

# **Влияние космической погоды на безопасность авиа и космических полетов**

Юрий Ильич Гальперин - зав. лаборатории физики полярных сияний ИКИ РАН, член международной академии космонавтики, д.ф.-м.н., профессор

Алексей Владимирович Дмитриев - научный сотрудник НИИЯФ МГУ, к.ф.-м.н.

Лев Матвеевич Зеленый - зав. отдела физики космической плазмы ИКИ РАН, член международной академии космонавтики, д.ф.-м.н., профессор

Михаил Игоревич Панасюк - директор НИИЯФ МГУ, д.ф.-м.н., профессор.

Безопасность авиа и космических полетов существенно зависит от текущих условий в атмосфере, ионосфере и околоземном космическом пространстве. Эти условия определяются целым комплексом факторов, которые, в конечном итоге, контролируются активностью Солнца и состоянием межпланетной среды. За последнее десятилетие наши знания продвинулись далеко вперед в понимании проблем солнечно-земных связей и, прежде всего, комплексного влияния солнечной активности на функционирование искусственных спутников Земли (ИСЗ) и других космических аппаратов (КА), а также на технику и пассажиров современных высотных авиалайнеров. Первое важное достижение заключается в том, что были определены основные факторы, негативно влияющие на работу бортовой электроники, как ИСЗ, так и самолетов, а так же на самочувствие и здоровье людей, находящихся на их борту. Одним из основных факторов является космическая радиация - потоки заряженных (в основном протоны и электроны) высоких энергий, а также ионизирующее электромагнитное излучение, способные проникать сквозь обшивку летательных аппаратов и даже вглубь атмосферы. Вторым фактором является возмущенность магнитного поля Земли, влияющая на потоки радиации в околоземном пространстве. Важным достижением исследований является идентификация проблемных ситуаций, возникающих в работе оборудования и в самочувствии человека. К ним относятся:

1. Повышенные дозы радиации, получаемые космонавтами, а так же пассажирами и экипажами высотных авиалайнеров;
2. Деградация конструкционных материалов ИСЗ и в первую очередь солнечных батарей;
3. Электризация обшивки искусственных спутников Земли;

4. Возникновение объемного заряда внутри ИСЗ;
5. Сбои в работе электронных систем ИСЗ и авиалайнеров;
6. Нарушение и потеря ориентации ИСЗ;
7. Непредусмотренная потеря высоты полета ИСЗ на низковысотных орбитах;
8. Нарушение радиосвязи с ИСЗ и авиалайнерами.

В последнее время появляется все больше свидетельств того, что проблемы с самочувствием людей могут возникать из-за возмущений магнитного поля Земли, однако существующих данных не достаточно для научной констатации этого факта.

Каждая из этих проблемных ситуаций может привести к крайне негативным и порой необратимым последствиям. Если же создаются критические условия, при которых начинает работать сразу комплекс из нескольких указанных выше проблем, последствия такой ситуации оказываются катастрофическими - потеря ИСЗ или нештатная ситуация на борту авиалайнера, способная привести к авиакатастрофе.

Следующим шагом в обеспечении безопасности полетов является разработка методов предупреждения критических ситуаций. При этом возникают две основных проблемы: 1. Идентификация внешних факторов, ответственных за возникновение той или иной проблемной ситуации; 2. Обеспечение диагностики и прогноза соответствующих внешних факторов. Решением указанных задач занимается научно-прикладная дисциплина "Космическая погода". Ее основной задачей является выявление причинно-следственных связей между солнечной активностью, ее проявлениями в межпланетной среде, магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли, то есть тем, что принято называть *космической погодой*, и техногенными и медико-биологическими проявлениями деятельности человека. Прежде всего "Космическая погода" как научная дисциплина использует существующие фундаментальные знания по солнечно-земной физике. Кроме того, возникновение проблемных ситуаций, для которых не идентифицирован внешний фактор, инициирует новые фундаментальные исследования в этой области. Поиск и понимание природы этих факторов является одной из основных задач дисциплины "Космическая погода". Вторая, не менее важная задача - разработка методов диагностики и прогноза космической погоды с целью предупреждения негативных последствий воздействия ее факторов на жизнедеятельность человека. Прогноз подразумевает четкое понимание динамических процессов, происходящих в такой очень сложной нелинейной системе как солнечно-земные связи. Только в этом случае текущее состояние космической погоды может быть реконструировано и экстраполировано в будущее.

Данная статья посвящена обзору основных факторов космической погоды, влияющих на безопасность авиа и космических полетов, описанию физической природы этих факторов, обсуждению возможных перспектив их прогноза и предупреждению негативных последствий.

## ***1. Космическая радиация***

Под космической радиацией понимаются потоки ионизирующего излучения, а именно: галактические космические лучи, частицы радиационных поясов Земли, солнечные космические лучи и ионизирующее электромагнитное излучение Солнца. Данные факторы космической погоды можно назвать "поражающими факторами", поскольку они оказывают непосредственное негативное воздействие на здоровье человека и на работоспособность техники, особенно в авиа и космических полетах.

### *Галактические космические лучи*

О потоках ионизирующего излучения в атмосфере земли, приходящего к нам из космоса известно с начала нашего века, после пионерских работ Гесса. В 20 годах нашего столетия советский ученый Д.В. Скобельцын установил корпускулярную природу этого излучения, порожденного потоками частиц очень высоких энергий - космическими лучами. Дальнейшие исследования показали, что энергетический спектр космических лучей является падающим степенным и тянется в область сверхвысоких энергий - до  $10^{20}$  электрон вольт (эВ). Сейчас считается, что космические лучи - протоны и другие ядра - ускоряются во вспышках сверхновых звезд, которые постоянно происходят в нашей Галактике, поэтому на сегодняшний день потоки таких частиц принято называть галактическими космическими лучами (ГКЛ). При своем распространении в межзвездном пространстве, ГКЛ рассеиваются и доускоряются на неоднородностях и флуктуациях межзвездного магнитного поля и ударных волнах межзвездного газа.

На своем пути к поверхности Земли ГКЛ встречают несколько основных препятствий. В первую очередь - это межпланетное магнитное поле (ММП), вмороженное в плазму, истекающую от Солнца (солнечный ветер). В результате взаимодействия с ММП в масштабах солнечной системы, спектр ГКЛ, достигших

орбиты Земли изменяется - модулируется. В нем наблюдается дефицит ГКЛ низких энергий порядка десятков МэВ/нук ( $10^6$  эВ на один нуклон), которые были отражены ММП обратно в межзвездное пространство. Максимум потока ГКЛ в межпланетной среде наблюдается в области нескольких сотен МэВ, при этом их поток может достигать десятков частиц на кв. метр в секунду.

Вторым, еще более мощным препятствием на пути ГКЛ является собственное магнитное поле Земли - магнитосфера, которая способна отражать протоны ГКЛ с энергиями в несколько ГэВ ( $10^9$  эВ), поток которых составляет несколько частиц на кв. метр в секунду. Однако условия проникновения ГКЛ в магнитосферу Земли различны на разных геомагнитных широтах, поскольку в первом приближении геомагнитное поле является дипольным, с осью наклоненной к оси вращения Земли на  $\sim 11^\circ$ . Вследствие этого, на экватор будут проникать частицы с большими энергиями, а в полярных областях путь для низкоэнергичных частиц практически свободен.

И, наконец, третьим и самым мощным препятствием для ГКЛ является атмосфера, которая способна поглощать ГКЛ с энергиями до нескольких ГэВ/нук. Более энергичные частицы ГКЛ, взаимодействуя с атомами воздуха, рождают в ядерных реакциях так называемые атмосферные ливни - потоки вторичных заряженных и нейтральных частиц меньших энергий и электромагнитное излучение. При погружении в глубь атмосферы, рост числа вторичных частиц ливня замедляется, вследствие поглощения в более плотных слоях воздуха. Максимумы частиц атмосферных ливней, порожденные энергичными частицами ГКЛ, наблюдаются на высотах 10-20 км, т.е. там, где проходят воздушные трассы современных авиалайнеров.

Таким образом, можно утверждать, что ГКЛ пронизывают и заполняют собой все окружающее пространство, от межпланетной среды и околоземного космического пространства до нижней атмосферы. Имея высокую степень ионизации и будучи все проникающими, ГКЛ являются одним из основных факторов, определяющих дозовые нагрузки на человека в космических и авиа полетах, особенно на больших высотах и геомагнитных широтах. Последние исследования европейских ученых [1] показали, что дозовые нагрузки на пассажиров и экипажи авиалайнеров европейских авиалиний в три раза превышают дозы, получаемые на приэкваториальных широтах. Дозовые нагрузки на сверхзвуковых авиалайнерах, летящих на больших высотах еще в два раза больше. Необходимо заметить, что приведенные здесь значения являются средними, полученными в нерегулярных измерениях. Как будет сказано ниже, существуют

условия, когда радиационные дозы пассажиров и экипажа авиалайнеров могут увеличиваться еще в несколько раз, и по совокупности становятся опасными для здоровья.

ГКЛ своей высокой ионизирующей способностью вызывают функциональные сбои в работе электроники, или как их обычно называют в западной печати SEE (Single Events Effects) - эффекты одиночных сбоев, возникающих в результате выделения энергии высокоионизирующими частицами, созданными ГКЛ в активной области отдельных микросхем [2]. В последнее десятилетие во всем мире, в том числе и в России, авиация и космонавтика все более широко используют относительно дешевые коммерческие микросхемы высокой степени интеграции, однако и более чувствительны к воздействию ионизирующего воздействия ГКЛ [3]. Такая тенденция ведет к усилению зависимости устойчивой работы бортовой электроники от потоков ГКЛ, которые, несмотря на свою относительную малость, существуют постоянно, с некоторыми изменениями по величине, о чем будет сказано ниже. Вследствие этого, суммарный эффект от воздействия ГКЛ оказывается довольно существенным [4].

#### *Радиационные пояса Земли*

На заре космической эры, первые искусственные спутники Земли (ИСЗ) обнаружили другой источник энергичных заряженных частиц - радиационные пояса Земли (РПЗ). Прежде всего - это протонный пояс, простирающийся от верхней границы атмосферы (~100 км) до 3-4 радиусов Земли ( $R_E$ ) и заполненный в основном протонами с энергиями до сотен МэВ. Кроме того, существует электронный РПЗ, внешняя граница которого лежит значительно выше - на высотах до 5-6  $R_E$ . Энергия электронов в РПЗ достигает десятков МэВ. Частицы РПЗ не могут проникать глубоко в атмосферу, поскольку не имеют достаточную для этого энергию - они поглощаются в верхних ее слоях. В этом смысле частицы РПЗ безопасны для авиации, однако, они представляют серьезную опасность для ИСЗ и пилотируемых орбитальных станций (ОС), поскольку достаточно энергичны для проникновения сквозь обшивку в глубь аппарата. Потоки таких частиц, называемые проникающей радиацией, в зависимости от толщины обшивки ИСЗ могут достигать значительных величин. Так, например, поток проникающей радиации на ОС МИР (это прежде всего электроны с энергией  $>5$  МэВ и протоны с энергией  $>60$  МэВ) составляет порядка  $10^5$  частиц на кв. метр в секунду. Следует отметить, что частицы РПЗ обладают меньшим ионизирующим эффектом, чем ГКЛ, поскольку в среднем имеют существенно меньшую энергию. Однако, вследствие

очень больших потоков, частицы РПЗ вносят заметный вклад в радиационную дозу космонавтов, а также оказывают отрицательное и, порой, губительное воздействие на материалы КА, особенно на полупроводниковые элементы солнечных батарей, они также способны вызывать сбои в работе электронных узлов КА.

Другой поражающий фактор, связан с потоками релятивистских электронов, способных проникать сквозь обшивку ИСЗ и по-разному накапливаться в материалах с различной проводимостью, в результате чего внутри ИСЗ образуется так называемый "объемный заряд". При большой экспозиции в интенсивных потоках релятивистских электронов объемный заряд может достигать критических величин, что приводит к пробое диэлектриков и нарушению работы электроники на борту ИСЗ [5].

Кроме высоко энергичных частиц РПЗ заполнены потоками заряженных частиц с низкими энергиями десятки - тысячи эВ. Потоки этих частиц настолько велики, что способны создавать достаточно большой поверхностный заряд, неоднородно распределенный на обшивке ИСЗ. При этом между различными частями обшивки ИСЗ возникает разность потенциалов, способная, при определенных условиях, достигать нескольких десятков кэВ, что приводит к электрическому разряду на поверхности ИСЗ. Образующиеся в момент разрядов электромагнитные помехи, проникая в электронные цепи бортовых приборов КА, искажают электронные сигналы и нарушают работу аппаратуры. [6].

За более чем тридцать лет космической эры, был разработан целый комплекс моделей, позволяющих вычислять средние потоки ГКЛ и захваченной радиации для практически любой околоземной орбиты. Современные КА сконструированы с учетом существующих моделей, однако, большое число сообщений о сбоях в работе ИСЗ и даже потере их за последнее десятилетие, говорит о том, что существующие средние модели космической радиации не учитывают важные факторы, которые начинают оказывать решающее значение на современную электронику ИСЗ. В первую очередь к таким факторам относятся солнечные космические лучи.

#### *Солнечные космические лучи*

В отличие от ГКЛ и частиц РПЗ, солнечные космические лучи (СКЛ), генерируемые в солнечных протонных событиях (см. ниже), не имеют постоянного потока, а приходят к Земле спорадически. Их главным свойством является очень большая интенсивность, на много порядков превышающая фоновые значения потоков ГКЛ, и достаточно высокие энергии - иногда до нескольких ГэВ. Проникая в магнитосферу и атмосферу Земли,

СКЛ вызывают те же эффекты, что и ГКЛ, однако в гораздо большей степени. Единоразовые дозовые нагрузки на экипажи КА и пассажиров авиалайнеров могут возрастать многократно и представлять серьезную опасность для здоровья людей. С приходом СКЛ увеличивается количество SEE [7]. Пример воздействия СКЛ на полупроводниковый детектор КА SOHO, наблюдающего Солнечную корону приведен на рис. 1. Отчетливо видно, как следы от вторичных частиц, образованных при взаимодействии СКЛ с веществом КА сильно зашумляют картину. Очевидно, что спутники, использующие систему навигации по звездам, при таком воздействии СКЛ потеряют свою ориентацию, что порой приводит к необратимым последствиям и потере спутника, либо требует дополнительных затрат топлива на восстановление его ориентации.

Основная проблема СКЛ состоит в том, что их приход практически не возможно предсказать и, поэтому, рабочих моделей по описанию и прогнозу потоков СКЛ пока не развито. Существующая статистика показывает, что мощных событий СКЛ бывает немногим более десятка за десять лет. В последние годы исследования по солнечной физике продвинулись в понимании проблемы генерации энергичных СКЛ на Солнце, что дает некоторые основания надеяться на появления модели и прогноза СКЛ в будущем. А пока последствия воздействия СКЛ на человека и КА можно отнести к разряду стихийных.

#### *Ионизирующее электромагнитное излучение*

Солнце постоянно излучает в широком спектре электромагнитных волн. Ионизирующее электромагнитное излучение (ИЭИ) от Солнца, включающее в себя рентгеновские лучи и  $\gamma$ -излучение, практически полностью поглощается в атмосфере Земли на больших высотах, вызывая ионизацию атомов воздуха. Во время солнечных вспышек (см. ниже) потоки ИЭИ от Солнца возрастают на несколько порядков, что приводит к сильному разогреву и ионизации верхней атмосферы. Можно указать две основных проблемы, возникающих в результате воздействия ИЭИ.

В результате разогрева под его воздействием, атмосфера "раздувается", т.е. плотность ее на фиксированной высоте сильно увеличивается. Это представляет серьезную опасность для низковысотных ИСЗ и пилотируемых ОС, поскольку, попадая в плотные слои атмосферы, КА может быстро потерять высоту и затонуть. Такая участь

постигла американскую космическую станцию Скайлэб в 1972 году во время мощной солнечной вспышки, на станции не хватило топлива для возврата на прежнюю орбиту.

Другая проблема связана с сильным увеличением ионизации внешней области атмосферы (ионосферы) вследствие прихода интенсивного ИЭИ, что приводит к существенному изменению условий прохождения радиосигналов через ионосферу и их отражения от нее, в результате чего нарушается радиосвязь, как со спутниками, так и на Земле. Потеря связи с КА в момент маневрирования может привести к потере спутника. Современные авиалайнеры широко используют спутниковую радиосвязь для навигации и связи. Существует несколько примеров, когда посадка самолета задерживалась из-за проблем со связью с землей.

## ***2. Геомагнитные возмущения***

Механизмы прямого воздействия возмущений магнитного поля Земли на человека и аппаратуру летательных аппаратов пока еще не до конца изучены, однако статистические данные достаточно убедительно указывают на то, что такое воздействие существует. С другой стороны, во время геомагнитных возмущений происходит наибольшее число отказов в работе бортовой электроники, возникают проблемы с ориентацией ИСЗ, и, наконец, часто наблюдается ухудшение самочувствия человека. В данном случае геомагнитные возмущения являются не прямым агентом, непосредственно влияющим на человеческую деятельность, а выступают в роли катализатора, усиливающего силу воздействия других факторов космической погоды. По своей природе геомагнитные возмущения можно разделить на два типа: геомагнитные бури и суббури.

### *Геомагнитные бури*

Геомагнитной бурей называется сильное (десятки и сотни нТл) изменение горизонтальной составляющей геомагнитного поля, измеренного на поверхности земли на низких широтах. Для числовой характеристики магнитной бури используется геомагнитный индекс Dst-вариация, который показывает среднее отклонение напряженности магнитного поля во время возмущения на низких широтах относительно спокойных в смысле геомагнитной возмущенности дней. Средняя



длительность магнитной бури составляет десятки часов и состоит из двух фаз - главной фазы магнитной бури и фазы восстановления. Во время главной фазы, которая длится несколько часов, наблюдается быстрое, часто немонокотное уменьшение напряженности геомагнитного поля до своего минимального значения. После этого наступает фаза восстановления - напряженность низкоширотного геомагнитного поля постепенно возвращается к своему прежнему значению в течение десятков часов.

Исследования околоземного космического пространства показали, что главная фаза бури связана с развитием так называемого кольцевого тока - увеличением потока положительно заряженных ионов с энергиями десятки кэВ на расстояниях 2-4  $R_E$ . Основными источниками этих частиц являются межпланетное пространство и ионосфера Земли. Сильное возрастание потоков положительно заряженных частиц, дрейфующих вокруг Земли с востока на запад, генерирует мощное тороидальное магнитное поле. Последнее, накладываясь на исходное магнитное поле Земли, приводит к его уменьшению (порой очень сильному) во внутренней магнитосфере, в том числе на поверхности Земли, и увеличению магнитного поля во внешних областях магнитосферы. Очевидно, что развитие такого явления связано с ответной реакцией магнитосферы Земли на мощное воздействие со стороны межпланетного пространства, о котором будет сказано ниже. Фаза восстановления связана с постепенным распадом кольцевого тока - уменьшением потоков заряженных частиц до нормального невозмущенного уровня.

За последнее десятилетие обнаружено и описано множество негативных последствий на земле и в космосе, связанных с геомагнитными бурями. Здесь мы укажем только те из них, которые непосредственно влияют на безопасность полетов. В первую очередь - это нарушения в радиосвязи, вызываемые возмущением ионосферы во время главной фазы магнитной бури. На рис. 2б приведен пример данных о потоках проникающей радиации на ОС МИР, полученных по телеметрии во время мощной магнитной бури 24 мая 2000. Для сравнения на рис.2а представлены данные, полученные на аналогичном витке в относительно спокойных геомагнитных условиях. Хорошо видно, что во время геомагнитной бури вероятность телеметрических сбояв (резкие выбросы во всех измеряемых каналах на 2-3 порядка величины относительно гладкого временного профиля скорости счета частиц) существенно возрастает.

Вторым негативным эффектом, связанным с геомагнитными бурями, является потря ориентации ИСЗ, навигация которых осуществляется по геомагнитному полю, сильно возмущенному во время бури. В третьих, в результате глобальной перестройки

геомагнитного поля во время главной фазы магнитной бури, условия проникновения в магнитосферу энергичных частиц ГКЛ и СКЛ становятся более благоприятными, в результате чего потоки их могут существенно возрасти. Это в свою очередь ведет к увеличению числа сбоев в бортовой электронике и росту дозовых нагрузок, как на ОС, так и на борту высотных авиалайнеров, чьи трассы проходят в области высоких и средних широт. Особенно опасно сочетание начала магнитной бури с приходом СКЛ от мощного протонного события на Солнце, как, например 6-7 апреля или 15-16 июля 2000 года. Во время этих магнитных бурь мощные потоки СКЛ проникли в магнитосферу и атмосферу Земли вплоть до средних широт (Вашингтон), на которых наблюдалось красное сияние ночного неба, вызванное вторжением в атмосферу солнечных энергичных протонов. Во время очень сильных магнитных бурь может происходить прямой заброс энергичных заряженных частиц из межпланетной среды внутрь магнитосферы, в результате чего формируется новый радиационный пояс, способный просуществовать несколько месяцев и тем самым существенно увеличить радиационные эффекты на ИСЗ, в том числе и радиационную дозу экипажа ОС. Последний раз такая буря наблюдалась 24 марта 1991 г. После нее образовался новый дополнительный РПЗ, который просуществовал до сентября 1991 г., в результате чего дозовая нагрузка на борту ОС МИР возросла в несколько раз.

Наконец, медицинские исследования реакции человека на геомагнитные возмущения показывают, что существует достаточно большая категория людей, на которых магнитные бури действуют отрицательно: активность человека затормаживается, притупляется внимание, начинаются обострения хронических заболеваний. Следует отметить, что исследования воздействия геомагнитных возмущений на здоровье человека еще только начинаются, и результаты их бывают иногда противоречивы. Однако большинство исследователей сходится во мнении, что в данном случае существует три категории людей: на одних геомагнитные возмущения действуют угнетающе, на других, наоборот, возбуждающе, у третьих никакой реакции не наблюдается.

Итак, мы видим, что во время магнитных бурь в течение нескольких часов может одновременно работать целый комплекс поражающих факторов, причем эффективность некоторых из них существенно повышается. Данное обстоятельство выделяет геомагнитные бури в особый, наиболее опасный феномен космической погоды, на диагностику и предсказание которого сейчас направлено большинство усилий.

## *Суббури*

Суббуриями принято называть возмущения геомагнитного поля с амплитудой до нескольких тысяч нТл и длительностью  $\sim 1$  часа, наблюдаемые на поверхности Земли на высоких геомагнитных широтах ( $>70^\circ$ ). Для численного описания суббуревой активности используется целый набор геомагнитных индексов: AL (наибольшая отрицательная вариация магнитного поля), AU (наибольшая положительная вариация магнитного поля), AE (разность AL и AU), а также полулогарифмический индекс Кр. Суббури вызываются мощной перестройкой геомагнитного поля на ночной стороне, которая сопровождается ускорением заряженных частиц, в первую очередь электронов, до высоких энергий. Интенсивные потоки ускоренных энергичных частицы вторгаются в атмосферу Земли и вызывают свечение ее верхних слоев - полярное сияние. Причина развития суббури до сих пор является предметом дискуссии, однако, большинство ученых сходится на том, что за это ответственен внешний агент (см. ниже).

Как и геомагнитные бури, суббури могут воздействовать на человека посредством колебаний геомагнитного поля. Кроме того, суббури являются, пожалуй, наиболее мощным источником электронов во внешней магнитосфере. Сильно возрастают потоки низкоэнергичных электронов, что приводит к существенному усилению электризации КА. Во время сильной суббуревой активности на несколько порядков возрастают потоки релятивистских электронов во внешнем РПЗ, что представляет серьезную опасность для ИСЗ, орбиты которых пересекают эту область, поскольку внутри КА накапливается достаточно большой объемный заряд, приводящий к выходу из строя бортовой электроники. В качестве примера можно привести проблемы с работой электронных приборов на ИСЗ Equator-S, Polar и Galaxy-4 [8], которые возникли на фоне длительной (около недели) суббуревой активности и, как следствие, очень высоких потоков релятивистских электронов во внешней магнитосфере в мае 1998 г.

Здесь следует заметить, что суббури являются неотъемлемым спутником геомагнитных бурь, однако, интенсивность и длительность суббуревой активности имеет неоднозначную связь с мощностью магнитной бури. Очень сильная суббуревая активность может наблюдаться как на главной фазе сильной магнитной бури ( $Dst < -200$  нТл), так и на фазе восстановления средней магнитной бури ( $Dst \sim 100-150$  нТл). Указанная неопределенность, прежде всего, связана с различными условиями в межпланетном космическом пространстве, на фоне которых развиваются геомагнитные

возмущения. Более подробно об этом будет сказано ниже. Важным проявлением связи бури-суббури является непосредственное влияние мощности геомагнитной бури на минимальную геомагнитную широту, на которой развиваются суббури [9]. Во время сильных геомагнитных бурь суббуревая активность может опускаться с высоких геомагнитных широт на средние, достигая, например, широты Курска. В данном случае на средних широтах будет наблюдаться нарушение радиосвязи, вызванное возмущающим воздействием на ионосферу энергичных заряженных частиц, генерируемых во время суббуревой активности.

В заключение данного пункта мы представляем сводную таблицу 1, в которой приведены соотношения между факторами космической погоды и основными известными проблемами в авиа- и космических полетах, которые обсуждались выше. Черная штриховка соответствует прямому воздействию фактора. Серая штриховка обозначает, что данный фактор является косвенным, т.е. способствует усилению эффекта, вызванного другими факторами.

Таблица 1. Проблемы воздействия факторов космической погоды, связанных с радиацией.

Проблемы	Факторы				Геомаг. бури	Геомаг. суббури
	ГКЛ	РПЗ	СКЛ	ИЭИ		
Радиационная доза						
Электризация КА						
Деградация материалов КА						
Объемный заряд в КА						
Одиночные сбои в электронике						
Нарушение ориентации КА						
Потеря высоты КА						
Нарушение радиосвязи						

### ***3. Основные явления в космической погоде***

Из таблицы 1 видно, насколько сложны даже на качественном уровне связи между факторами и последствиями космической погоды. Более того, сами факторы являются сильно варьирующими и зависящими от солнечной активности и условий в межпланетной среде. Очевидно, для прогноза того или иного фактора необходимо определить, какое физическое явление в космической погоде ответственно за его формирование. Таких явлений сейчас можно указать 4: солнечные вспышки, корототирующие области взаимодействия (КОВ), выбросы корональных масс (СМЕ), и 11-летняя циклическая вариация солнечной активности. Схематично эти явления и некоторые, связанные с ними факторы, представлены на рис. 3.

#### *Солнечные вспышки*

Солнечные вспышки - локальное взрывное возрастание потока электромагнитного излучения с поверхности Солнца (фотосферы) длительностью десятки-сотни секунд. Причиной солнечных вспышек является быстрая перестройка структуры очень сильного магнитного поля в активной области на Солнце с выделением запасенной магнитной энергии в виде тепла, электромагнитного излучения и потоков заряженных частиц. Во время сильных солнечных вспышек интенсивность жесткого рентгеновского излучения от Солнца может возрасти более чем на 3 порядка величины. Время распространения электромагнитного излучения, в том числе ИЭИ, от Солнца до Земли составляет 8 мин. Во время мощных солнечных вспышек происходит эффективное ускорение заряженных частиц до очень высоких энергий - генерация СКЛ. Время прихода к Земле основной массы СКЛ от вспышки зависит от энергии частиц и составляет в среднем десятки минут. Однако не от всех солнечных вспышек СКЛ достигают Земли, поскольку здесь играет важную роль относительное положение вспышки на диске Солнца и условия распространения СКЛ в межпланетной среде. В частности, более эффективны в смысле СКЛ солнечные вспышки, происходящие на центральных и западных гелиодолготах, поскольку эти области Солнца наилучшим образом связаны с Землей силовыми линиями ММП.

На заре космической эры считалось, что солнечные вспышки, а точнее корпускулярное излучение от них являются причиной развития геомагнитных бурь. Однако исследования межпланетного пространства, проведенные за последние два

десятилетия, показали, что за геомагнитные возмущения ответственны два различных явления в межпланетной среде: КОВ и СМЕ.

### *КОВ*

Помимо электромагнитного излучения, Солнце является источником сверхзвукового потока горячей плазмы в межпланетной среде - солнечного ветра, который истекает из внешних областей горячей солнечной короны, где энергия теплового движения частиц превосходит потенциальную энергию солнечной гравитации. Солнечный ветер, имеющий большую плотность энергии, увлекает силовые линии магнитного поля короны и выносит их в межпланетную среду. Средняя напряженность ММП на орбите Земли составляет несколько нТл.

Различаются два типа солнечного ветра - медленный (скорость 300-500 км/с) и быстрый (скорость 700-800 км/с). Медленный солнечный ветер истекает из областей с замкнутыми силовыми линиями магнитного поля, он более плотный (на орбите Земли его концентрация порядка  $10$  частиц в  $\text{см}^3$ ) и холодный (десятки тысяч К). Магнитное поле в медленном солнечном ветре ведет себя достаточно нерегулярно. Быстрый солнечный ветер, наоборот, истекает из корональных структур с разомкнутыми силовыми линиями (корональных дыр); он имеет меньшую плотность (несколько частиц в  $\text{см}^3$ ) и более высокую температуру (сотни тысяч К). Быстрый солнечный ветер из корональной дыры выносит достаточно регулярное магнитное поле, которое обычно невелико (несколько нТл), однако сильно варьирует. При этом существенные колебания испытывают также скорость и плотность быстрого солнечного ветра. Такие колебания связаны с цугами альвеновских волн, ответственных, по-видимому, за разогрев солнечной короны.

При своем распространении в межпланетном пространстве быстрый солнечный ветер, очевидно, сталкивается с потоками медленного солнечного ветра. При этом в межпланетном пространстве образуется глобальная квазистационарная структура, так называемая коротярующая область взаимодействия (КОВ), которая вращается, коротярует вместе с Солнцем с периодом  $\sim 27$  дней. КОВ простирается от нескольких солнечных радиусов до десятков астрономических единиц, представляя собой в первом приближении гигантскую ветвь архимедовой спирали. Основными свойствами КОВ являются наличие прямой и обратной ударных волн и заключенная между ними область сильно турбулизованной плазмы с сильно варьирующим магнитным полем.

Как уже было сказано, КОВ вращается в межпланетном пространстве вместе с Солнцем, таким образом каждые 27 дней она пересекает Землю. В такие периоды на Земле происходят рекуррентные (повторяющиеся) магнитные бури. Обычно сила этих бурь не велика (максимальная Dst вариация не превышает 200 нТл), поскольку напряженность магнитного поля в КОВ не достигает больших величин и быстро варьирует с характерным временем десятки минут. Однако фаза восстановления рекуррентных бурь оказывается затянутой и сопровождается мощной суббуревой активностью. Длительность фазы восстановления определяется временем прохода Землей через высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр, которые могут достигать больших угловых размеров, в результате чего, фаза восстановления рекуррентной магнитной бури может затянуться на неделю. Как уже отмечалось, характеристики плазмы и ММП в быстром солнечном ветре испытывают сильные вариации, что инициирует мощную и длительную суббуревую активность в магнитосфере Земли. Как следствие, во время рекуррентных магнитных бурь происходит мощное ускорение релятивистских электронов и обогащение ими внешнего РПЗ. Именно на фазе восстановления магнитных бурь на фоне высокоскоростного ветра из корональных дыр отмечаются проблемы в работе бортовой электроники, вызываемые объемным зарядом, порожденным "электронами-киллерами" - релятивистскими электронами, способными проникнуть сквозь обшивку ИСЗ. Кроме того, мощная суббуревая активность сопровождается интенсивными высыпаниями частиц и, следовательно, возмущением ионосферы, что приводит к нарушениям радиосвязи на высоких и средних геомагнитных широтах, особенно если при этом происходит сильная магнитная буря.

### *СМЕ*

Выброс корональных масс - СМЕ (от английского Coronal Mass Ejection) - рассматривается современными исследователями как ключевое явление, возмущающее космическую погоду. СМЕ возникают в событиях, связанных с мощным энерговыделением на Солнце, включая солнечные вспышки. При этом из солнечной короны в межпланетную среду извергаются миллиарды тонн горячей плазмы, скорость которой может достигать 2000 км/с, т.е. время распространения СМЕ от Солнца до Земли может быть менее суток. Быстрые СМЕ при своем распространении в плазме относительно медленного солнечного ветра образуют перед собой мощную ударную волну, характеризующуюся очень высокой плотностью до десятков частиц в см<sup>3</sup> и

высокой напряженностью магнитного поля, испытывающего тангенциальный разрыв на границе ударной волны с невозмущенным солнечным ветром. При столкновении такой ударной волны с земной магнитосферой наблюдается внезапное начало магнитной бури - резкое сжатие магнитосферы и, как следствие, увеличение напряженности геомагнитного поля, проявляющееся в сильной положительной Dst-вариации (несколько десятков нТл). Если ударная волна достаточно быстрая и плотная она может очень сильно сжать земную магнитосферу от ее нормальных размеров с расстоянием до подсолнечной точки  $\sim 11 R_E$  до  $6 R_E$  и меньше. При этом ИСЗ, орбиты которых пролегают во внешней магнитосфере, в первую очередь на геостационарной орбите ( $\sim 6.6 R_E$ ), могут оказаться непосредственно в межпланетном пространстве и подвергнутся воздействию потоков горячей плазмы, выносимой СМЕ. Например, 10 января 1997 после прихода СМЕ с очень плотной ударной волной (концентрация частиц достигала  $60 \text{ в см}^3$ ) был потерян американский телекоммуникационный геостационарный спутник Teslar 401. Причиной гибели спутника считается возникновение на нем очень большого поверхностного заряда, поскольку на других аналогичных спутниках в этот период была зарегистрирована напряженность  $-800\text{В}$  вместо  $-100\div-500\text{В}$ . Такое высокое напряжение на поверхности ИСЗ вызывает сильные электрические разряды, которые оказывают сильное воздействие на работу бортовой электроники.

Важным свойством мощной головной ударной волны СМЕ является стохастическое ускорение на ней заряженных частиц, электронов и ядер, до очень высоких энергий. Рассматривается даже возможность ускорения СКЛ до энергий сотни-тысячи МэВ на фронте ударной волны СМЕ в солнечной короне, где концентрация частиц и напряженность магнитного поля очень высоки. Наблюдение СКЛ и релятивистских электронов в безвспышечных солнечных событиях, связанных, например, с исчезновением волокна в активной области на Солнце, которые, однако, сопровождаются СМЕ, говорит в пользу такого механизма ускорения.

Другой важной и, пожалуй, основной особенностью СМЕ является мощное магнитное поле напряженностью до нескольких десятков нТл, выносимое вместе с корональной плазмой и имеющее регулярную тороидальную структуру. В результате этого, при проходе СМЕ вектор магнитного поля плавно вращается вокруг оси, так, что в течение длительного времени вектор ММП имеет очень большую компоненту, перпендикулярную плоскости эклиптики -  $V_z$ -компоненту, которая меняет свой знак с



характерным временем порядка 10 часов и больше. Таким образом, во время прохода СМЕ земная магнитосфера оказывается погруженной в ММП противоположного знака с достаточно большой напряженностью. Именно наличие такого внешнего ММП приводит к эрозии геомагнитного поля (быстрому уменьшению напряженности магнитного поля во внешней магнитосфере) и развитию кольцевого тока как ответной реакции магнитосферы для компенсации внешнего воздействия и восстановления геомагнитного поля во внешней магнитосфере. Таким образом, развивается сильная геомагнитная буря с Dst порядка нескольких сотен нТл.

С другой стороны, регулярность структуры СМЕ не способствует развитию сильной суббуревой активности, для которой требуется быстрая переменчивость характеристик плазмы солнечного ветра и ММП, свойственная для КОВ. Поэтому многие сильные магнитные бури, связанные с СМЕ не дают длительной мощной суббуревой активности и, как следствие, сильного обогащения внешнего РПЗ релятивистскими электронами не происходит. Однако часто СМЕ приходят к Земле непосредственно перед КОВ. В этом случае развивается очень мощная комплексная магнитная буря, которая представляет собой наибольшую опасность для ИСЗ, поскольку вслед за сильными возмущениями геомагнитного поля и вторжением в магнитосферу потоков энергичных заряженных частиц, связанных с СМЕ, начинается очень мощная суббуревая активность и интенсификация внешнего электронного РПЗ. Кроме того, такие комплексные события часто развиваются на фоне потоков СКЛ, в результате чего, как было сказано выше, отрицательное воздействие последних существенно усиливается. Такого рода события имеют наибольший интерес в смысле прогноза, поскольку последствия таких "космических бурь" чаще всего бывают наиболее разрушительными, вплоть до одновременного выхода из строя нескольких ИСЗ и экстремальных радиационных нагрузок на экипажи ОС и пассажиров авиалайнеров, как на высоких, так и на средних геомагнитных широтах.

### *11-летний солнечный цикл*

Существование 11-летнего цикла в солнечной активности было экспериментально установлено еще в 18 веке по наблюдениям числа пятен на Солнце. С тех пор количественно солнечную активность принято описывать числом Вольфа, которое складывается из числа отдельных пятен и удесятиренного числа групп пятен, наблюдаемых на диске Солнца. Традиционно вычисляется среднесуточное число Вольфа. 11-летний солнечный цикл можно разделить на 4 фазы: минимум,

длительностью 1-2 года, когда число Вольфа составляет единицы, фаза роста, длительностью 2-3 года, когда число Вольфа растет до десятков и сотен, максимум, длительностью 2-3 года, когда число Вольфа варьирует около своего максимального за данный цикл значения, и, наконец, фаза спада, длительностью 4-5 лет, когда число Вольфа плавно уменьшается к минимальным значениям. Как видно, динамика солнечной активности в цикле не является гармонической - фаза роста значительно короче фазы спада, которая занимает наибольшую часть цикла. В последствии было обнаружено, что многие явления на Земле и в межпланетной среде также имеют 11-летнюю периодичность [10]. Не являются исключением явления и факторы космической погоды, которые испытывают сильную 11-летнюю модуляцию. Однако не все из них имеют простую и однозначную связь с солнечной активностью.

Частота солнечных вспышек, потоки ИЭИ, а также частота появления СМЕ и событий в СКЛ хорошо коррелируют с числом Вольфа - наибольшее их количество наблюдается именно в максимуме солнечной активности. Однако, наибольшая геомагнитная активность, выражаемая Dst-вариацией, в частности сильные магнитные бури, чаще наблюдаются не в сам максимум солнечной активности, а в его окрестностях: в конце фазы роста и в начале фазы спада (рис. 4). Данное свойство динамики магнитных бурь в цикле солнечной активности пока еще остается не до конца понятным. Наиболее интенсивная суббуревая активность, выраженная на рис. 4 через Кр-индекс, наблюдается на фазах роста и спада солнечной активности, когда в межпланетной среде формируются устойчивые, долгоживущие КОВ. Провал суббуревой активности в максимуме солнечной активности объясняется большим количеством генерируемых в этот период СМЕ, которые разрушают квазистационарную структуру КОВ, а также относительно малыми угловыми размерами корональных дыр. Как правило, на фазе минимума геомагнитная активность снижается.

Интересную связь с солнечным циклом имеют потоки ГКЛ (рис. 4) - они варьируют практически в антикорреляции с солнечной активностью [11]. Такая динамика ГКЛ объясняется изменениями условий их проникновения во внутреннюю гелиосферу, до орбиты Земли, из межзвездного пространства. В максимуме солнечной активности, когда межпланетная среда сильно возмущена, условия проникновения ГКЛ сильно ухудшаются, поэтому потоки ГКЛ близки к минимальным. Здесь важно указать, что потоки ГКЛ на орбите Земли также уменьшаются при прохождении через нее СМЕ, наблюдается так называемый эффект Форбуша. Такая отрицательная вариация ГКЛ

связана с тем, что большое регулярное магнитное поле внутри СМЕ и его ударная волна являются мощным препятствием на пути ГКЛ, которое эффективно рассеивает и отражает космические лучи. В результате возникает своеобразный эффект экранировки. В максимуме солнечной активности, когда число СМЕ максимально, эффекты многих Форбуш-понижений ГКЛ накладываются друг на друга, и это является еще одной причиной понижения потока ГКЛ. Максимальные потоки ГКЛ наблюдаются в минимуме солнечной активности, когда межпланетная среда возмущена слабо. Как следствие, аналогичную динамику в цикле солнечной активности имеют одиночные сбои в микросхемах SEE, а также радиационная доза на борту ОС.

В случае с радиационной дозой существует еще один определяющий ее фактор, имеющий 11-летнюю динамику, аналогичную ГКЛ, - это захваченная радиация РПЗ. Как уже было сказано выше, потоки солнечного ИЭИ наиболее интенсивны в максимуме солнечной активности, в результате чего земная атмосфера в этот период разогревается сильнее, чем в минимуме и, соответственно, ее средние размеры оказываются больше. В радиационную дозу экипажа на борту ОС (высоты полета ~400 км.) вносят существенный вклад потоки энергичных протонов внутреннего РПЗ, который опускается практически до границы атмосферы в области Южно Атлантической магнитной аномалии (ЮМА) магнитного поля Земли, расположенной в южной части Атлантического океана вблизи Бразилии. Существование ЮМА обусловлено значительным отличием магнитного поля от дипольного в этой области. В максимуме солнечной активности потоки протонов во внутреннем РПЗ уменьшаются, вследствие их более интенсивной гибели за счет потерь на ионизацию в "раздувшейся" атмосфере в области ЮМА. Таким образом, в смысле средней радиационной дозы, набираемой за длительный срок, более предпочтительными являются космические полеты в максимуме солнечной активности. В качестве демонстрации выше сказанного на рис. 5 представлена динамика дозы радиации, измеренной на борту ОС МИР за последние 10 лет (верхняя панель). Для сравнения на рис. 5 представлена характеристика солнечной активности F10.7 (средняя панель) и плотность земной атмосферы на высоте полета ОС МИР ~400 км.(нижняя панель). Величина F10.7 соответствует потоку радиоизлучения от Солнца на длине волны 10.7 см, который хорошо коррелирует с числом Вольфа, однако F10.7 также отражает поток электромагнитной энергии от Солнца, который ответственен за нагрев земной атмосферы. Из рисунка 5 ясно видно, что радиационная доза меняется в противофазе с солнечной активностью и плотностью земной атмосферы: с уменьшением солнечной

активности от максимума в 1991 году к минимуму в 1996 году уровень дозы растет до своего максимального значения, в то время как солнечная активность и плотность атмосферы падают. С 1996 по 1999 годы с ростом солнечной активности наблюдается обратная динамика - радиационная доза уменьшается, а плотность атмосферы растет.

С другой стороны в максимуме солнечной активности очень большую одноразовую дозу радиации, особенно для космонавтов, работающих в открытом космосе, дают события в СКЛ, которые наиболее часто происходят в этот период. Таким образом, возникает дилемма, из которой становится ясно, насколько важным является не только знание средних долгопериодических изменений в космической погоде, но и предсказание спорадических, быстрых эффектов, связанных с взрывными событиями на Солнце и вызывающих космические бури.

#### ***4. Проблемы диагностики и прогноза космической погоды***

В Таблице 2, составленной по результатам предыдущего параграфа, представлены соотношения между явлениями и факторами космической погоды. Как и в Таблице 1 серая штриховка обозначает косвенное влияние, способствующее усилению действенности фактора, вызванного тем или иным космическим явлением. Для качественного решения проблемы диагностики и прогноза космической погоды, а точнее ее влияния на человека и технику в авиа и космических полетах необходим комплексный анализ таблиц 1 и 2. Подобный анализ был начат в предыдущем пункте для радиационной дозы. Из него вытекает, что для обеспечения безопасности полетов, особенно в максимуме солнечной активности, необходима диагностика и прогноз СКЛ. Для этого необходима организация мониторинга событий на Солнце и СМЕ. Такой мониторинг активно развивается на Западе. Множество наземных обсерваторий занимаются постоянными наблюдениями Солнца в различных спектральных линиях оптического диапазона и дают информацию о структуре и динамике активных областей и их магнитного поля, которые в первую очередь ответственны за взрывные процессы на Солнце, в том числе и вспышки. Уникальная космическая обсерватория SOHO, находящаяся на расстоянии около 1.5 миллионов километров от Земли в точке либрации L1, ведет мониторинговые наблюдения солнечной короны и СМЕ. У данной методики существует две основных проблемы. Во-первых, особенность эксперимента

на SOHO такова, что СМЕ наблюдаются в единственной проекции перпендикулярной к направлению на Землю, вследствие чего информация о тех областях СМЕ, которые приближаются к Земле отсутствует. Во-вторых, до сих пор не достаточно хорошо развита модель генерации СКЛ в солнечных вспышках. Два этих момента делают пока невозможным прогноз потоков СКЛ. Остается только их диагностика и принятие оперативных мер в случае возникновения опасной ситуации, что вполне реально, поскольку длительность события в СКЛ может достигать нескольких суток. Диагностика динамики СКЛ и ГКЛ с успехом ведется как на поверхности Земли, так и в космосе. На земле вариации потоков ГКЛ и СКЛ с энергиями от ~1 ГэВ с очень большой точностью измеряются на нейтронных мониторах. В космосе, в частности на геостационарной орбите и в межпланетном пространстве, измеряются потоки космических лучей с энергиями десятки-сотни МэВ и выше. Таким образом, проблему мониторинга и краткосрочного "прогноза де-факто" СКЛ и ГКЛ, в первом приближении можно считать решенной.

Таблица 2. Соотношение между явлениями и факторами космической погоды

Факторы	Явления в космической погоде			
	Солнечные вспышки	КОВ	СМЕ	Солнечный цикл
ГКЛ				
РПЗ				
СКЛ				
ИЭИ				
Геомаг. бури				
Геомаг. суббури				

Однако остается проблема, связанная с предсказанием геомагнитных бурь, которые, как известно, усиливают эффективность воздействия СКЛ, а также влекут за собой много других проблем, как на Земле, так и в космосе. Как видно из таблицы 2, предсказание геомагнитных возмущений также требует диагностики и прогноза прихода к Земле СМЕ, а также КОВ. Проблема краткосрочного прогноза прихода СМЕ решается несколькими способами. В первую очередь - это мониторинг параметров плазмы солнечного ветра и ММП на КА SOHO и ACE в точке либрации, от которой СМЕ доходит до Земли за 20-40 мин, в зависимости от скорости. Прямые измерения характеристик СМЕ на подходе к Земле позволяют давать очень точный, хотя и

чрезвычайно краткосрочный, прогноз геомагнитных бурь. Другой метод прогноза прихода к Земле СМЕ и определения его характеристик основан на измерении вариаций ГКЛ с помощью нейтронных мониторов. Как уже было сказано, при приближении СМЕ к Земле поток ГКЛ уменьшается, наблюдается Форбуш-эффект. По характерным деталям Форбуш-понижения можно судить о свойствах СМЕ. Конечно, точность этого косвенного метода не высока, поскольку на потоки ГКЛ существенное влияние оказывают многие другие факторы, в частности геомагнитная и межпланетная возмущенность. Однако, время упреждения для данного метода существенно больше (часы). По-видимому, в прогнозе начала и мощности геомагнитных бурь наиболее эффективным является сочетание прямой и косвенной методик.

Для прогноза суббуревой активности и динамики внешнего РПЗ необходимо уметь предсказывать характеристики КОВ и следующего за ним быстрого солнечного ветра из корональной дыры. Однако методика такого предсказания развита пока слабо, поскольку, не смотря на рекуррентность, свойства корональных дыр и КОВ и сильно меняются от оборота к обороту. Этим изменениям способствуют также СМЕ, которые при своем распространении сильно меняют квазистационарную структуру межпланетного пространства. Таким образом, в случае с КОВ остается только диагностика средствами прямых измерений в межпланетном пространстве. Косвенная методика нейтронных мониторов здесь не работает, поскольку КОВ, как правило, не имеют достаточно мощной ударной волны и сильного магнитного поля, чтобы промодулировать потоки ГКЛ в гелиосфере.

Наконец, проблема прогноза ИЭИ находится в еще менее развитом состоянии, поскольку, отсутствует полное научное понимание феномена солнечной активности, ее причин и основных управляющих физических параметров. Вследствие этого пока нет надежной модели по описанию динамики активной области на Солнце и предсказанию по ней времени начала и характеристик солнечной вспышки. Однако мониторинг и диагностика ИЭИ уже налажен на КА. В частности на геостационарных ИСЗ (серии GOES, например) ведутся регулярные измерения рентгеновского излучения от Солнца.

Таким образом, не смотря на значительный прогресс в понимании основных факторов и последствий космической погоды, а также бурное развитие экспериментальных методов по их диагностике, наши прогностические возможности в цепочке "явления - факторы - последствия" пока остаются ограниченными. В первую очередь это связано с не достаточно полным пониманием природы явлений в космической погоде, что является прямым следствием не достаточности

существующих экспериментальных данных о комплексных нелинейных физических процессах, происходящих на Солнце, в межпланетной среде и в земной магнитосфере и ионосфере.

### Список литературы

1. **O'Sullivan D., et al.** Study of radiation fields and dosimetry at aviation altitudes final report January 1996-June 1999. Dublin Institute for Advanced Studies. 1999.

2. **Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А.** Фоновые потоки ионов как источник сбоев микроэлектроники на борту космических аппаратов // Космические исследования. 1994. Т. 32, Вып. 2. С. 112-117

3. **Kuznetsov N.V., Chodnenko V.P., Shatsky M.V., Gobchansky O.P.** An analysis of Single Event Upsets recorded by Russian spacecraft electronics // In: Space Radiation Environment Workshop & Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station. Book of Abstracts. 1999. P.40.

4. **Bashkirov V.F., Kuznetsov N.V., Nymmik R.A.** An analysis of the SEU rate of microcircuits exposed by the various components of space radiation. // Rad. Meas. 1999. V. 30. P. 427-433.

5. **Koskinen K., et al.** Space weather and interaction with spacecraft. SPEE Final Report, ISBN 951-698-509-7. Finnish Meteorological Institute Helsinki. 1999.

6. **Милеев В.Н., Новиков Л.С.** Физико-математическая модель электризации ИСЗ на геостационарной и высокоэллиптических орбитах // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 86. М.: Наука, 1986. С. 64-98.

7. **Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А.** Радиационные одиночные сбои микроэлектроники космических аппаратов, обусловленные событиями солнечных космических лучей // Космические исследования. 1997. Т. 35, Вып. 5. С. 465-479.

8. **Baker D.N., J.H. Allen, S.G. Kanekal, and G.D. Reeves** Disturbed space environment may have been related to pager satellite failure // EOS. 1998. V. 79. N 40. P. 477-483.

9. **Тверская Л.В.** О границе инжекции электронов в магнитосферу // Геомагнетизм и аэронаука. 1986. 26. С. 864-865.

10. **Чижевский А.Л.** Земное эхо солнечных бурь, М.: Мысль, 1976.

11. **Belov A.V., Gushchina R.T., and Yanke V.G.** On connection of cosmic ray long term variations with solar - heliospheric parameters // Proc. 26-th ICRC. 1999. V. 7. P. 175-178.

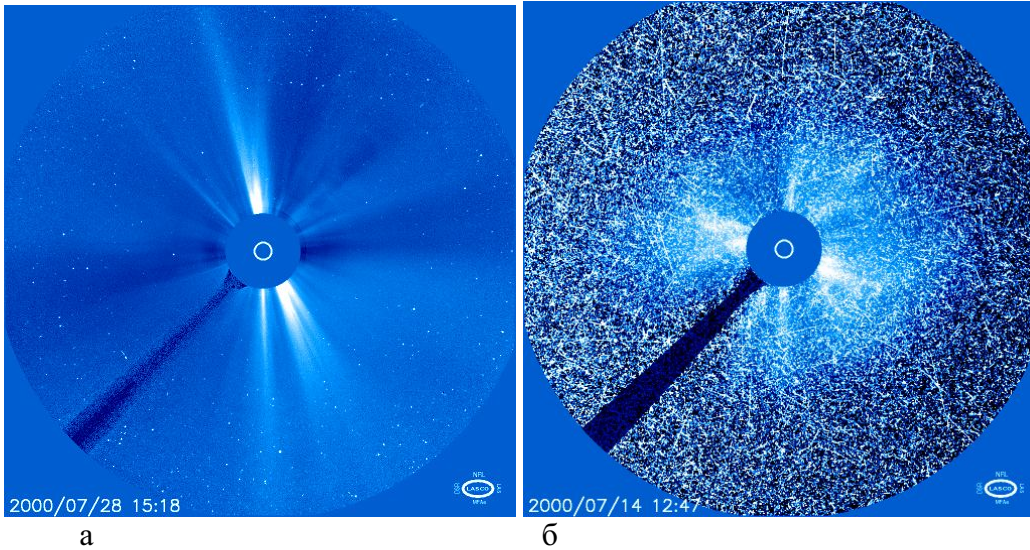


Рис. 1. Пример воздействия СКЛ на полупроводниковый детектор КА SOHO. а) Изображение солнечной короны, полученное в нормальных условиях. Белые точки в поле зрения прибора - звезды. б) изображение солнечной короны во время прихода СКЛ. Отчетливо видно множество следов (белые черточки) от вторичных частиц, образованных при взаимодействии СКЛ с веществом КА.

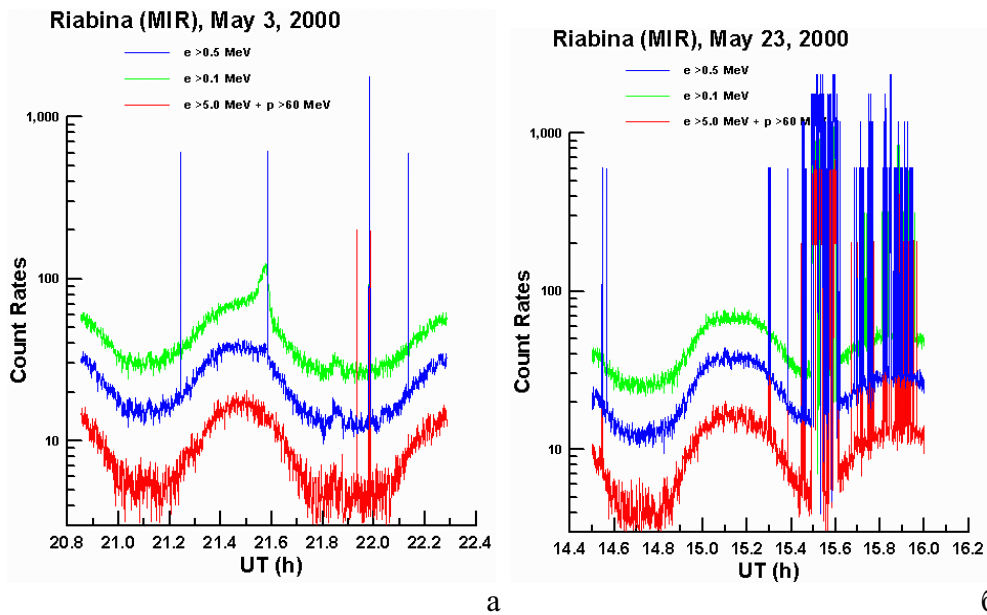


Рис. 2. Примеры космофизических данных о потоках проникающей радиации на ОС МИР, полученные по телеметрии в спокойных геомагнитных условиях (а) и во время сильной магнитной бури 24 мая 2000 г. (б)



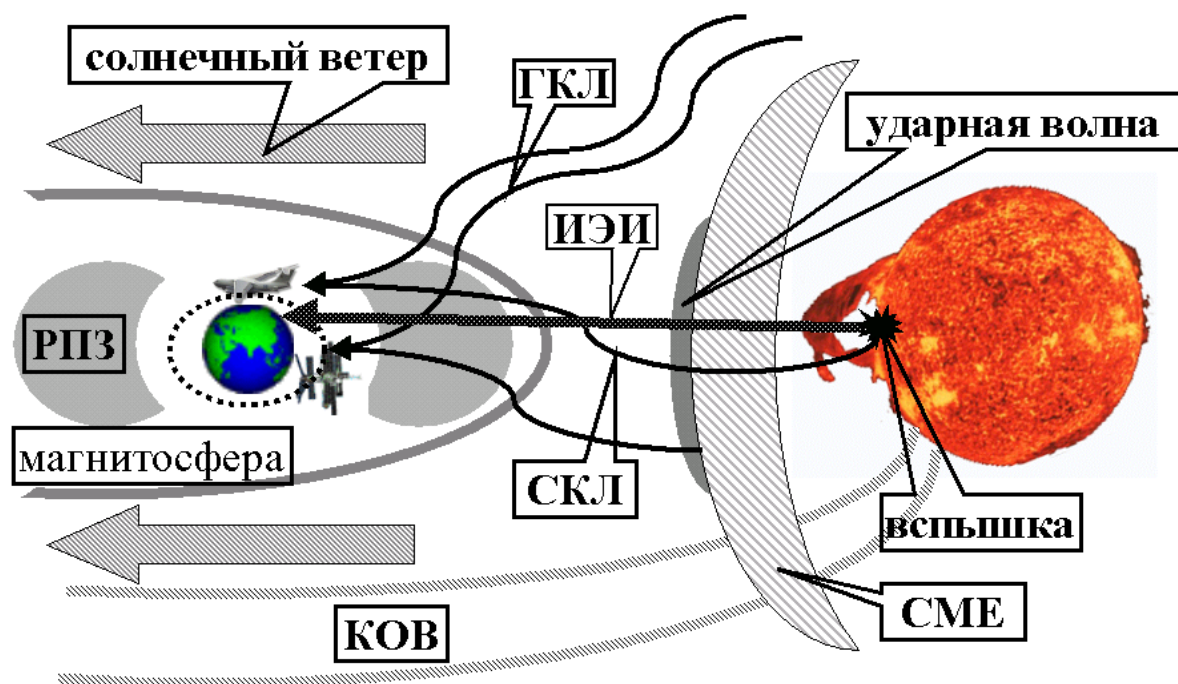


Рис. 3. Схема основных явлений и факторов космической погоды (расшифровку см. в тексте).

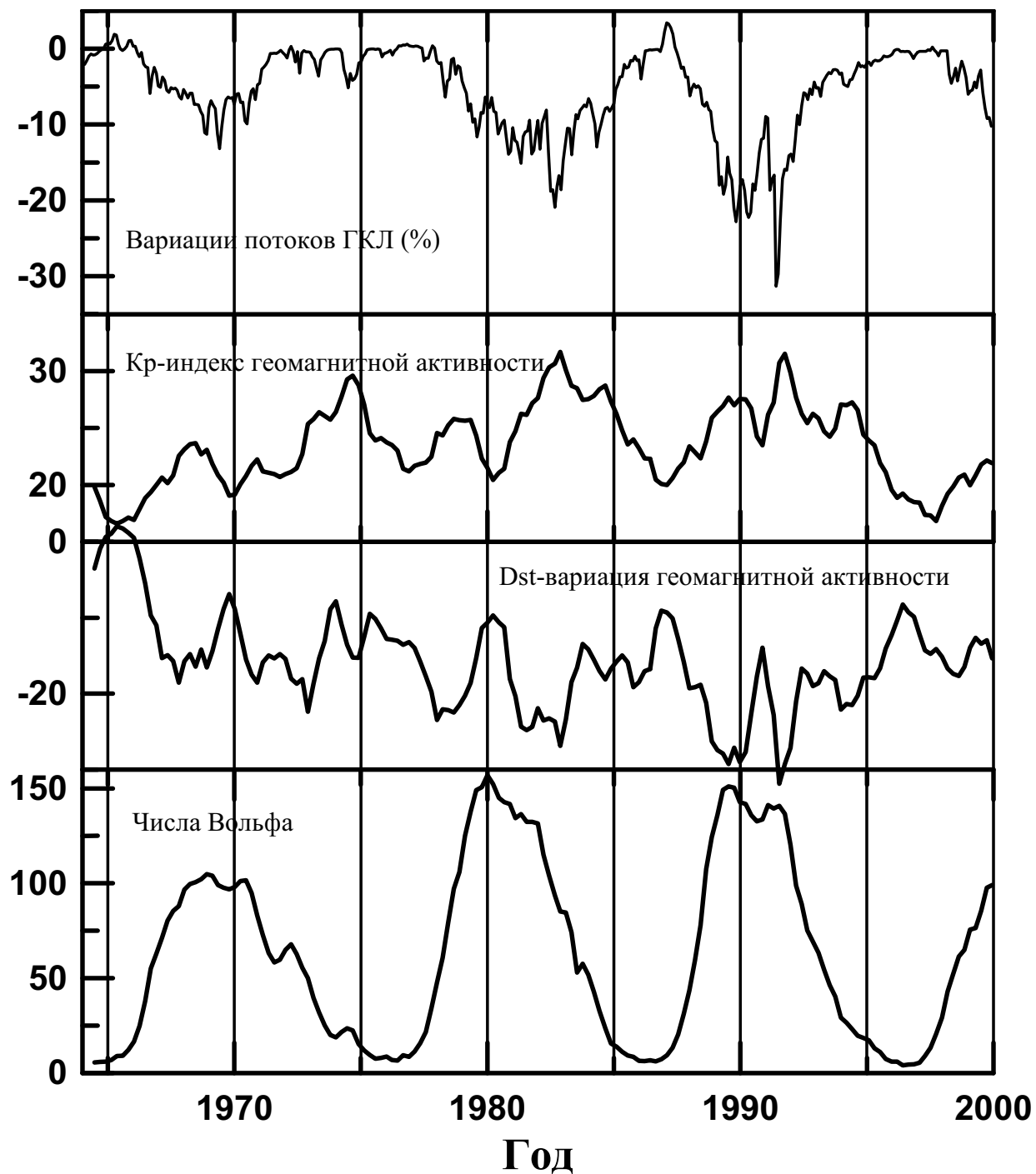


Рис. 4. Сравнение 11-летних солнечно циклических вариаций в потоках ГКЛ, в суббуревой геомагнитной активности (Kp-индекс) и в сильных магнитных бурях (Dst-вариация) с динамикой чисел Вольфа.

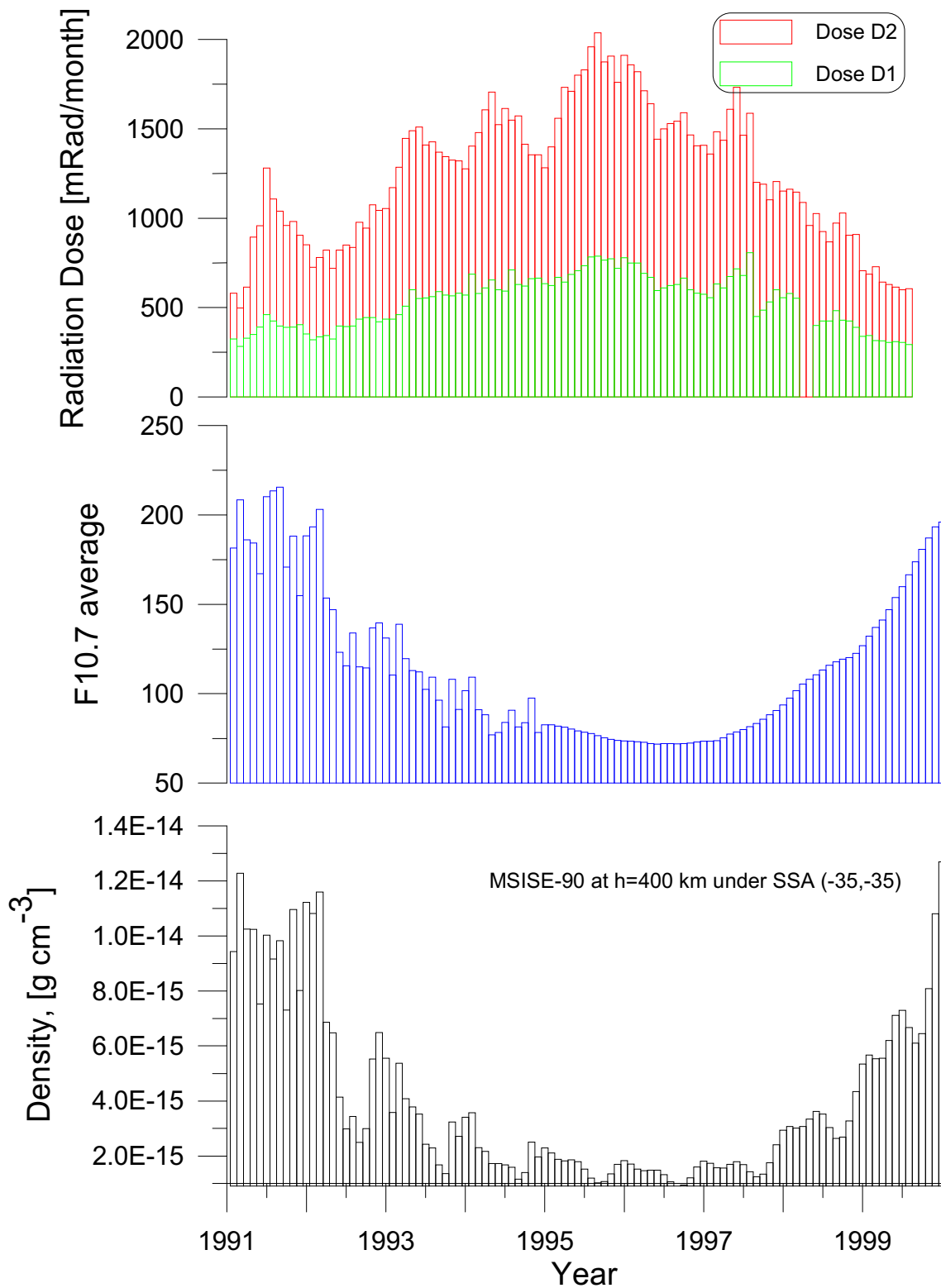


Рис. 5. Динамика радиационной дозы на борту ОС Мир за последние 10 лет (верхняя панель). Для сравнения представлена динамика солнечной активности (средняя панель) и плотности земной атмосферы на высоте 400 км (нижняя панель).