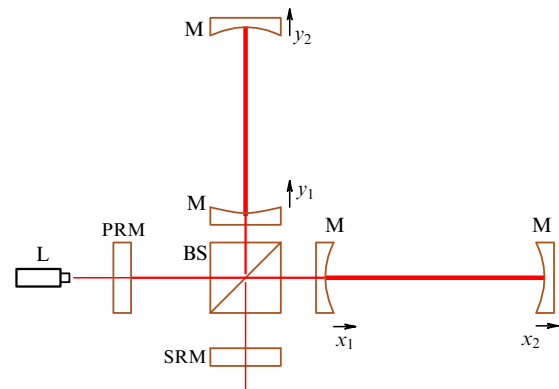


Рис. 5. Упрощённая схема AdLIGO: L — лазер, BS — светоделитель, M — зеркала в плечах, PRM (Power Recycling Mirror) — зеркало рециркуляции мощности, SRM (Signal Recycling Mirror) — зеркало рециркуляции сигнала. Свет, выходящий через тёмный порт (через SRM), несёт информацию о разности длин плеч $[(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1)]$.

первого поколения (проекты LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) [20, 21], VIRGO [22], GEO-600 [23], TAMA [24]), и уже сейчас ведутся работы по созданию детекторов второго поколения (Advanced LIGO (AdLIGO), Advanced VIRGO, GEO-HF и пр.), которые позволят в недалёком будущем зарегистрировать гравитационные волны. В детекторах второго поколения планируется значительно увеличить оптическую мощность, циркулирующую в плечах интерферометров (в AdLIGO до 800 кВт). Поэтому вероятность ПКН в лазерных гравитационных детекторах второго поколения будет достаточно велика.

Упрощённая схема интерферометра AdLIGO показана на рис. 5. Два зеркала цилиндрической формы, подвешенные на большом расстоянии (4 км) друг от друга, образуют в одном плече интерферометра первый Фабри–Перо-резонатор, ещё два таких же зеркала образуют другое плечо со вторым Фабри–Перо-резонатором, перпендикулярное первому. Лазерный луч от лазера накачки проходит через светоделитель, расположенный в точке пересечения плеч. Предполагается, что свет многократно отразится от зеркал внутри каждого плеча, прежде чем он вернётся на светоделитель луча. Плечи интерферометра юстируются так, чтобы весь отражённый свет направлялся обратно к лазеру (так называемый яркий порт), а в порт детектора (так называемый тёмный порт) свет не идёт. При воздействии гравитационной волны появляется некоторая разница между длинами плеч, часть света распространяется в тёмный порт и регистрируется фотодетектором. В AdLIGO предполагается достичь значений параметров, перечисленных в таблице.

Таблица. Параметры интерферометра AdLIGO

Мощность	$0,83 \times 10^6$ Вт
Длина плеч	4000 м
Масса зеркала	40 кг
Радиус зеркала	0,17 м
Высота зеркала	0,2 м
Материал	Плавленный кварц

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 стоковых 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 стоковой 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 антеннах второго поколения.

Во-первых, можно искать предвестники, т.е. обнаруживать слабые колебания на стоковых 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 отработать различные методики подавления неустойчивости.

Третий путь — понизить оптическую мощность, циркулирующую в плечах интерферометра. Дело в том, что в гравитационных антеннах 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. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), которым Владимир Васильевич Мигулин руководил в течение почти 20 лет (с 1969 г. по 1988 г.), является политематическим 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. Пушкова 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

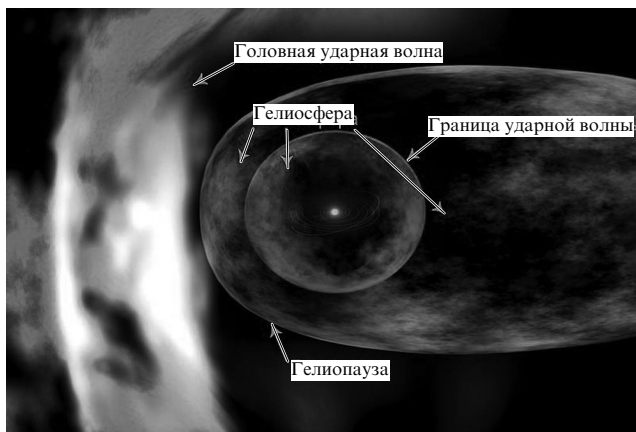


Рис. 1. Гелиосфера — область от Солнца до гелиопаузы (границы с межзвёздной средой). (Обработанное изображение с сайта NASA (см. <http://ru.wikipedia.org/wiki>).

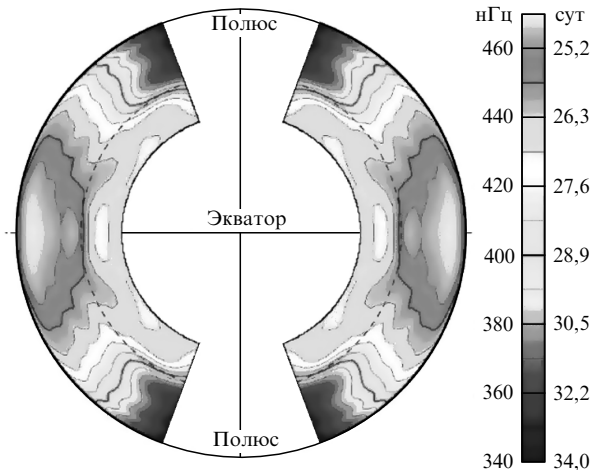


Рис. 2. Профиль угловой скорости дифференцированного вращения по сечению конвективной зоны [5].

гелиосейсмологии 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 вращаются быстрее, чем высокоширотные, 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 фотосферы 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 фотосферы 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, переносятся, распадаются и диссипируют 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-

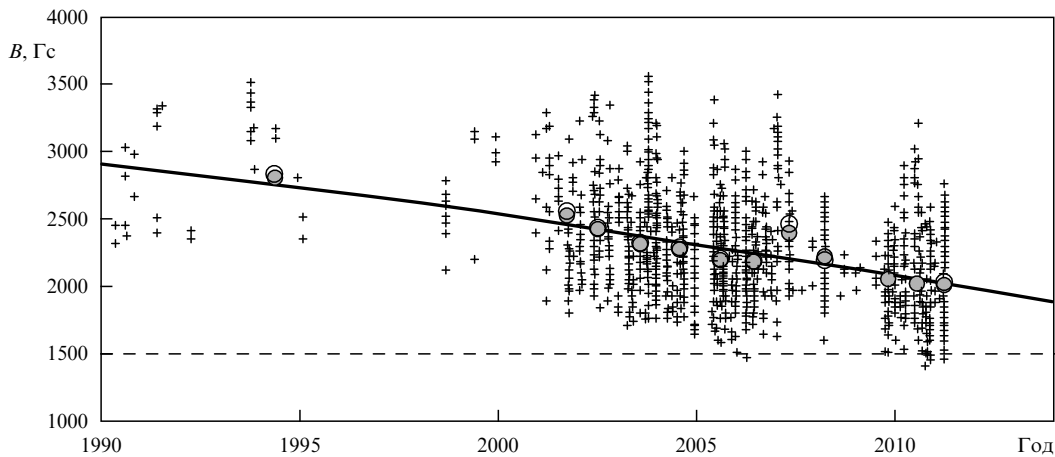


Рис. 3. Уменьшение напряжённости магнитного поля солнечных пятен со временем, согласно В. Ливингстону и М. Пену [6].

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 продолжаютя 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

Всплывание магнитных полей из-под фотосферы на поверхность Солнца порождает в его атмосфере топологически сложные магнитные конфигурации, которые деформируются непрерывающимися 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-

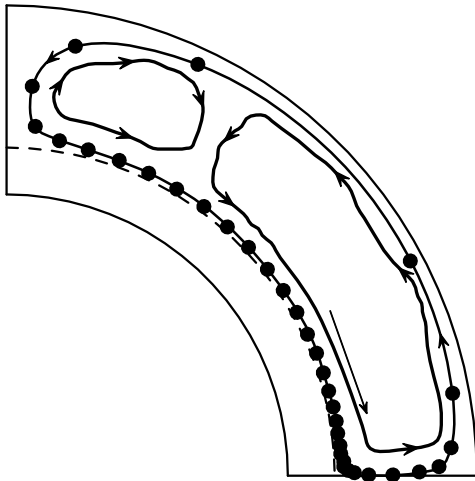


Рис. 4. Распад вихря меридиональной циркуляции как одна из гипотез о причине изменения длительности и амплитуды 11-летних солнечных циклов.

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. Ожидалось, 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 динамо-процесса 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-

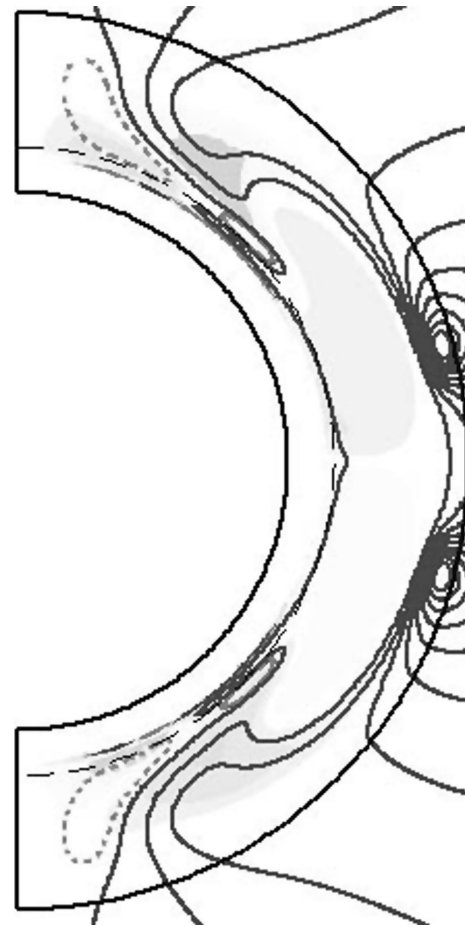


Рис. 5. Изменение знака магнитного поля в полярных зонах Солнца в солнечном цикле вследствие переноса магнитного поля от экватора к полюсам [14] (сплошная и штриховая линии соответствуют полям разного знака).

скость 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 диссипация 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 (Т. 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 на ночной стороне образуется хвост магнитосферы, а дневная сторона магнитосферы поджимается.

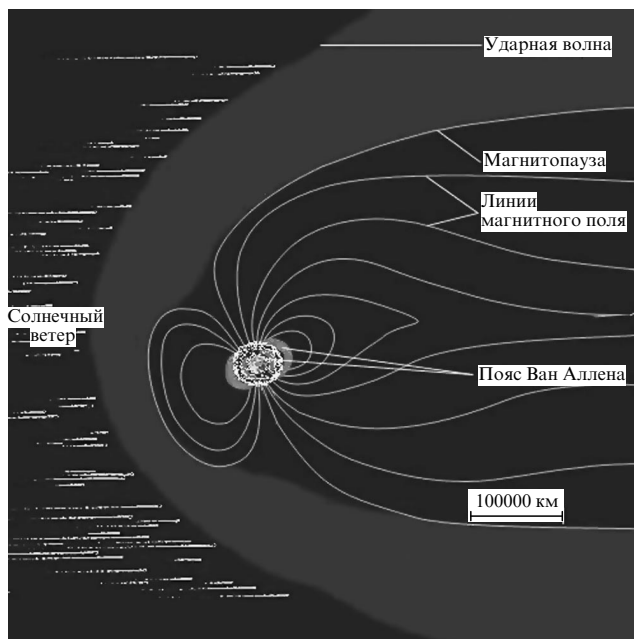


Рис. 7. Структура магнитосферы Земли, формирующаяся в результате её обтекания солнечным ветром.

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 электродвижущая 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 околоземное 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-индуцированные токи, которые и 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-индуцированные 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-индуцированные 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 воздействию со стороны геомагнитно-индуцированных токов [22]. Примером может служить регулярная регистрация таких токов в Аляскинском трубопроводе, где их величина может достигать нескольких сотен ампер. Геомагнитно-индуцированные токи в трубопроводах изменяют электрический потенциал трубы и тем самым нарушают систему защиты от коррозии. Там, где потенциал выше критического, на трубопроводах образуются локализованные коррозионные пятна, приводящие к сокращению срока службы трубопровода. Время жизни трубопровода оценивается в 20–40 лет, а коррозионные пятна, связанные с эффектом геомагнитно-индуцированных 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-индуцированных 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 разбуханию 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 высокоэнергетичным 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 переполусовке 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 переполусовка произошла около 780 тыс. лет назад. В прошлом переполусовки 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 переполусовке 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 переполусовке 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

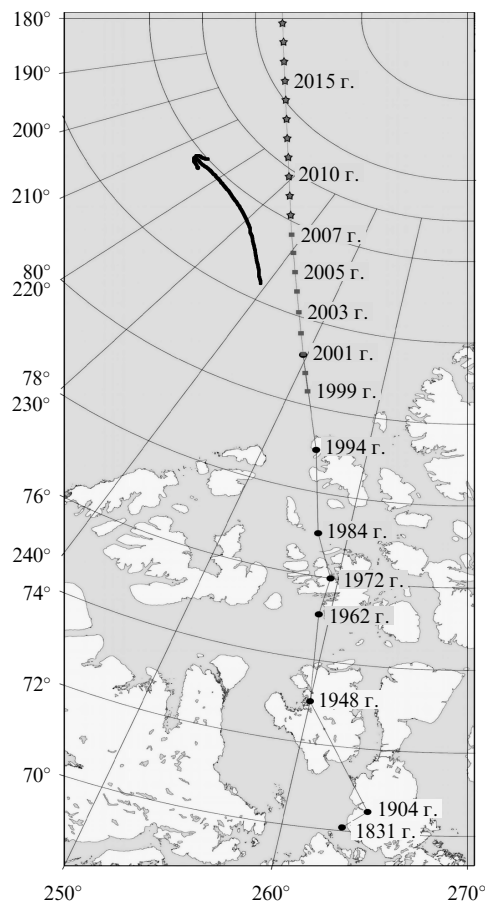


Рис. 8. Картина движения магнитного полюса Земли за последние столетия [26]. Стрелкой показано отклонение реального перемещения полюса от прогнозируемого ранее.

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 временном 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 нештатных 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,

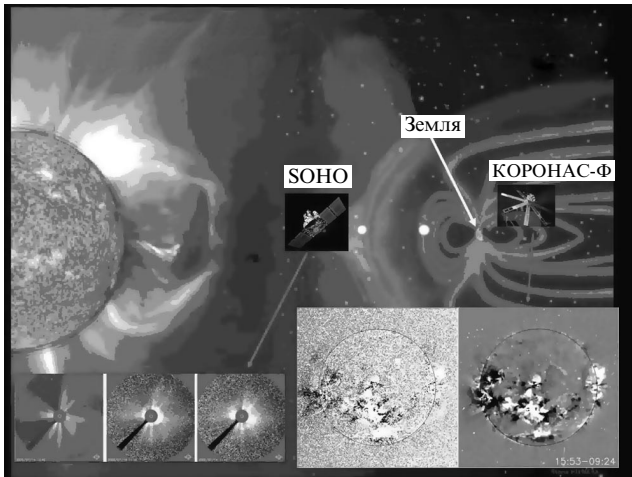


Рис. 9. Эффект воздействия ускоренных в солнечных вспышках протонов на телескопы космического аппарата SOHO, находящегося за пределами магнитосферы Земли.

спутник КОРОНАС-Ф (КОРОНАС — аббрев. от "Комплексные Орбитальные Околосолнечные 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 уменьшиться 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 альбедо 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

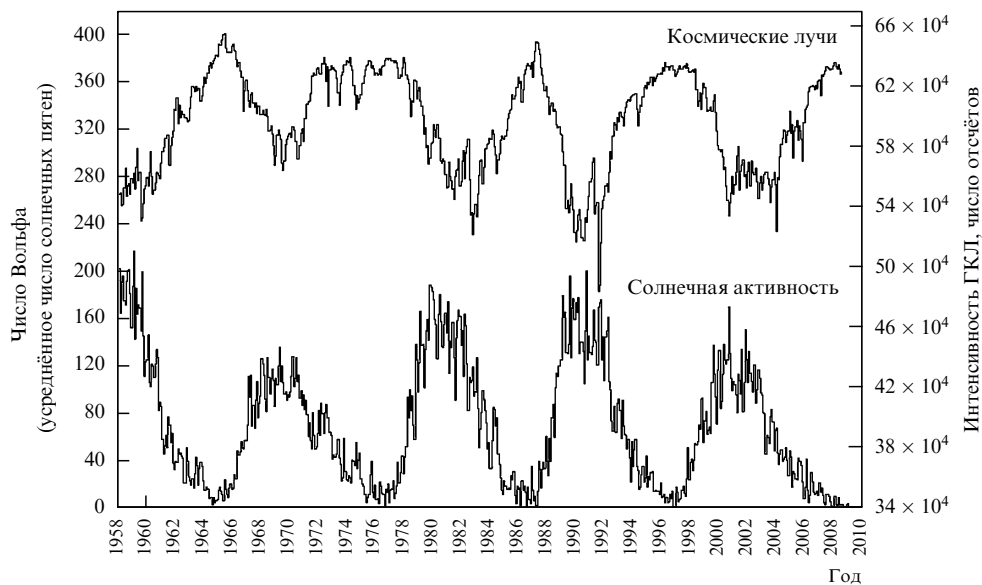


Рис. 10. Корреляция повышенных потоков галактических космических лучей с минимумами солнечной активности с 1958 г. (по данным монитора космических лучей в Киеле (Германия) и Национального геофизического центра данных (National Geophysical Data Center, NGDC) США [33]).

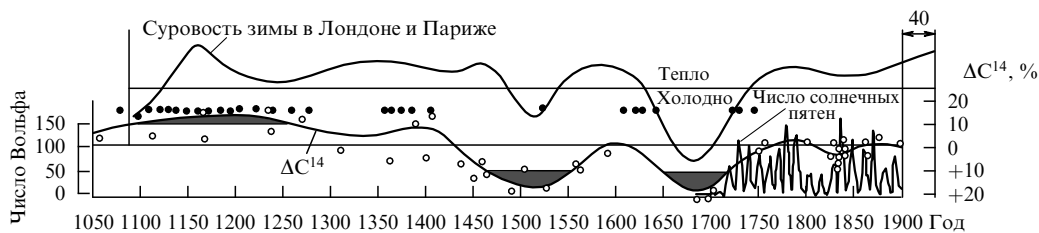


Рис. 11. Вариации уровня солнечной активности за последние 900 лет, сопоставленные с суровостью зим в Лондоне и Париже. Приведено отрицательное значение изменения содержания C^{14} , коррелирующее с низкой интенсивностью галактических космических лучей и высокой солнечной активностью [35].

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

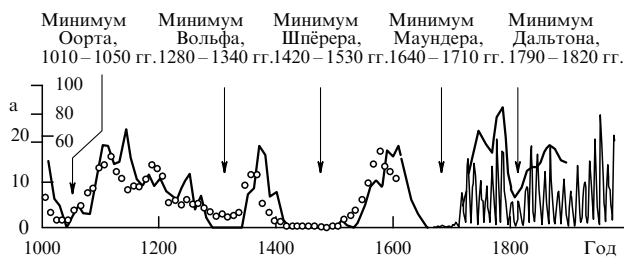


Рис. 12. Аномальные периоды пониженной солнечной активности за последнее тысячелетие [36].

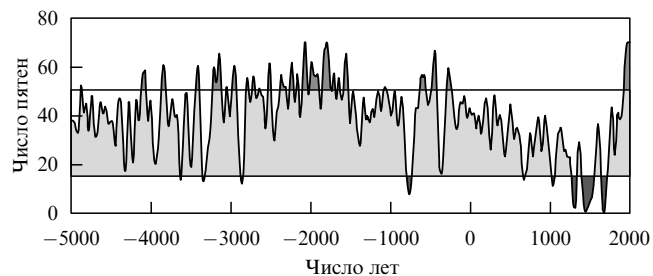


Рис. 13. Реконструкция солнечной активности в далёкое прошлое [37] (за ноль принято начало нашей эры).

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 серьезно 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-ФОТОН [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

- Baker D N et al. (Eds) *Solar Dynamics and Its Effects on the Heliosphere and Earth* (Dordrecht: Springer, 2007)
- Кузнецов В Д *УФН* **176** 319 (2006) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **49** 305 (2006)]
- 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)
- Kosovichev A G, Duvall T L (Jr.), Scherrer P H *Solar Phys.* **192** 159 (2000)
- Miesch M S *Astron. Nachr.* **328** 998 (2007)
- Penn M J, Livingston W *Proc. IAU* **6** 126 (2010)
- Кузнецов В Д, в кн. *Плазменная гелиогеофизика* Т. 1 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 81
- Мигулин В В, Молоденский М М, Сыроватский С И *Вестн. АН СССР* (5) 59 (1979)
- Зельдович Я Б, Рузмайкин А А, в сб. *Вспышки на звездах (Сверхновые, рентгеновские источники. Солнце)* (Итоги науки и техники. Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНТИ, 1982) с. 151 [Zeldovich Ya B, Ruzmaikin A A *Sov. Sci. Rev. Astron.* **2** 333 (1983)]
- Кузнецов В Д *УФН* **180** 554 (2010) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 528 (2010)]
- Frank Hill et al., in *Ann. Meet. Solar Physics Division American Astronomical Society, Las Cruces, NM, June 13–16, 2011*, Presentation 16.10
- Hecht L "To be or not to be: A galactic question", Booklet of the Citizens Electoral Council of Australia (2011) p. 48
- Altrock R *ASP Conf. Ser.* **428** 147 (2010)
- Dikpati M, in *Selected Papers from the 2007 Kyoto Symp.* (Eds T Tsuda et al.) (Kyoto, 2007) p. 171
- Bothmer V, Daglis I A *Space Weather — Physics and Effects* (Chichester: Praxis Publ., 2007)
- Elias A G, Silbergleit V M *Prog. Electromagn. Res. Lett.* **1** 139 (2008)
- Кузнецов В Д, Махутов Н А *Вестник РАН* **82** 110 (2012) [Kuznetsov V D, Makhutov N A *Herald Russ. Acad. Sci.* **82** 36 (2012)]
- Larose D, IEEE Special Publication 90TH0291-5 PWR (1989) p. 10
- Carrington R C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **20** 13 (1860)
- Cliver E W *Adv. Space Res.* **38** 119 (2006)
- Cliver E W, Svalgaard L *Solar Phys.* **224** 407 (2004)
- Boteler D H *Adv. Space Res.* **26** (1) 15 (2000)
- Bloxham J, Gubbins D *Sci. Am.* **261** (12) 68 (1989)
- Cox A *Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals* (San Francisco: W.H. Freeman, 1973)
- Barton C E, in *The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (Ed. D E James) (New York: Van Nostrand Reinhold, 1989) p. 560
- Olsen N *Eos Trans. AGU* **88** 293 (2007)
- Зверева Т И *Геомагнетизм и астрономия* (2012) (в печати)
- Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts. A Workshop Report* (Washington, DC: The National Academies Press, 2009)
- Jackman C H, McPeters R D *Solar Variability Effects Climate Geophys. Monograph* **141** 305 (2004)
- Wilcox J M et al. *J. Atm. Sci.* **31** 581 (1974)
- Prikryl P, Rušin V, Rybanský M *Ann. Geophys.* **27** 1 (2009)
- 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)
- "Solar activity: Cosmic ray intensity and sunspot activity", <http://www.climate4you.com/Sun.htm>
- Kirkby J et al. *Nature* **476** 429 (2011)
- Eddy J A *Science* **192** 1189 (1976)
- 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
- Usoskin I G, Solanki S K, Kovaltsov G A *Astron. Astrophys.* **471** 301 (2007)
- Кузнецов В Д (Ред.) *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (М.: Физматлит, 2009)
- 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)]
- Кузнецов В Д *УФН* **180** 988 (2010) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 947 (2010)]
- 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
- 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