



Солнечно-земная физика и космическая погода

*Гелий Жеребцов
Институт солнечно-земной физики СО РАН*

Солнце — рядовая звезда нашей Галактики, поэтому многие проблемы его изучения, например источники энергии и внутреннее строение, имеют более общий характер.

Для нас Солнце — ближайшая звезда, и в этом смысле оно уникально. Это единственная звезда, поверхность которой можно детально изучать как наземными методами, так и с помощью аппаратуры, установленной на борту космических аппаратов.

Солнце представляет собой плазменный шар радиусом $6,96 \cdot 10^{10}$ см, что почти в 109 раз больше радиуса Земли (рис. 1). Его масса составляет $1,99 \cdot 10^{33}$ г, что в 333000 раз больше массы Земли. В Солнце сосредоточено 99,866% массы Солнечной системы, т.е. масса всех планет и их спутников составляет меньше 0,13%. Зато на них приходится примерно 98% момента количества движения всей Солнечной системы. Угловая скорость вращения Солнца не одинакова. Вращение носит дифференциальный характер: экваториальная зона вращается со скоростью $14,4^\circ$ в сутки, высокоширотная часть — 10° в сутки, а средний период вращения составляет 25,38 суток. Мощность излучения Солнца — его светимость — составляет $3,86 \cdot 10^{26}$ Вт. Каждый квадратный сантиметр поверхности Солнца излучает более 6 кВт, что эквивалентно излучению черного тела, нагретого до температуры примерно 6000 К.

Солнце под действием силы гравитации стремится сжаться. Сжатию противодействуют процессы, происходящие внутри Солнца, — изменение давления и плотности внутренних слоев вследствие высоких температур. В самом центре Солнца температура составляет

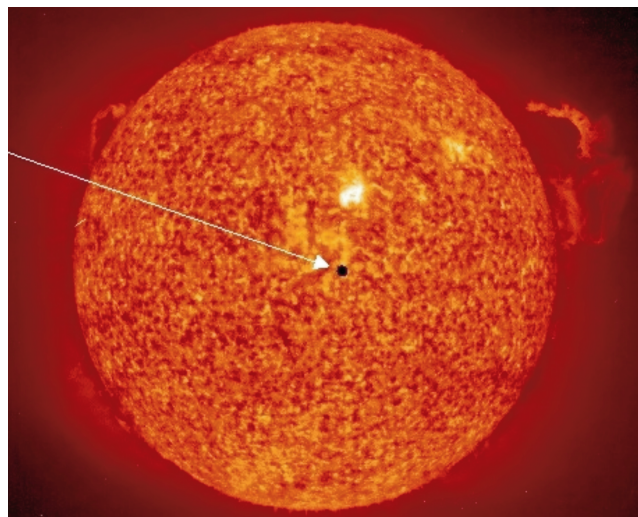


Рис. 1. Размеры Земли в сравнении с Солнцем.

$1,6 \cdot 10^7$ К, а плотность — примерно 160 г/см³. Высокая температура поддерживается на протяжении длительного времени благодаря термоядерным реакциям синтеза гелия из водорода, основного компонента солнечного вещества. Термоядерные реакции — основной источник солнечной энергии. За время своего существования, т.е. за 4,5-5 млрд. лет, Солнце не израсходовало и половины запасов водородного топлива. В течение всего этого времени излучение Солнца остается примерно постоянным. Внутренняя часть — *ядро* — составляет примерно треть радиуса Солнца (рис. 2). В ядре сосредоточена наибольшая часть солнечного вещества, происходят ядерные реакции, и выделяется энергия. Следующая область — *лучистая зона*, где в результате переизлучения энергия переносится дальше, в *конвективную зону*.

Температура в конвективной зоне значительно ниже, она уже переходит во внешние



Рис. 2. Схема строения Солнца.

слои Солнца, в его атмосферу. Из-за большой глубины конвективной зоны всплывающая масса горячего газа из нижних слоев не успевает подняться до внешних границ. Остывая, она опускается вниз, отдавая избыток энергии окружающему веществу. Таким образом, в этой зоне горячее вещество движется вверх, а более холодное — вниз. Создаются своеобразные ярусы конвективных ячеек. Ячейки нижнего яруса имеют размер 100-200 тысяч км, а верхнего — несколько сотен километров. Такая структура конвективной зоны свойственна всей солнечной атмосфере.

Солнечная атмосфера неоднородна и состоит из нескольких слоев. *Фотосфера* — нижний и самый тонкий слой толщиной всего 200-300 км. В фотосфере температура растет с глубиной.

Ячеистая структура Солнца наблюдается в виде *гранул* — отдельных внешних элементов конвекции. Гранулы горячее и ярче, чем окружающая их фотосфера. Темные промежутки

между ними — опускающиеся потоки более холодного газа. Движение гранул в атмосфере Солнца генерирует звуковые волны, которые поглощаются в атмосфере, а их энергия переходит в тепло. С высоты $5 \cdot 10^3$ км над фотосферой температура вновь начинает повышаться. Эта область называется *хромосферой* и представляет собой тонкий слой толщиной 10-20 тысяч километров с температурой до нескольких десятков тысяч кельвинов.

Во внешней части атмосферы Солнца, в *солнечной короне*, температура достигает 10^6 K . Корона еще более прозрачна, чем хромосфера, и количество излучаемого ей света ничтожно мало. Яркость короны в 10^6 раз меньше яркости фотосферы, поэтому корона видна только в периоды полных солнечных затмений. В другое время ее исследуют с помощью специальных телескопов-коронографов, позволяющих создавать искусственное солнечное затмение. Таким образом, почти всю энергию излучает фотосфера, температура которой примерно 6000 K, и эта температура принимается за температуру Солнца в целом.

Одной из особенностей протяженной короны является высокая температура. Только на очень больших расстояниях, порядка $1,5 \cdot 10^6 \text{ км}$, температура постепенно уменьшается. Фактически Земля погружена в корону Солнца. Постоянный поток заряженных частиц от Солнца называют *солнечным ветром*.

Пятна на поверхности Солнца образуют активные области (рис. 3). Количество солнечных пятен меняется с цикличностью около 11 лет. Пятна обладают сильным магнитным полем, которое замедляет движение газа, подавляет конвекцию, уменьшает перенос

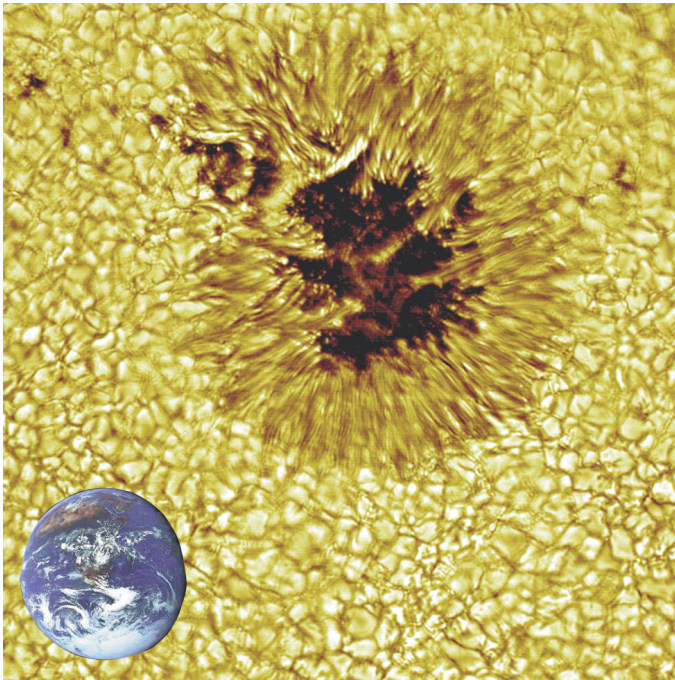


Рис. 3. Размеры солнечного пятна в сравнении с Землей.
©Vacuum Tower Telescope, NSO, NOAO, NASA

энергии и резко снижает светимость. Температура в пятне примерно на 1000 К ниже, чем в окружающей фотосфере, поэтому на ее фоне пятно кажется темным. Солнечные пятна — важное свидетельство солнечной активности. В качестве ее показателя принято число Вольфа, которое рассчитывается по числу пятен и их групп. Пятна могут быть униполярными, биполярными и объединенными в сложные группы. В биполярной группе пятна имеют разные полярности магнитного поля. В среднем, размер группы пятен совпадает с размером гигантской ячейки конвективной зоны. В хромосфере и короне над активными областями могут наблюдаться такие явления, как хромосферные вспышки.

Вспышка — это очень быстрый процесс возрастания яркости в активной области в результате особых изменений магнитных полей, приводящих к внезапному сжатию вещества хромосферы. Такое явление, подобное взрыву, сопровождается возникновением потоков быстрых заряженных частиц. Этот поток проходит через корону и сталкивается с находящимися там частицами. В результате частицы начинают колебаться и испускать радиоволны, при этом возникает мощное радиоизлучение. Помимо радиоизлучения, вспышка сопровождается рентгеновским, ультрафиолетовым и видимым излучением, потоками плазмы со скоростью до 1000 км/с и космических лучей. Все эти излучения проходят межпланетную среду, достигают Земли и воздействуют на магнитосферу и атмосферу, особенно на их верхние слои.

Источник активных явлений на Солнце — это магнитные поля, с которыми связана 11-летняя цикличность солнечной активности. Начало цикла характеризуется отсутствием или малым количеством пятен, затем пятна появляются на высоких широтах, их число растет, и они постепенно смещаются к экватору. Через четыре-пять лет число пятен становится наибольшим — наступает максимум солнечной активности. Затем активность начинает спадать, и примерно через пять лет опять наступает минимум.

Исследования Солнца позволили достаточно хорошо понять механизмы многих явлений, связанных с солнечной цикличностью. По-видимому, солнечная активность связана со сложными процессами взаимодействия внутреннего солнечного вещества с магнит-

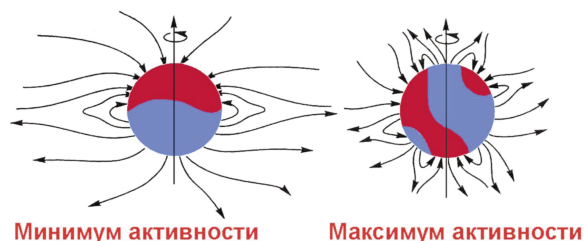


Рис. 4. Структура крупномасштабного магнитного поля Солнца.

ным полем. Это взаимодействие, периодическое усиление магнитного поля, изменение его структуры приводят к появлению солнечных пятен и к другим солнечным явлениям. Однако наше представление о Солнце и его деятельности еще неполно, и необходимо их более глубокое изучение.

Солнечный ветер состоит в основном из протонов, электронов и ядер гелия, общая концентрация которых не более 4%. Проводимость солнечного ветра очень высокая, поэтому магнитное поле Солнца оказывается замороженным, т.е. солнечный ветер уносит не только солнечное вещество, но и его магнитное поле. Поток заряженных частиц распространяется в Солнечной системе на огромное расстояние — до 100 а.е. Пространство, заполненное солнечным ветром, получило название гелиосферы.

Истечение солнечного вещества контролируется магнитным полем Солнца, конфигурация которого близка дипольной в минимуме активности и весьма сложна в максимуме (рис. 4). В разреженной плазменной атмосфере поля замыкаются, формируя дуги силовых линий. На высоких гелиоширотах в период минимума формируются так называемые

корональные дыры, из которых магнитные силовые линии уходят в межпланетное пространство. Солнечный ветер, истекающий из корональных дыр, на больших расстояниях достигает скорости 700 км/с, имея при этом низкую плотность. На низких гелиоширотах структура солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) сложна. Вблизи Земли скорость солнечного ветра составляет 300-400 км/с.

В результате вращения Солнца магнитное поле в гелиосфере закручивается в спираль Архимеда, а так как граница между входящими и исходящими силовыми линиями магнитного поля проходит не точно по солнечному экватору, то токовый слой в межпланетном пространстве имеет сложную форму, напоминающую юбку балерины (рис. 5). Плотность вещества и магнитное поле меняются по величине в десятки раз на различных пространственных и временных масштабах. Корональные дыры и гелиосферный токовый слой представляют собой достаточно устойчивую систему, которая может сохранять стабильность в течение нескольких оборотов Солнца.

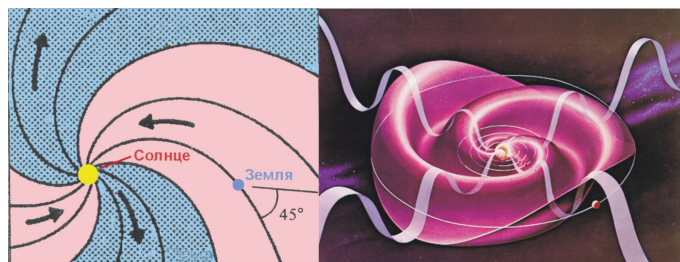


Рис. 5. Слева — спиральная структура межпланетного магнитного поля. Справа — гелиосфера и гелиосферный токовый слой. На схеме показаны орбиты Меркурия, Венеры, Земли, Марса и Юпитера.

Поэтому высокоскоростные потоки солнечного ветра из отдельной корональной дыры иногда могут повторяться через оборот Солнца, т.е. в среднем через 27 дней.

Наиболее ярким проявлением солнечной активности являются корональные выбросы массы. Магнитные облака имеют сильное магнитное поле и вместе с солнечным веществом могут распространяться на фоне спокойного солнечного ветра со скоростями до 2000 км/с. Скорость выброса превышает скорость основного потока, поэтому перед выбросом образуется межпланетная ударная волна, имеющая сложную плазменно-магнитную структуру. Именно такие образования в межпланетной среде вызывают самые мощные магнитные бури, регистрируемые на Земле.

Солнце — переменная звезда. Истечение солнечного вещества происходит неоднородно, изменяются магнитное поле, параметры солнечного ветра и интенсивность радиоизлучения. Последние научные достижения расширили наши представления о физических процессах в межпланетной среде, однако этих знаний все еще недостаточно для полного понимания взаимодействия в сложной системе «Солнце — межпланетная среда — Земля».

Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем Земли приводит к образованию *магнитосферы* — каплеобразной полости вокруг Земли, наполненной плазмой и имеющей сложную структуру.

Потоки солнечного ветра сжимают дипольное магнитное поле Земли со стороны Солнца и вытягивает его на ночной стороне Земли, образуя хвост магнитосферы (рис. 6). Граница магнитосферы на дневной стороне находится

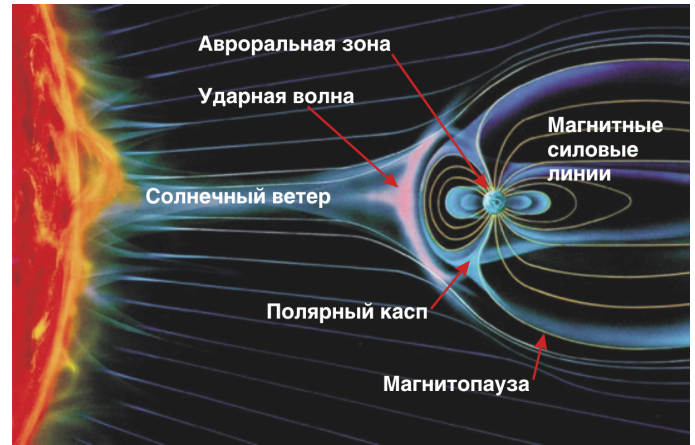


Рис. 6. Взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем Земли. © NASA

примерно на расстоянии 60000 км от центра Земли, а на ночной стороне магнитосфера вытянута в анτισолнечном направлении и простирается на миллионы километров. Положение границы магнитосферы определяется балансом давления поджатого магнитного поля Земли и давления солнечного ветра. Межпланетное магнитное поле также влияет на формирование границы между солнечным ветром и магнитосферой. При обтекании магнитосферы солнечным ветром от ее лобовой части до хвоста передаются энергия и импульс, происходит обмен веществом с солнечным ветром. Эти процессы определяют состояние околоземного космического пространства. В результате в магнитосфере формируются трехмерные токовые системы, генерируются крупномасштабные электрические поля, а в хвосте магнитосферы формируется плазменный слой, энергия частиц в котором составляет 1-10 кэВ. Внутри него находится нейтральный слой, характеризующийся высокой электроди-

намической турбулентностью. Происходящие там процессы ускоряют поток заряженных частиц в высокоширотной зоне Земли и формируют радиационные пояса.

Интенсивность указанных процессов связана с параметрами солнечного ветра и ММП. Усиление давления солнечного ветра, появление южного компонента ММП (такая ориентация необходима для пересоединения) и его усиление приводят к резкому увеличению поступления энергии и импульса внутрь магнитосферы. Для оценки этого эффекта вводится понятие магнитной возмущенности магнитосферы, которая характеризуется различными индексами (K_p , A_E , D_{st} и др.).

Отклик магнитосферы на изменения солнечного ветра и ММП в значительной степени нелинеен. При сильных возмущениях в магнитосферу поступает много энергии в виде энергичных частиц и электрических полей. Эта энергия уже не способна поглотиться в результате внутренних процессов и аккумулируется в хвосте. При достижении некоторого критического уровня происходит магнитное пересоединение, в результате чего находящиеся в хвосте заряженные частицы (электроны и ионы) приобретают значительное ускорение. Этот взрывообразный процесс происходит в промежуток времени от нескольких десятков секунд до нескольких десятков минут. Электроны устремляются к Земле, попадают в верхнюю атмосферу (высота около 100 км), ионизируют ее и порождают полярные сияния.

Такие магнитосферные возмущения возникают после мощных солнечных вспышек или других солнечных явлений, когда происходит

выброс большого количества вещества и возникают ударные волны в солнечном ветре.

Возмущенное состояние магнитосферы существует продолжительное время (от нескольких часов до нескольких суток) и называется магнитной бурей. Отдельные периодически возникающие выделения энергии получили название *суббурь*, длительность которых составляет в среднем от одного до двух часов.

Внутри магнитосферы в области дипольного магнитного поля Земли формируются два образования — *радиационные пояса* (области захвата энергичных частиц) и *плазмосфера* (холодная плазма ионосферного происхождения), которая вращается вместе с Землей (рис. 7). Кроме того, в этой зоне во время магнитных бурь формируется кольцевой ток. Размер этой части магнитосферы зависит от степени магнитной возмущенности и составляет от 30000 до 60000 км.

Радиационные пояса образуются захваченными в геомагнитную ловушку заряженными

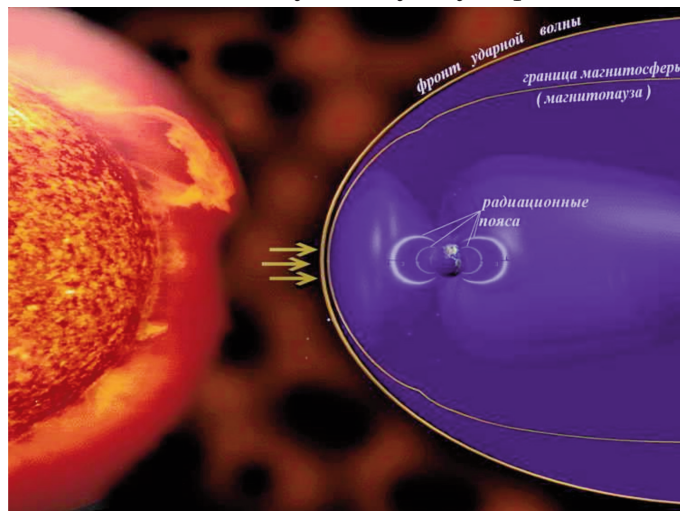


Рис. 7. Строение магнитосферы Земли.

частицами — протонами с энергиями от сотен кэВ до сотен МэВ и электронами с энергиями от десятков кэВ до десятков МэВ. Потоками высокоэнергичных электронов (>100 кэВ) формируются внутренний и внешний радиационные пояса. Внутренний пояс находится в стабильном состоянии, так как высокоэнергичные частицы из межпланетной среды не проникают на эти высоты, а другие геофизические факторы не нарушают его баланс.

Внешний радиационный пояс, заполненный электронами, — динамичное образование. Во время магнитных бурь интенсивность потока электронов в широком диапазоне энергий увеличивается на несколько порядков. Отметим, что радиационные пояса Земли являются главным источником магнитосферной радиации — потоков высокоэнергичных электронов и протонов.

В наиболее удаленных областях магнитосферы структура магнитного поля зависит от межпланетной среды и проецируется на Землю на геомагнитных широтах $65-75^\circ$ в виде *аврорального овала*. Область, расположенная ближе к полюсу от авроральной зоны, с открытыми магнитными силовыми линиями, уходящими в межпланетное пространство, называется *полярной шапкой*.

По физической природе околоземное космическое пространство — это взаимодействующие между собой верхняя атмосфера Земли (ионосфера) и магнитосфера. Ионосфера — это область атмосферы, содержащая кроме нейтрального газа значительное количество заряженных частиц (электронов и ионов). Ионизация поддерживается ультрафиолетовым излучением Солнца. В высоко-

широтной ионосфере магнитосферные возмущения сопровождаются высыпанием высокоэнергичных заряженных частиц, которое вызывает дополнительную ионизацию. Количество нейтральных частиц в ионосфере на несколько порядков больше, чем электронов и ионов. Структура ионосферы определяется высотным распределением температуры и газовым составом. Широтная структура ионосферы является следствием магнитосферно-ионосферного взаимодействия и зависит от фазы солнечного цикла, геомагнитной возмущенности, времени года, местного времени и таких региональных особенностей, как магнитная аномалия и локальная динамика атмосферы, связанная с системой нейтральных ветров.

Высокоширотная ионосфера имеет сложную пространственную структуру. В авроральной зоне ($65-75^\circ$) формируется локальный пик электронной плотности. Авроральную зону и среднеширотную ионосферу разделяет область резкого снижения электронной плотности — так называемый *главный ионосферный провал*.

С ростом магнитной возмущенности полярная шапка расширяется, авроральная зона и главный ионосферный провал смещаются в сторону экватора, при этом динамические плазменные процессы, высыпание заряженных магнитосферных частиц, появление электрических полей и токов создают физические условия для возникновения плазменных неустойчивостей, порождающих неоднородности электронной плотности различного масштаба. Наиболее интенсивные неоднородности развиваются в зонах формирования токо-

вых систем — нижней авроральной ионосфере (около 100 км) и экваториальной зоне.

Во время магнитосферной бури в ночной авроральной зоне происходит высыпание заряженных частиц с широким энергетическим спектром, вызывающее дополнительную ионизацию. Высыпающиеся на ночной стороне Земли частицы с энергиями 10 кэВ разогревают ионосферу и фактически являются основным источником ионизации. Происходят существенные изменения ионосферных параметров, связанные с магнитосферной суббурей, — в ионосфере наблюдается суббуря, которая по мере развития магнитосферных возмущений смещается в более низкие широты. Взаимосвязанные процессы, протекающие в ионосфере, оказывают огромное влияние на физические условия в околоземной космической среде. Таким образом, воздействие на околоземное космическое пространство и Землю (рис. 8) определяется:

- 1) солнечным ветром и межпланетным магнитным полем;
- 2) солнечным ультрафиолетовым и рентгеновским излучением;
- 3) солнечными космическими лучами;
- 4) галактическими космическими лучами.

Солнечный ветер и ультрафиолетовое излучение формируют плазменные оболочки нашей планеты — магнитосферу и ионосферу, внутри которых развиваются физические условия для их взаимодействия (высыпающиеся заряженные частицы, электрические токи и поля, акустогравитационные волны и др.). Эти процессы носят нестационарный характер и испытывают временные вариации, связанные с вращением Солнца и Земли, сол-

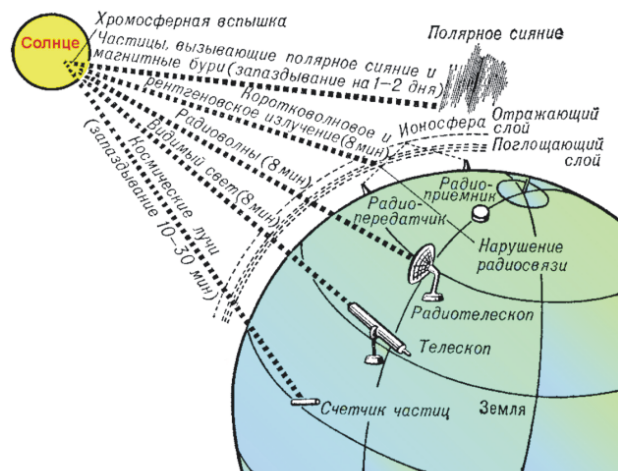


Рис. 8. Влияние солнечной вспышки на Землю.

нечной активностью, а также с состоянием околоземной среды.

Солнечные космические лучи — это спорадически появляющиеся после вспышек на Солнце потоки частиц, в основном, протонов, с энергиями до 10 ГэВ. Если вблизи Земли энергия частицы больше 10 МэВ, считается, что произошло солнечное протонное событие.

Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из ядер и электронов, попадающих в околоземное космическое пространство и на Землю из межзвездного пространства, и не относятся к солнечным факторам. Энергетический спектр и угловое распределение потока галактических космических лучей с энергиями от 100 МэВ до 10 ГэВ модулируются в гелиосфере и изменяются со временем. Поток ГКЛ испытывает влияние солнечного ветра. В эпоху максимума солнечной активности солнечный ветер препятствует проникновению ГКЛ в гелиосферу, поэтому максимальные потоки

регистрируются на Земле при низкой солнечной активности.

Космическая погода

Околоземное космическое пространство (ОКП), включающее в себя верхнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу, заполнено низкотемпературной плазмой, и его состояние определяется солнечной и геомагнитной активностью. С развитием аэрокосмической и ракетной техники ОКП не только интенсивно изучается, но и вошло в сферу практической деятельности. В ОКП работает много космических аппаратов (КА) научного и прикладного назначения, в том числе связанных с интересами обороны страны. Надежная и эффективная работа КА определяется не только использованием новейших технологий, но и состоянием окружающей среды. Работоспособность и эффективность крупных инженерно-технических систем наземного базирования, например систем радиосвязи в широком диапазоне частот, радиолокации, в том числе загоризонтной, радионавигации, радиопеленгации, системы автоматики и автоблокировки, управления протяженными ЛЭП и железнодорожными сетями в высоких широтах, также во многом зависят от физических процессов, протекающих на Солнце и в ОКП.

Нам необходимо иметь полную информацию об этих процессах, знать их природу, отслеживать динамику, оценивать последствия и уметь отличать процессы естественного происхождения от процессов, вызванных искусственными воздействиями.

К наиболее значимым эффектам космической погоды можно отнести следующие.

1. Воздействие ионизирующего (радиационного) космического излучения на радиоэлектронное оборудование КА и самолетов, радиационная опасность для космонавтов, экипажей самолетов, выполняющих полеты на большой высоте или в высоких широтах.
2. Изменение орбит КА вследствие разогрева ионосферы и верхней атмосферы.
3. Нарушения условий распространения радиоволн, нарушения в системах радиосвязи, радиолокации и радиопеленгации вследствие изменения состояния ионосферы.
4. Возникновение в приполярных и полярных широтах геоиндуцированных токов в длинных проводящих системах: ЛЭП, трубопроводах, кабельных линиях и линиях связи, автоматических линиях железных дорог.
5. Изменение химического состава атмосферы Земли.
6. Воздействие на погоду и климат Земли.
7. Влияние на биосферу и человека.

Рассмотрим эти факторы подробнее.

Воздействие космической радиации

Ионизирующее излучение — это потоки элементарных частиц, которые при взаимодействии с веществом вызывают ионизацию атомов и молекул, вследствие чего нарушается его структура. Бомбардировка этими частицами «начинки» КА — одна из главных причин их выхода из строя. Основными компонентами космической радиации являются галактические и солнечные космические лучи, а также электроны и ионы радиационных поясов Земли. Наибольшую опасность представляют частицы с энергией 30-50 МэВ, поэтому прогноз радиационной обстановки в космосе по-прежнему весьма актуален.

Учет радиационной опасности особенно важен при выборе рабочей орбиты для пилотируемых КА, поскольку в живых организмах радиация вызывает изменения на клеточном уровне — нарушается структура белков, и клетка гибнет. Если радиационное облучение нельзя полностью исключить, необходимо исследование воздействия ионизирующего излучения на живые организмы с целью установления минимального уровня радиации для исключения или минимизации опасных последствий.

Известно несколько механизмов воздействия радиации на аппаратуру КА. Радиация особенно опасна для электроники. Интегральные схемы состоят из множества микроэлектронных элементов. Разрушение кристаллических решеток в этих элементах, накопление зарядов в диэлектриках приводят к изменениям параметров устройств, а иногда и к выходу их из строя.

Часто на КА возникает эффект объемной электризации. Релятивистские электроны с энергией больше 2 МэВ пробивают обшивку корабля и тормозятся, «застревают» в каких-либо диэлектрических элементах приборов и устройств. Накапливаясь, электроны создают объемный заряд. При достижении некоторой критической величины возникает пробой, что приводит к нарушениям в работе электроники и даже к полной потере работоспособности устройств.

Последние исследования показали, что иногда негативные последствия вызываются даже единичными частицами. Особенно опасны они для элементов памяти — одна частица способна изменить логическое состояние, что приво-

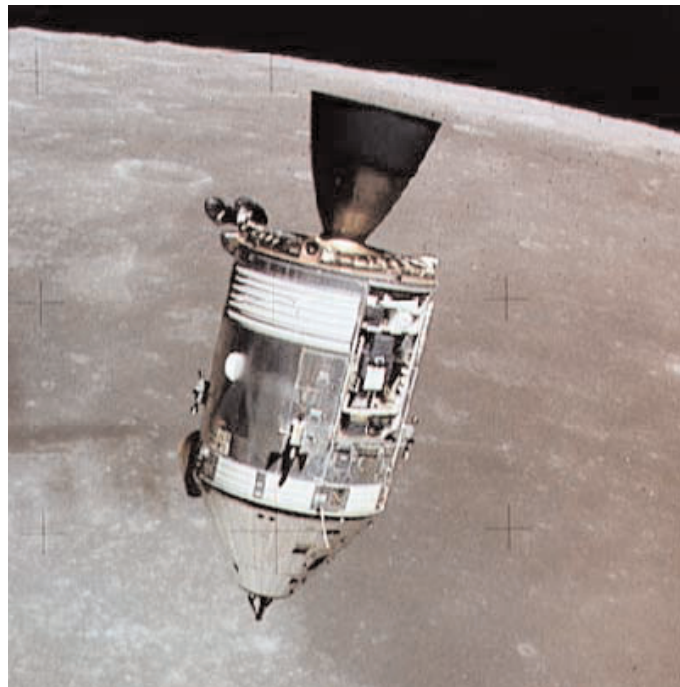


Рис. 9. Космические аппараты серии «Аполлон» стали первыми пилотируемыми кораблями, вышедшими из-под защиты магнитосферы. Прогнозирование солнечной активности будет особенно важно при планировании будущих межпланетных экспедиций. © NASA

дит к ложному срабатыванию аппаратуры и прочим несанкционированным действиям. Защиту от радиационной опасности обеспечивают специальные конструктивные решения, которые позволяют полностью защитить наиболее уязвимые детали и узлы или хотя бы свести воздействие к минимуму. Принимаются и другие меры безопасности для жизненно важных объектов.

Потоки космической плазмы при взаимодействии с КА создают на его поверхности электростатический заряд, вызывая внешнюю электризацию. Аппарат электризуется до тех

пор, пока вся его поверхность не приобретет равновесный потенциал, который может достигать десятков киловольт. Этот потенциал создают электроны с энергиями 1-100 кэВ из внешнего радиационного пояса Земли.

Если потенциал распределяется по диэлектрическим частям КА неравномерно, в некоторый момент может возникнуть электрический разряд. Аналогично формируется и внутренняя электризация. Образующиеся в момент разряда помехи, импульсы тока, проникая в электрические цепи, в электронные системы бортовой аппаратуры, вызывают сбои в ее работе, а иногда делают ее полностью неработоспособной.

Во время сильных магнитных бурь и суббурь в ОКП концентрация электронов с энергиями 1-100 кэВ повышается, что значительно увеличивает неоднородность заряда на поверхности КА и в случае разрядки может привести к выходу его из строя. Чтобы обезопасить аппарат, большую часть его поверхности делают токопроводящей (металлизируют). Протонные вспышки тоже негативно влияют на работу КА: происходят сбои в бортовой электронике, а воздействие протонов на поверхность панелей солнечных батарей вызывает их деградацию (тускнеет стеклянная поверхность).

Межпланетное пространство и ОКП имеют разные «климатические» особенности, так как «населены» заряженными частицами разного энергетического уровня. В межпланетной среде радиационную обстановку формируют галактические и солнечные космические лучи. При планировании будущих пилотируемых космических полетов на другие планеты надо

учитывать как ГКЛ, интенсивность которых максимальна в минимуме солнечной активности, так и солнечные космические лучи, которые практически отсутствуют в минимуме, так как нет вспышек. Поскольку КА на высокоапогейной или геостационарной орбите большую часть времени находится во внешней магнитосфере, которая также доступна для галактических и солнечных космических лучей, он подвергается тем же опасностям. На этих же орбитах во время магнитных бурь усиливаются потоки релятивистских электронов, поэтому эффекты внешней и внутренней электризации на них также встречаются. С учетом этих энергетических особенностей и гелиогеофизических прогнозов рассчитываются орбиты и время нахождения на них практически всех КА.

Поскольку среди КА на более низких (меньше 1000 км) орбитах есть и пилотируемые, требования к обеспечению их безопасности особенно высоки. Потоки солнечных космических лучей здесь ослаблены в несколько тысяч раз магнитным полем Земли (за исключением полярных областей), однако во время мощных геомагнитных бурь, когда происходит выброс солнечных космических лучей, эта защита значительно ослабевает.

Повышенное радиационное излучение становится небезопасным и на более низких высотах, на уровне атмосферы Земли. Во время сильных гелиогеофизических событий могут наблюдаться сбои в работе наземной электроники и бортовой аппаратуры воздушных судов, особенно на больших высотах и в полярных районах.

Даже после краткого обзора эффектов космической радиации (без рассмотрения проблем материаловедения, биологических аспектов радиации и др.) становится понятной важность знания радиационной обстановки для практической космической деятельности.

Солнечная активность и торможение спутников

Параметры орбит КА выбираются с учетом плотности атмосферы. Чем выше плотность, т.е. чем ниже проходит орбита, тем существеннее аэродинамическое торможение. Низкие орбиты (ниже 800 км), проходят в ионосфере, электронная плотность которой существенно меняется в зависимости от гелиогеофизической ситуации. В спокойных условиях электронная плотность мала и не может значительно влиять на торможение, но во время вспышек и других солнечных явлений плотность нейтральных частиц растет, что приводит к значительному торможению. Современные модели ионосферы и проведенные на их основе расчеты позволяют использовать накопленные знания на практике.

Во всех современных моделях верхней атмосферы и ионосферы при расчете разогрева верхней атмосферы учитывается поток солнечного излучения с длиной волны 10,7 см. При переходе от минимума к максимуму солнечной активности интенсивность этого потока возрастает примерно в три раза. Зависимость плотности атмосферы от солнечной и геомагнитной активности увеличивается с высотой. Расчеты показывают, что времена жизни спутников на высотах около 400 км, запущенных в разные эпохи солнечной активности, отличаются в пять раз. Пренебрежение

этими факторами привело к преждевременному прекращению работы орбитальной станции «Скайлэб» в 1977 г.: не была учтена возрастающая плотность атмосферы в максимуме солнечной активности.

Рост геомагнитной активности обычно мало влияет на длительные изменения плотности атмосферы. Во время сильных магнитных бурь, когда происходит джоулев нагрев ионосферы (этот процесс носит локальный характер), могут возникнуть проблемы с управлением КА. При этом появляются сильные локальные неоднородности в атмосфере, и если аппарат «наталкивается» на такую неоднородность с плотностью в несколько раз выше, чем в окружающей среде, он может не только резко изменить орбиту, но и развернуться, что приведет к нарушению его ориентации и потере управления. Известны случаи, когда было

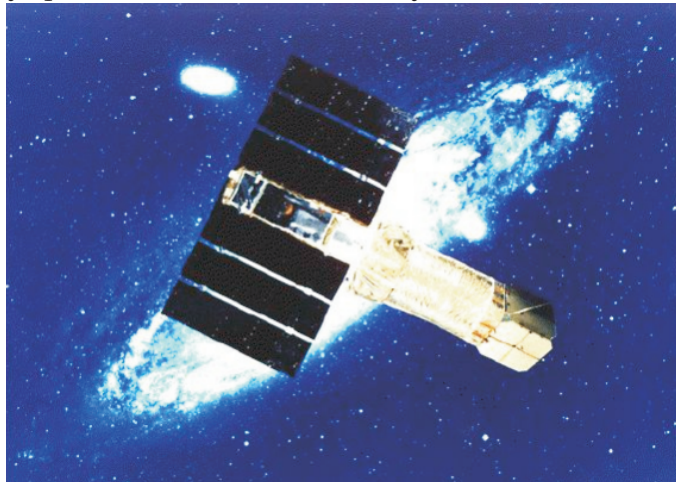


Рис. 10. Космический рентгеновский телескоп ASCA потерял управление из-за повышенного атмосферного торможения. К разогреву атмосферы и повышению ее плотности в области орбиты телескопа привела солнечная вспышка 14 июля 2000 г. © ISAS, NASA

потеряно управление одновременно 1000 навигационных спутников. Только оперативный гелиогеомагнитный прогноз поможет избежать таких неприятностей.

Ионосферное распространение радиоволн

Ионосфера обеспечивает коротковолновую радиосвязь. Самые первые опыты дальних радиокommunikаций были проведены более 100 лет назад, но уже тогда упоминался некий внешний фактор, который влияет на условия прохождения радиоволн. Дело в том, что Солнце, магнитосфера и ионосфера Земли обладают собственным радиоизлучением. Чтобы организовать радиосвязь на дальних расстояниях, необходимо разработать методику прогноза состояния радиоканала, которое определяется поведением ионосферы, зависящим от солнечной и геомагнитной активности. Развитие техники позволило использовать для радиосвязи более высокие частоты, что исключило зависимость от свойств ионосферы, однако ионосферный радиоканал по-прежнему играет большую роль в обеспечении работы многих радиосредств, и исследование его свойств так же актуально. Развиваются и другие научные направления, например, изучение взаимодействия радиоволн с ионосферной плазмой, исследование эффектов искусственного воздействия на эту плазму и др.

Радиоволны распространяются вдоль поверхности Земли по наклонным трассам, что позволяет расширить диапазон рабочих частот. При наклонном падении радиоволны на слоистую ионосферу происходит ее рефракция (отражение), т.е. волна возвращается к поверхности Земли. Дальность радиосвязи зависит от высоты отражающего слоя. При

благоприятных условиях возможна многоскачковость, что обеспечивает дальнюю радиосвязь. Качество связи зависит от структуры ионосферы. Чем выше «зеркало», тем больше амплитуда отраженного сигнала. На условия его прохождения существенно влияют горизонтальные неоднородности и градиенты. Снижение качества может быть обусловлено многолучевостью принимаемого сигнала. Она возникает из-за физических условий в ионосфере: отражения сигнала на разных высотах вследствие вертикальной слоистости, особенностей преломления и отражения волн, а также других факторов, приводящих иногда к большим искажениям, а то и к полному замиранию сигнала.

В течение солнечного цикла ионосфера подвержена большим изменениям (рис. 11). Во время солнечных вспышек и магнитосферных возмущений в ионосфере образуются неоднородности разных масштабов, которые влияют на распространение радиоволн. В высоких широтах высыпаящиеся заряженные частицы создают дополнительную ионизацию, а в экваториальной зоне возникают мощные токовые системы. Все это приводит к образованию неоднородностей разного масштаба. Кроме того, с увеличением энергии высыпаящихся частиц в полярных районах возникают условия, при которых излучаемая электромагнитная энергия частично или полностью поглощается и рассеивается. Происходит нарушение связи (явления в D-слое ионосферы на высотах 60-90 км). Такие явления обычно связывают с повышением электронной концентрации вследствие рентгеновского излучения после мощной солнечной вспышки.

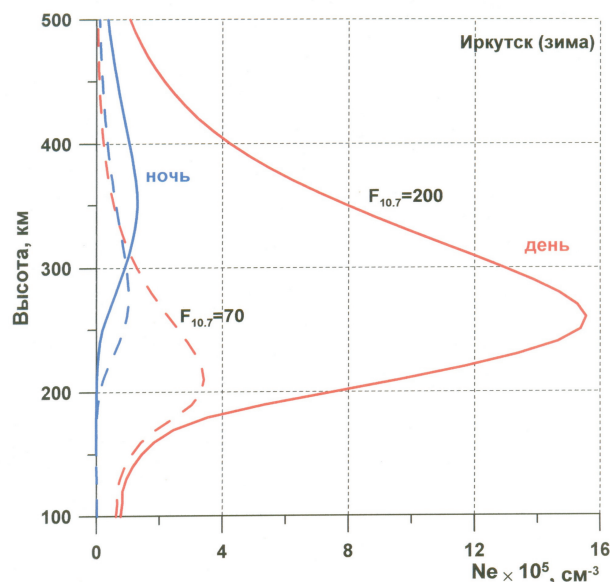


Рис. 11. Профили электронной концентрации в ионосфере в максимуме (сплошные линии) и в минимуме солнечной активности (штриховые линии).

Другим источником заряженных частиц, способных вызвать аномальное поглощение радиоволн, являются солнечные космические лучи, которые после протонных вспышек способны проникать в слои атмосферы ниже 30 км. В высоких широтах иногда полностью блокируется радиосвязь, которая на практике во многих случаях оказывается основной, так как на широтах выше 80° связь с помощью геостационарных спутников обеспечить невозможно. Это особенно важно для надежной работы средств навигации воздушных судов в полярных районах.

Для эффективной работы по осуществлению радиосвязи в коротковолновом диапазоне необходим прогноз солнечной и геомагнитной

активности, хорошие модели ионосферы для всех географических широтных зон и оперативные гелиогеофизические данные для корректировки моделей расчета конкретных ионосферных радиоканалов.

Спутниковые технологии позволили создать новые системы связи, например, в радионавигации, где используются высокие радиочастоты (> 1 ГГц), для которых ионосфера прозрачна. При этом спутники находятся на удалении порядка 20000 км. В частности, разработана спутниковая глобальная система позиционирования (GPS, Global Positioning System), в основе которой лежит триангуляционный метод определения координат с приемом сигнала как минимум от четырех спутников. Зная время прохождения сигнала от спутников и их точное расположение (оно заложено в излучаемом сигнале), можно определить координаты объекта.

Однако на практике определить координаты с требуемой точностью не всегда возможно. Погрешность может составлять десятки метров. Оказалось, что на распространение высокочастотного сигнала влияет неоднородность ионосферы. Принимаемый сигнал, проходя через ионосферу, может менять свой уровень, т.е. мерцать в зоне приема. Индекс мерцания, характеризующий качество принимаемого сигнала, в средних широтах равен 0,4-0,6, а во время магнитных бурь он больше единицы. В высокоширотных и экваториальных зонах вследствие сильных мерцаний сигнал на некоторое время может вообще исчезнуть. В этом случае сложно определить координаты движущегося объекта. Кроме того, над объектом может происходить движение ионо-

сферных неоднородностей со скоростью более 100 м/с, динамический режим которых в экваториальной зоне определяется нейтральными ветрами в ионосфере, а в высоких широтах — ионосферными электрическими полями.

Существует и другой негативный фактор, пока еще слабо изученный. Во время солнечных вспышек могут происходить мощные всплески излучения в радиодиапазоне. Мощность этих радиосигналов настолько высока, что блокируется работа спутниковых передатчиков.

Тем не менее, сеть систем спутниковой навигации расширяется: создается российская система ГЛОНАСС, европейская система «Галилей», разрабатываются новые технические решения, позволяющие учитывать влияние ионосферы.

Геомагнитные возмущения и геоиндуцированные токи

Электрические токи в нижней ионосфере (высота 100 км) вызывают вариации геомагнитного и геоэлектрического полей на поверхности Земли. Возникают геоиндуцированные токи, существующие постоянно вследствие вращения Земли относительно токопроводящей ионосферы.

В спокойных геомагнитных условиях эти токи незначительны. В случае же магнитосферных возмущений они резко возрастают, особенно если частота электромагнитных колебаний достаточно высока.

Геомагнитная реакция на изменения ионосферных токов на поверхности Земли складывается из действия магнитных полей токов в ионосфере и земных (теллурических) токов, генерируемых в верхних слоях Земли. Таким

образом, к геомагнитным вариациям добавляются геоэлектрические. Частотный спектр геоиндуцированных токов определяется спектром геоэлектрического поля и зависит от свойств проводящего слоя поверхности Земли, где расположена техническая система. Во время сильных магнитных возмущений геоиндуцированные токи могут достигать сотен ампер. Они влияют на системы энергоснабжения и на длинные токопроводящие линии (линии связи, трубопроводы, железные дороги). Особенно эти токи значительны в высоких широтах, где чаще регистрируются магнитные бури и суббури высокой интенсивности.

В системах электропередач геоиндуцированные токи (рис. 12), проходя через заземления силовых трансформаторов, вызывают дополнительное подмагничивание сердечников, что приводит к сбоям рабочих режимов трансформаторов, их нагреву и выходу из строя. Возможны и другие нарушения, в том числе сбой в автоматике. Чтобы персонал, эксплуатирующий протяженные линии, мог принять соответствующие меры, необходимы предупреждения о возможных магнитных бурях. Практика в Заполярье, например в Норильске, показала, что информация о начале магнитных бурь позволяла диспетчерам системы энергоснабжения своевременно принимать решения по обеспечению устойчивой работы энергосистем. Самое нашумевшее событие этого рода за последние годы — магнитная буря 1982 г., когда провинция Квебек (Канада) оставалась без электричества в течение 9 часов.

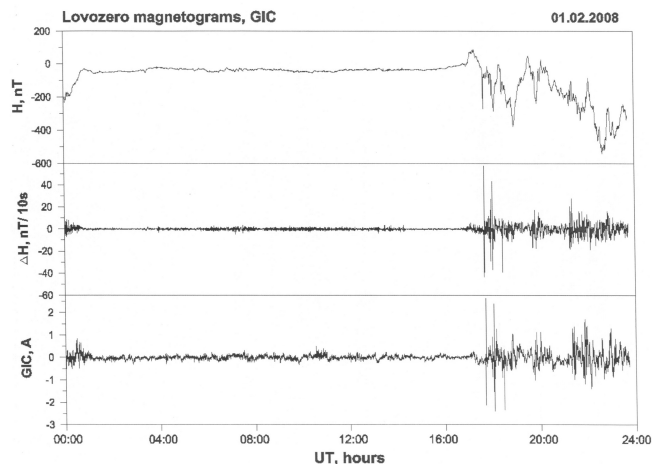


Рис. 12. Событие 1 февраля 2008 г. На графиках сверху вниз — магнитное поле в Ловозеро, производная поля, индуцированный ток в амперах (Ревда, Мурманская обл.).

Эффекты индуцированных токов, которые отмечались уже в XIX веке, стали первыми свидетельствами связи солнечной активности и магнитных бурь (полярных сияний) со сбоями в работе телеграфных линий. В телефонных и телеграфных проводных линиях связи индуцированные токи повышают ток и напряжение до 100 мА и нескольких сот вольт, что приводит к сбоям в работе.

В нефте- и газопроводах геоиндуцированные токи проявляют себя опосредованно: приводят к снижению эффективности электрохимической катодной защиты, используемой для защиты металла от коррозии.

Влияние космических факторов на атмосферу Земли

Связь метеорологических изменений с циклами солнечной активности исследуется давно, и полученные данные убедительно свидетельствуют о ее наличии. Обнаружены резонанс-

ные отклики атмосферы на период вращения Солнца, составляющий в среднем 27 дней. Эта периодичность прослеживается в ряде метеопараметров, например, в аномальных температурах и повторяемости основных форм циркуляции. Установлено, что при большом количестве солнечных пятен давление растет над сушей в зимнее время, а над акваторией и океаном — в летнее. Динамика существующих в атмосфере Земли квазицентров низкого и высокого давления также зависит от уровня солнечной активности. Смещение этих центров приводит к изменению режимов циркуляции в атмосфере и изменению траектории движения циклонов, играющих важную роль в погодных условиях. Отмечено, что траектории циклонов в северных районах (в Северном море) в максимуме солнечной активности проходят на 3 градуса южнее, чем в минимуме.

Некоторые факты свидетельствуют об изменениях циркуляции, связанных с другими геофизическими явлениями, например, с пересечением Землей определенных границ секторов ММП в зависимости от солнечной активности. Во многих исследованиях отмечается связь вариаций потоков ГКЛ с облачностью, температурой в нижней атмосфере, осадками и т. д.

В течение 11-летнего солнечного цикла электромагнитное излучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах может меняться на десятки процентов, но вариации солнечной постоянной составляют десятые доли процента. Возможный механизм солнечно-атмосферных связей следует рассматривать в зависимости от геоэффективности солнечного излучения различных длин волн.

Изменение уровня ультрафиолетового излучения наиболее эффективно воздействует на атмосферу посредством радиационно-химических процессов, в первую очередь, изменения содержания озона. Вариации общего содержания озона (ОСО) почти совпадают с 27-дневным циклом. Максимум ОСО расположен на высоте 20-25 км. Озон относится к малым газовым составляющим в атмосфере Земли: его объемная доля составляет $4 \cdot 10^{-7}$. Между тем, его роль чрезвычайно велика: озон — это единственный газ, который эффективно поглощает ультрафиолетовое излучение и тем самым предохраняет всю биосферу от опасной радиации. Поэтому изучение поведения озона является одним из основных вопросов в физике атмосферы.

На озон воздействуют солнечные и галактические космические лучи, а также релятивистские электроны, высыпавшиеся из радиационных поясов Земли во время высокоширотных геомагнитных возмущений. Экспериментально установлено, что после мощной солнечной вспышки ОСО в высоких широтах значительно уменьшается. Это происходит вследствие определенных химических реакций в атмосфере при ее ионизации частицами высоких энергий. Протонные солнечные вспышки оказывают наибольший эффект, который может сохраняться в течение нескольких дней. Их воздействию подвергается озон выше максимума ОСО на высотах 30-60 км. Ниже 30 км доминирует влияние ГКЛ. Главным «убийцей» озона является окись азота (NO), возникающая в результате сложных химических реакций вследствие ионизации атмосферы. После солнечного со-

бытия концентрация NO на высоте порядка 50 км возрастает в 10 раз. Окись азота способна существовать в атмосфере несколько месяцев и эффективно уничтожать озон, если принять во внимание интенсивную глобальную атмосферную циркуляцию.

Корпускулярные потоки ограничиваются только верхней атмосферой, вызывая ее ионизацию и нагрев в высоких широтах, тогда как частицы высоких энергий попадают в атмосферу на всех широтах. Для этих частиц с их малой плотностью верхняя атмосфера прозрачна, и они не способны заметно нагреть тропосферу и стратосферу. Однако есть результаты исследований, подтверждающие существование физических механизмов, в которых высокоэнергичные частицы могут играть роль триггера в солнечно-атмосферных связях.

К сожалению, несмотря на многочисленные попытки, пока не удастся построить целостную модель влияния солнечной активности и геомагнитных возмущений на формирование погодообразующих факторов.

Влияние солнечной активности на атмосферные процессы не вызывает сомнения, но количественные оценки ее вклада противоречивы. И это вполне объяснимо, так как здесь нужен не только строгий статистический анализ связей (для этого необходимы статистически однородные длинные ряды метеорологических и геофизических наблюдений), но и физически строго обоснованный анализ механизмов причинно-следственных связей. Задача осложняется тем, что в системе «Солнце — атмосфера Земли» связь между физическими факторами и метеорологическими процессами нелинейна.

Солнечная активность и изменения климатической системы Земли

Не угасает интерес к выявлению связей между солнечной активностью и более длительными изменениями гидрометеорологических процессов на Земле (рис. 13). Для анализа вековой и сверхвековой цикличности используют косвенные характеристики климата (керны льда, дендрохронологические данные, отложения ила и т. д.). В качестве индекса солнечной активности используют уровень ^{14}C (углерода-14), определяемый по содержанию в годичных кольцах деревьев. Интенсивность космических лучей связана с солнечной активностью и влияет на концентрацию ^{14}C в деревьях.

Анализ исторических данных о явлениях на Солнце, а также радиоуглеродные данные позволили установить, что кроме 11-летних циклов существуют циклы с периодами примерно 65 и 250 лет. В результате нелинейного взаимодействия нескольких циклов могут возникать новые цикличности, например 36 лет. Показано, что вековые изменения температуры поверхности океана хорошо коррелируют с солнечной активностью последние 120 лет.

Длительность вековых циклов в климате Земли колеблется в пределах от 60 до 120 лет. За последние несколько столетий длительность квазивекового цикла составляла около 120 лет. С такими же периодами наблюдалось повышение температуры в 1650-1660, 1730-1740, 1840-1860 и 1930-1940 гг.

В течение длительного времени в качестве основного принимался 11-летний цикл солнечной активности, и именно его эффекты пытались проследить во всех геофизических процессах. Однако в изменениях климати-

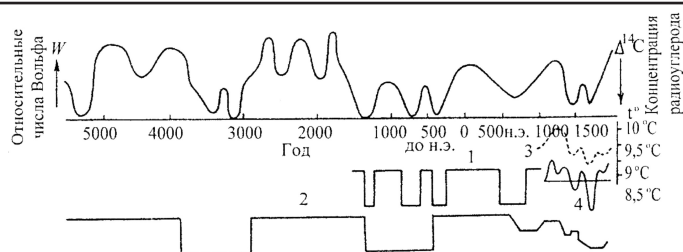


Рис. 13. Зависимость температуры Земли от запятанности Солнца. 1 — движение ледников в Альпах (по Ладури); 2 — движение ледников на земном шаре (по Дентону); 3 — январская температура в Англии; 4 — суровость зим в Западной Европе. Верхняя кривая воспроизводит кратковременные изменения концентрации радиоуглерода и является одновременно показателем изменения солнечной активности за последние 7000 лет.

ческой системы выявлены циклы длительностью 150-250 лет. Эти же периодичности обнаруживаются в колебаниях ледовитости у берегов Исландии за последние 1000 лет. Анализ повторяемости ранней и поздней весны показывает, что в сроках их наступления присутствует 150-250-летний цикл.

Особое внимание исследователей Солнца и климатических изменений на Земле привлекают так называемые Шпереровский (1400-1510 гг.) и Маундеровский (1640-1715 гг.) минимумы солнечных пятен, а также средневековый максимум солнечных пятен (1120-1280 гг.). Кроме этого, вызывает интерес начавшийся в начале XIX века общий рост солнечной активности (рис. 14).

Анализ, проведенный на большом временном масштабе, показывает, что активность Солнца хорошо коррелирует с поверхностной температурой Земли. Все это свидетельствует о том, что у нас больше оснований для поисков влияния солнечной активности на климат

Земли, чем на погоду, хотя и исследование погодообразующих факторов представляет огромный интерес и имеет большое практическое значение.

На основе современных данных о количестве солнечных пятен и об уровне выработки в атмосфере ^{14}C под воздействием космических лучей показано, что за последние 7000 лет разные по длительности периоды отсутствия солнечной активности случались неоднократно. Можно полагать, что и в будущем вполне возможно наступление периодов, подобных Маундеровскому минимуму.

Глобальное потепление: Солнце или антропогенный фактор?

Глобальное потепление стимулирует исследования связей между климатическими изменениями и солнечной активностью. Возможно, сегодня этот вопрос является главным в проблеме космической погоды, в исследованиях солнечного и геомагнитного влияния на глобальное потепление. Влияние Солнца на Землю нельзя не принимать во внимание, поскольку планетарные процессы повышения и понижения температуры на больших временных масштабах связаны с солнечной активностью. Не вызывает сомнения, что глобальная приземная температура воздуха увеличилась, но нельзя также не отметить, что это повышение началось в конце XIX века, т.е. в те времена, когда главный источник увеличения концентрации углекислого газа (CO_2) на 25% в атмосфере (углеводородное топливо) еще не был «включен».

Антропогенная нагрузка в виде увеличения концентрации CO_2 за последние 100 лет возросла на 50%. Однако рост среднегодовых тем-

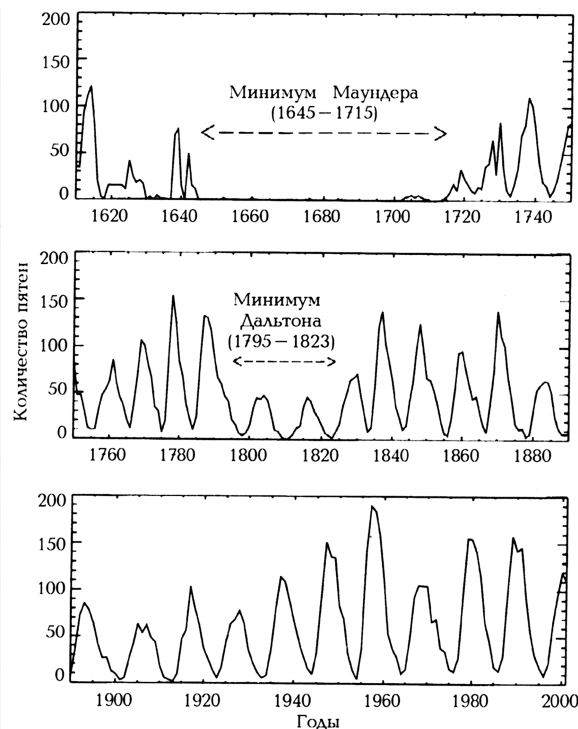


Рис. 14. Количество солнечных пятен с 1610 по 2001 гг. Во время минимумов Маундера и Дальтона число солнечных пятен аномально мало, заметно возрастание солнечной активности за последние 100 лет.

ператур не был монотонным. Необходимо также иметь в виду, что наряду с ростом температуры за последние 100 лет повышалась и солнечная активность.

Влияние парниковых газов на атмосферу бесспорно, но по-прежнему неясно, является ли накопление CO_2 определяющим фактором потепления в планетарном масштабе и способно ли оно в будущем привести к глобальной катастрофе.

В основе сегодняшней парадигмы глобального потепления лежит утверждение о том, что решающую роль в нем играет увеличение кон-

центрации CO_2 и других парниковых газов, вызванное ростом промышленного производства. Чтобы избежать катастрофы, предлагается взять под контроль выброс этих газов в атмосферу. Однако возрастание концентрации CO_2 должно намного сильнее влиять на температуру нижних слоев атмосферы, чем на температуру приземных слоев атмосферы. Между тем, анализ длительных рядов спутниковых измерений температуры этих слоев не показывает каких-либо определенных признаков глобального потепления.

Основанием для утверждения, что повышение концентрации CO_2 в атмосфере ведет к катастрофическим последствиям, служат компьютерные расчеты климатической системы, основанные на модели глобальной циркуляции. Эти расчеты, на основании которых делаются прогнозы будущих климатических изменений, содержат значительные неопределенности. Хотя подобные модели действительно дают ценную информацию о климате будущего, не стоит преувеличивать успехи в моделировании климата. Нам все еще не удается адекватно описать физические процессы, а также учесть многие, на первый взгляд мало-значительные, факторы, формирующие климатическую систему Земли. Для создания компьютерной модели климата необходимо учесть около пяти миллионов различных переменных, оценить степень их влияния и взаимосвязь, что на сегодняшний день невозможно. Выделить из ряда других переменных влияние роста концентрации CO_2 на климатическую систему не представляется возможным. Поэтому нельзя разделить последствия



Рис. 15. В основе современных «публичных» представлений о глобальном потеплении лежит предположение о его антропогенном характере. Согласно этому предположению, повышение температуры атмосферы Земли связано, в основном, с техническим выбросом парниковых газов.

солнечной изменчивости и роста концентрации парниковых газов.

Учитывая возрастающий объем прямых и косвенных данных, появление успешных работ по реконструкции климата Земли и более глубокое понимание различных климатических периодов в прошлом (в частности, ледникового периода), можно надеяться на прогресс в понимании и оценке количественного вклада солнечной активности в изменения погоды и климата. С другой стороны, мы знаем о существовании солнечных циклов, но до сих пор не знаем, как появляются минимумы типа Маундеровского. Механизм их влияния на климат Земли тоже пока неизвестен.

Гелиогеофизические и медико-биологические аспекты

Жизнь на Земле и ее эволюция подчиняются ритмам и циклам, процессам и явлениям, про-

исходящим на Солнце и в окружающем Землю космическом пространстве. Поэтому Солнце, Земля и ОКП, вся совокупность происходящих в них процессов и явлений должны изучаться как единая система — от Солнца с его плазменным окружением до магнитосферы Земли, ионосферы, атмосферы, океана и биоты. Уже в начале XIX века были известны свидетельства влияния числа солнечных пятен на сельскохозяйственное производство, численность животных и т. д., но эти наблюдения вызывали недоверие, поскольку невозможно было установить какую-либо реальную физическую связь между биосферой и космосом.

Большой анализ имевшихся в тот период фактических материалов провел Александр Леонидович Чижевский. Он сформулировал принципиально новое научное направление о влиянии космоса, прежде всего Солнца, на атмосферу. На большом временном масштабе были обнаружены синхронные с активностью Солнца вспышки эпидемий и ритмические изменения смертности населения. Вариации некоторых биологических изменений также свидетельствовали о существовании внешних факторов воздействия, связанных с процессами на Солнце. Работы Чижевского получили мировое признание, он по праву считается основоположником гелиобиологии. Космические исследования в XX веке расширили представление об околоземном пространстве. Данные об изменениях электромагнитного поля Земли, межпланетного магнитного поля, солнечного радиоизлучения были использованы для исследования причинно-следственных связей в гелиобиологии (рис. 16 и 17). За срав-

нительно короткий срок гелиобиология приобрела статус одной из основных дисциплин в гелиогеофизических исследованиях.

Специальные эксперименты позволили выявить связь экстремумов в заболеваемости и реакциях сердечно-сосудистой системы с солнечной активностью, а также обнаружить обострения заболеваний в первые или вторые сутки после геомагнитных возмущений.

Важным для гелиобиологии было изучение воздействия на биологические объекты слабых электромагнитных полей. Биологические объекты являются сложными открытыми системами, в самоорганизации которых определенную роль играет внешний фактор. В качестве примера можно привести результаты эксперимента, когда под влиянием слабых возмущающих факторов синхронизировались спонтанные пульсации клеток мозга и сердца, а стабильные клетки могли внезапно коллапсировать и погибнуть. Очевидно, что реакция сложных нелинейных систем на слабые возмущения зависит не только от характера возмущения, но и от собственного состояния. Экспериментально доказано, что очень слабые электромагнитные поля оказывают воздействие на свойства биологических систем как животного, так и растительного происхождения.

Однако физический механизм на уровне биологических и биохимических процессов пока неясен. За последние годы появились результаты, указывающие, что ритмы естественных электромагнитных полей сыграли роль синхронизатора в самоорганизации биологических систем на ранней стадии их развития. Затем эти ритмы стали уже их собствен-

ными. Если они по каким-либо причинам нарушаются (например, во время мощных возмущений), происходит десинхронизация, и биологическая система выходит из привычного режима. Однако это нарушение не носит необратимого характера. Примером может служить смена часовых поясов для человека, когда биологические ритмы могут нарушаться, но через некоторое время восстанавливаются. Необратимая реакция, как теперь установлено, наблюдается у живых организмов в состоянии неустойчивости и стресса, т.е. когда нарушена или ослаблена система адаптации, например, у больного человека. Именно эта концепция составляет сегодня основу исследований в области гелиобиологии.

Обширные многолетние комплексные исследования медико-биологических эффек-

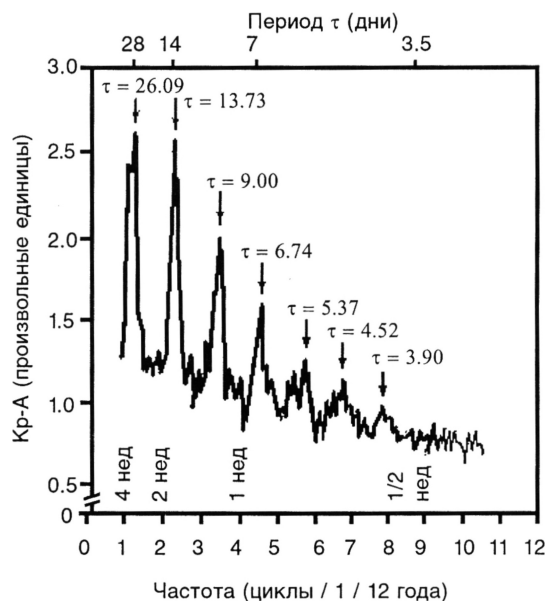


Рис. 16. Спектр вариаций индекса геомагнитной активности K_p за 1932-1990 гг.

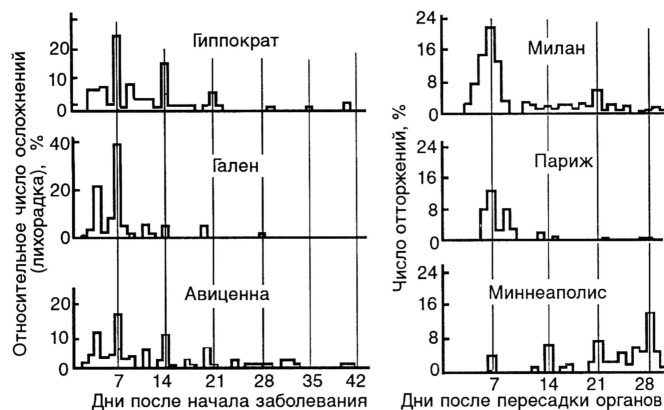


Рис. 17. Спектры обострений после начала заболевания лихорадкой, построенные по записям врачей античного периода (слева) и спектры отторжений трансплантатов после операций по пересадке почек и сердца, рассчитанные по протоколам клиник в Париже, Милане и Миннеаполисе (справа).

тов солнечной активности позволили получить важные научные и практические результаты. Перечислим некоторые из них.

1. Вариации геомагнитного поля Земли, а также межпланетного магнитного поля, обусловленные солнечной активностью, влияют на сердечную деятельность и сердечно-сосудистую систему.

2. Во временной структуре биологических объектов существует спектр ритмов со средним периодом 3,5 дня, которые являются универсальными биологическими ритмами, существующими на всех уровнях живого организма, с клетки до целой популяции. Эти периоды совпадают с периодами в спектре геомагнитного индекса K_p , который характеризует степень возмущенности магнитного поля Земли.

3. Очень значимым оказался околонеделный биологический ритм, который проявляет вы-

сокую синхронность с вариациями гелиогеофизических ритмов в цикле солнечной активности.

4. Максимальное влияние на инфаркты и инсульты головного мозга оказывают только сильные геомагнитные бури, которые сопровождаются уменьшением интенсивности космических лучей.

Гелиобиологические исследования показали, что магнитные бури не представляют фатальной опасности для человека и других живых организмов. Эти исследования позволили сделать вывод о необходимости научно обоснованного подхода к учету гелиогеофизической активности и проведению медицинской профилактики, в основном, сердечно-сосудистых заболеваний. Однако совершенно очевидно, что для предупреждения негативного влияния космической погоды на биологические объекты необходима разработка краткосрочных и долгосрочных ее прогнозов.

В этой лекции не ставилась задача рассмотреть весь комплекс проблем гелиобиологии. Цель иная — проиллюстрировать влияние солнечной активности, геомагнитных возмущений и других космических факторов на живые организмы.

Заключение

Солнечно-земная физика (гелиогеофизика) как самостоятельное научное направление сформировалась на стыке таких наук, как космическая физика, геофизика, радиофизика, метеорология и другие. С развитием экспериментальных и теоретических космических исследований, появлением новых инстру-

ментов и методов не только расширились наши знания о физических процессах на Солнце, о межпланетной среде и околоземном космическом пространстве (ОКП) — во многом изменилось представление об окружающей нас среде. Стало очевидно, что явления и процессы, происходящие в системе Солнце-Земля, представляют собой единую космическую систему, организованную сложным образом. Сформировавшаяся система мировоззрения свидетельствует, что Землю надо рассматривать как глобальную космическую экосистему, жизнь которой зависит от Солнца и других космических факторов. Это необходимо учитывать во многих долгосрочных социальных и технологических программах.

Феноменологический подход, характерный для ранних стадий исследований, сменился глубоким взвешенным и целенаправленным подходом, где основную роль играют теория и моделирование, основанные на экспериментах. Технологический и индустриальный прогресс потребовали решения крупных научных проблем и практических задач. Одновременно возникли новые проблемы, связанные с прогрессом и иногда трудно решаемые на современном уровне развития, например, проблемы космического мусора и экологической безопасности ближнего космоса.

Таким образом, в современном мире совершенно необходимы глубокие знания об окружающей человека среде, месте его обитания. Дальнейшее существование и развитие цивилизации зависят от того, насколько гармоничными будут отношения человека с окружающим миром. Вызывающие тревогу опасные тенденции глобального потепления на Земле

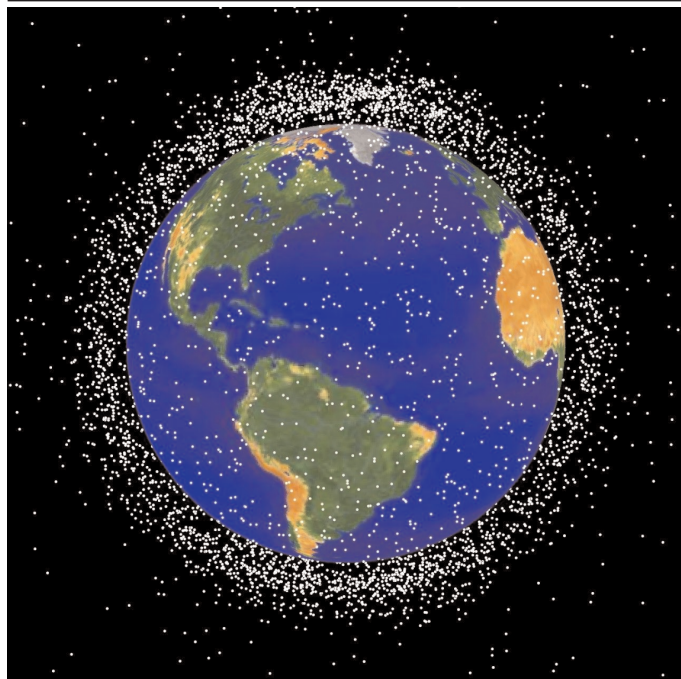


Рис. 18. Распределение в околоземном пространстве (на высотах до 2000 км) рукотворных объектов, за которыми осуществляется регулярное слежение. Примерно 95% этих объектов относятся к категории космического мусора. © NASA

требуют широкомасштабных ресурсоемких координированных международных научных исследований с целью выработки обоснованных эффективных мер по его предотвращению или снижению уровня его последствий.

Интенсивная эксплуатация ОКП уже сейчас требует принятия мер по регулированию запусков космических аппаратов, особенно на наиболее густонаселенные орбиты. Есть и другие проблемы, которые не только представляют научный интерес, но имеют, по-видимому, практическую значимость, например, искусственная модификация некоторых областей ОКП.

Решение этих и других проблем требует развития теорий и экспериментов, а также разработки новых научных концепций. Актуальность исследований в этих областях будет только возрастать, а потребность в прогнозировании солнечной активности и других космических факторов с заблаговременностью от нескольких часов до десятков и сотен лет будет совершенно необходима.

Литература

1. Физика космоса. Под ред. Р.А. Сюняева. М.: Советская энциклопедия, 1986.
2. Модель космоса. Под ред. Л.С. Новикова. М.: Университет Книжный дом, 2007.
3. Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982.
4. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985.
5. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977.
6. Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983.
7. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер / Пер. с англ. М.: Мир, 1976.
8. Харгривс Д.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
9. Панасюк М.И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. Фрязино: Век 2. 2005.
10. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
11. Кринберг И.А., Выборов В.И., Кошелев В.В. и др. Адаптивная модель ионосферы. М.: Наука, 1986.
12. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев

В.С. Физические процессы в полярной ионосфере. М.: Наука, 1988.

13. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А.

Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1989.

14. Сун В., Яскелл С. Минимум Маундера и переменные солнечно-земные связи / Пер. с англ.. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2008.

15. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973.

16. Чижевский А.Л. Космический пульс жизни. М.: Мысль, 1995.

17. Логинов В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2008.

18. Бреус Т.К., Рапопорт С.И. Магнитные бури: медико-биологические и геофизические аспекты. М.: Советский спорт, 2003.