

УДК 551.388

## АВИАПЕРЕВОЗКИ И КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

В.А. Буров

В статье показана актуальность наблюдений за космической погодой, рассмотрен аспект безопасности авиаперелетов, связанный с влиянием опасных гелиогеофизических явлений на пилотов и пассажиров авиалайнеров. Показаны пути решения этой новой проблемы в Российской Федерации, в том числе и с учетом зарубежного опыта.

Ключевые слова: авиоперевозки, Солнце, радиосвязь, навигация, магнитная буря, радиационная обстановка, трансполярный перелет, прогноз.

К зависимости своей жизни от погодных условий человечество привыкло много тысяч лет назад. Грозы и ураганы, засухи и наводнения, внезапные заморозки или длительные оттепели, туманы и град – далеко не полный перечень погодных явлений оказывающих самое непосредственное влияние на нашу жизнь и на жизнь наших далеких предков. Все это давно известно и человечество во многом научилось справляться с подобными проблемами, минимизируя возможный ущерб (хотя, разумеется, и не в состоянии полностью избавиться от жертв и разрушений). Бурный технический прогресс (особенно в последние полвека) материализовал ещё одну угрозу для современных систем (и в определенных ситуациях – здоровью человека) – это воздействие различных явлений «Космической погоды». Именно эта, сравнительно молодая область знаний играет все большую роль в жизни современного высокотехнологичного общества.

### ПОЧЕМУ?

Космическая погода – это явления, происходящие в солнечной атмосфере, околоземном космическом пространстве и атмосфере Земли. Первичным источником возмущений являются вариации солнечного излучения, а перенос возмущений осуществляется волнами и частицами в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Прежде всего, эти возмущения сказываются на тех процессах, в которых существенную роль играет установившееся равновесие электрических токов и магнитных полей. Возмущения, нарушающие это равновесие, могут привести к возникновению различных нештатных ситуаций в системах навигации, связи спутниковой навигации (ГЛОНАСС/GPS/GALILEO) и вызывать серьезные проблемы при авиаперевозках. Кроме того, потоки высокоэнергичных протонов сол-

нечных вспышек могут представлять угрозу здоровью пилотов и пассажиров авиалайнера при повышении радиационной обстановки на борту. Такие возмущения могут привести к полной или частичной потере связи во время перелета, задержке рейса или изменению маршрута, возрастанию расхода горючего или уменьшению полетного веса. Какие наблюдательные данные о космической погоде необходимы для подготовки диагностических и прогностических сводок, обеспечивающих безопасность авиаперевозок с точки зрения негативного влияния космической погоды? Кто может обеспечивать такой мониторинг, учитывая, что возмущения космической погоды носят, как правило, глобальный характер?

Вклад России в обеспечение безопасности полетов в этом аспекте сегодня явно недостаточен. Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Росгидромета (ФГБУ «ИПГ») обладает значительным потенциалом в этой области исследований, особенно с учетом развиваемой в последние годы новой системы геофизического мониторинга, и готов включиться в решение проблемы обеспечения безопасности авиаперевозок в высоких и средних широтах в целях минимизации возможного ущерба от неблагоприятных явлений космической погоды.

### КАКИМ ОБРАЗОМ?

1. Обеспечение устойчивой и непрерывной связи самолет – центр управления полетами, является абсолютно необходимым элементом авиаперевозок. Эта связь осуществляется как помощью спутниковой системы (САТКОМ) так и обычной радиосвязи в высокочастотном диапазоне длин волн (ВЧ).

Собственно связь осуществляется с помощью радиоволн, распространение которых определяется состоянием ионосферы Земли –

оболочки Земли на высотах от 60 до 1000 км, состоящей из смеси газа нейтральных атомов и молекул и квазинейтральной плазмы. Радиоволна на пути от передатчика до приемника отражается от слоя ионосферы, проходит сквозь него или поглощается в зависимости от состояния космической погоды. Высота и характеристики этого слоя зависят от плотности потоков солнечного излучения и состояния магнитного поля. А следовательно траектория и амплитудно-частотные характеристики принимаемого сигнала во многом зависят от степени возмущенности космической погоды. Изменчивость солнечного излучения (от ультрафиолетового до радио- и рентгеновского диапазонов), выбросы корональной массы и потоки высокоэнергичных частиц, достигающих околоземного космического пространства - эти явления и формируют космическую погоду, а, следовательно, и определяют степень воздействия на авиаперевозки. Естественно, что в зависимости от региона, используемого канала связи и применяемой частоты мы будем сталкиваться с разными проблемами. Высоко-частотная радиосвязь в полярных зонах подвержена сильному влиянию солнечных вспышек из-за потоков протонов от солнечных вспышек, меняющих степень ионизации ионосферы. Кроме того ситуация здесь усугубляется частыми полярными сияниями (причиной которых являются потоки «высыпающихся» энергичных частиц) и магнитными суббуриями. Эти явления могут продолжаться часами и привести к полной потере связи. В средних широтах высокочастотная связь может быть нарушена, прежде всего, на дневной стороне Земли во время рентгеновских солнечных вспышек. Такие вспышки существенно меняют степень ионизации нижнего слоя ионосферы, меняя условия отражения и поглощения радиоволн, и препятствуют радиосвязи на периоды от нескольких минут до нескольких часов.

Система САТКОМ, базирующаяся на геостационарных спутниках связи расположенных вблизи экватора не в состоянии обеспечить получение сигнала в полярных (более 82 градусов широты) зонах из-за того, что на этих широтах спутник связи уже не виден: он находится под горизонтом. На широтах менее 82 градусов спутниковая связь использует для радиосвязи достаточно высокие частоты, чтобы надежно проходить через ионосферу Земли. Однако во время ионосферных возмущений, когда наблюдается эффект «мерцаний» (“scintillation”), то есть когда в ионосфере Земли возникают пространственные неоднородности, радиоволны, проходя через такие неоднородности, претер-

певают изменения по амплитуде и фазе волны. Эти искажения сигнала могут привести к его полной потере приемником. В экваториальной зоне (примерно 10 градусов от геомагнитного экватора) в периоды местной полночи и вблизи захода Солнца такие «мерцания» могут привести к полному поглощению сигнала. В периоды экстремальных возмущений космической погоды пропадание сигнала САТКОМ может наблюдаться и на средних широтах, как это было в конце октября 2003 года.

В высоких широтах (но менее 82 градусов широты) наиболее серьезной проблемой является изменения фазы сигнала, обусловленных «мерцаниями», частота появления которых увеличивается во время геомагнитных возмущений.

2. Задача определения местоположения самолета уже сейчас в значительной степени решается с помощью так называемой «спутниковой навигации» – систем ГЛОНАСС/GPS/GALLILEO. В ближайшем будущем эти системы, будучи дополнены наземными корректирующими комплексами(WAAS – США, EGNOS - Европа, MSAS- Япония, GAGAN – Индия), полностью возьмут на себя задачи управления воздушным судном. Влияние возмущений космической погоды может здесь сказываться различными способами:

- возрастание ошибок позиционирования во время ионосферных возмущений. Это происходит из-за изменения электронной концентрации на пути распространения сигнала от передатчика к приемнику и, соответственно, возникающих ошибок в определении временных задержек используемых для расчета местоположения;

- потеря сигнала из-за «мерцаний», как это уже рассматривалось при описании проблем с радиосвязью. Наиболее вероятно это во время сильных солнечных бурь солнечные радиовсплески могут наблюдаться на частотах, совпадающих с частотами, используемыми системой спутниковой навигации (порядка нескольких гигагерц). Так в декабре 2006 года правополяризованная волна солнечного радиовсплеска на частотах L1 и L2 (используемых в спутниковой навигации) привела к полной потере GPS сигнала в течение 10 минут. 29 и 30 октября 2003 года по отчету Федеральной Службы Авиации США (FAA) система WAAS (WideAreaAugmentationSystem) глобальная американская система точного GPS позиционирования для авиации была полностью неработоспособна в течение 15 и 11 часов соответственно из-за сильных солнечных вспышек.



Рис. 1. Типичные трассы трансполярных перелетов из Северной Америки в Азию.

3. Во время сильных солнечных вспышек самолеты, трассы которых проходят над полярными регионами (рис. 1) подвергаются воздействию высоких уровней радиации, что может привести к нежелательным последствиям как для экипажа (многократно попадающего в эту зону) так и для пассажиров, нормативы разового облучения для которых могут быть превышены в случае экстремальных событий.

Здесь нужно отметить, что большая часть радиационного воздействия обусловлена потоками протонов с энергией более 100 МэВ (в отличие от полетов космических аппаратов, где важны потоки с энергией выше 10 МэВ). Вклад в суммарную дозу потоков высокоэнергичных протонов солнечных вспышек в данном случае меньше вклада галактических космических лучей.

Существующие нормативы допустимых уровней облучений (табл. 1) говорят о том, что существует риск получения сверхнормативной дозы во время полета для различных групп населения, а для беременных женщин этот риск довольно велик.

Миниатюризация электронных приборов (а это устойчивый тренд в последние годы) уве-

личивает риск радиационного поражения отдельных элементов при воздействии на них потоков высокоэнергичных частиц солнечных вспышек. Это может привести к ложным срабатываниям и выдаче некорректных команд. Так вероятность повреждения блока оперативной памяти (за счет попадания в нее одной высокоэнергичной частицы от солнечной вспышки) оценивается как одно событие на 200 часов полета в полярной зоне. А такое событие приводит к выходу из строя этого блока.

### КАКОВА СИТУАЦИЯ В ДАННОЕ ВРЕМЯ?

Несмотря на существование всех перечисленных проблем, количество трансполярных перелетов в последние десять лет стремительно возрастает. И связано это, в первую очередь, с существенной экономией топлива при авиаперевозке и выигрышем во времени полета. Десять лет назад количество трансполярных перелетов не превышало нескольких сотен в год, сейчас это уже более десяти тысяч в год!

Таблица 1. Нормативы по предельному уровню облучения.

Ограничения эффективной дозы облучения (по данным Международной комиссии по радиологической защите)		
Категории	Эффективная доза (система СИ)	Эффективная доза (система СГС)
Профессиональная деятельность	Случайная: 20 мЗв в год, в среднем за 5 лет; 50 мЗв, ежегодно; 100 мЗв суммарно за 5 лет.  Предельно допустимая: 150 мЗв на хрусталик глаза; 500 мЗв на участок кожи площадью 1 см <sup>2</sup> ; 500 мЗв, на руки и ноги.	Случайная: 2 бэр в год, в среднем за 5 лет; 5 бэр, ежегодно; 10 бэр, суммарно за 5 лет.  Предельно допустимая: 15 бэр на хрусталик глаза; 50 бэр на участок кожи площадью 1 см <sup>2</sup> ; 50 бэр, на руки и ноги.
Общая категория	Случайная: 1 мЗв в год. В ряде случаев более высокое значение, на 1 мЗв выше в среднем за 5 лет.  Предельно допустимая: 150 мЗв на хрусталик глаза; 50 мЗв на участок кожи площадью 1 см <sup>2</sup> .	Случайная: 0.1 бэр в год. В ряде случаев более высокое значение, на 0.1 бэр выше в среднем за 5 лет.  Предельно допустимая: 15 бэр на хрусталик глаза; 5 бэр на участок кожи площадью 1 см <sup>2</sup> .
Для беременных	1 мЗв на эмбрион.	0.1 бэр на эмбрион.
Медицинское обследование	5 мЗв за обследование. Максимальное ограничение 20 мЗв в год.	0.5 бэр за обследование. Максимальное ограничение 2 бэр в год.

Иными словами, значимость проблемы обеспечения безопасности авиаперевозок на этих маршрутах возросла в сто раз (рис.2).

В 2005 году была организована Международная Координационная группа по управлению трансполярными авиаперевозками, в деятельности которой принимают участие Канада, США, Исландия и Российская Федерация. Сегодня методы и средства навигационного обеспечения полетов и управления воздушными судами в высоких широтах обязательно включают и системы мониторинга ионосферы, магнитного поля и потоков заряженных частиц в окружающем пространстве.

### ЧТО НУЖНО АВИАПЕРЕВОЗЧИКАМ?

Информацию, необходимую авиаперевозчикам можно подразделить на несколько групп в зависимости от фазы авиаперевозки и типа информации (рис. 3).

Во-первых, фазы авиаперевозки можно разделить на предполетную, режим полета, и по-

слеполетную; а информацию - на наблюдения, прогноз и анализ. Во-вторых следует разделять информацию представляемую экипажу и центру управления полетами. На предполетной фазе для каждого маршрута, в соответствии с временем вылета и регионом должен быть подготовлен суточный прогноз космической погоды, включающий данные об уровне солнечной активности, потоках энергичных частиц, рентгеновского излучения, магнитной обстановке и оптимальных радиочастотах на маршруте полета. Эта прогностическая информация должна быть предоставлена в центр управления полетами. С момента вылета до момента посадки должна быть доступна как наблюдательная информация о состоянии космической погоды, так и коррекция выданного ранее прогноза, включая данные наукастинга основных параметров космической погоды. В случае возникновения опасного гелиогеофизического явления, информация на борт самолета и в центр управления полетом должна быть

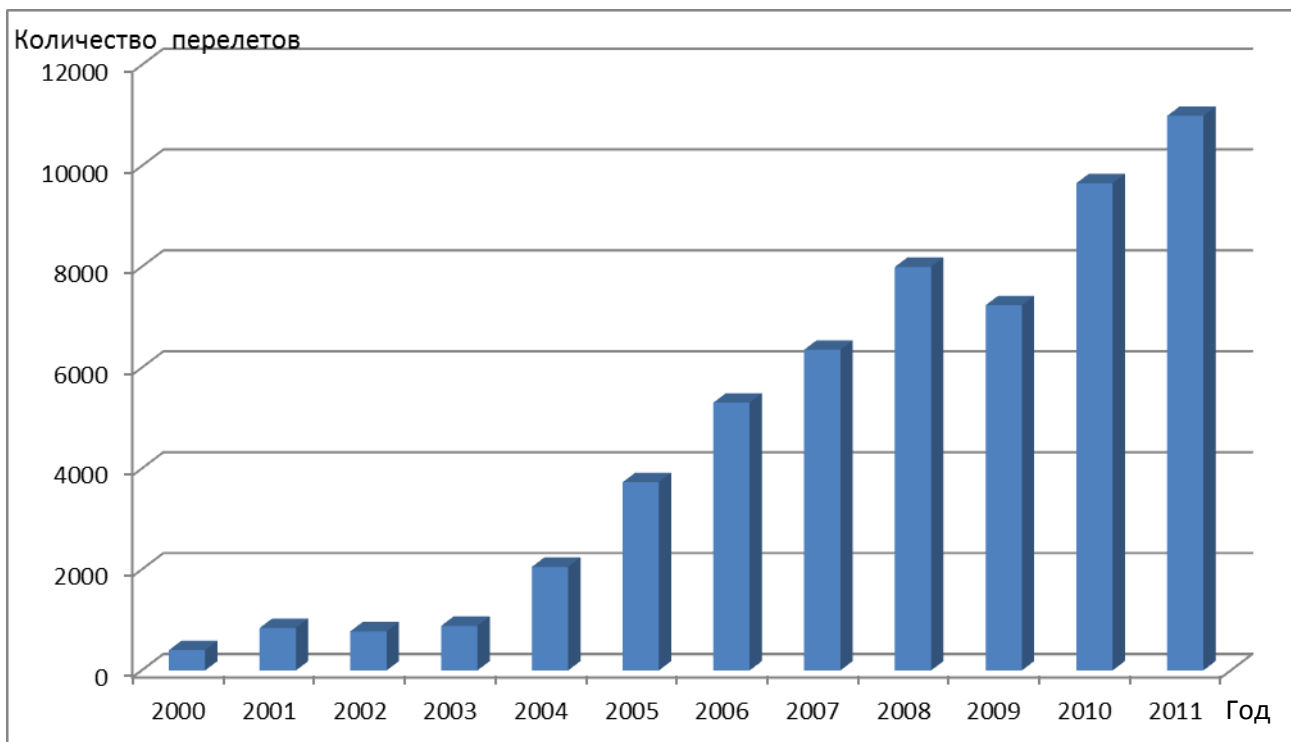


Рис. 2. Количество трансполярных перелетов в северном полушарии в 21 веке по данным NAVCANADA и United Airlines.

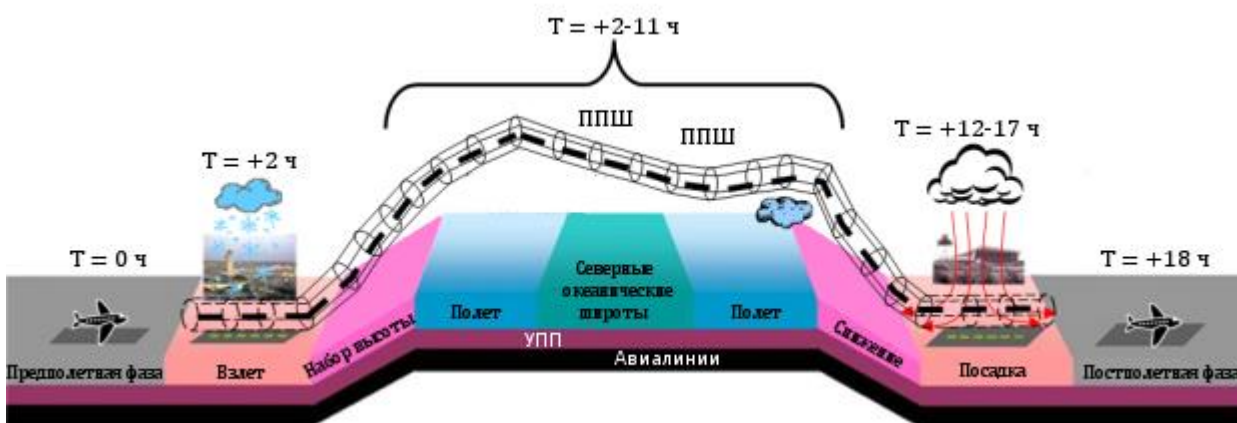


Рис. 3. Различные фазы трансполярного перелёта.

передана незамедлительно. После посадки в центр управления полетом должна быть доставлена информация, включающая анализ космической

погоды на маршруте перелета. Прогностическая информация должна готовиться в виде 4-мерной карты (3 пространственные координаты и время) охватывающей регион и период перелета. В таблице 2 показан примерный перечень и режим передачи информации на предполетном этапе.

На этапе полета перечень наблюдательной и прогностической информации много шире и передаваться она должна в реальном времени.

### **КТО ДОЛЖЕН ОБЕСПЕЧИТЬ НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧУ ДАННЫХ?**

Какие наблюдательные данные о космической погоде необходимы для подготовки диагностических и прогностических сводок, обеспечивающих безопасность авиаперевозок с точки зрения негативного влияния космической погоды? Каким образом лучше оценить степень влияния космической погоды? Наилучшим способом отображения степени влияния солнечных бурь на функционирование технологических и биологических систем, являются «шкалы космической погоды» NOAA (NOAA Space Weather Scales), с которыми можно ознакомиться на сайтах: [www.swpc.noaa.gov](http://www.swpc.noaa.gov) (англ.) и [www.space-weather.ru](http://www.space-weather.ru) (рус.).

Какие данные мониторинга космической погоды необходимы для оценки ситуации?

Вот примерный перечень данных:

- данные с геостационарного ИСЗ о потоках частиц, рентгеновского излучения Солнца, характеристиках активных областей на Солнце, выбросах корональной массы;
- данные с полярного ИСЗ о потоках частиц в полярной зоне и радиационных поясах Земли;
- поглощение в D-области ионосферы;
- поглощение в полярной шапке;
- характеристики магнитного поля на поверхности Земли;
- данные сети нейтронных мониторов;
- ионограммы с мировой сети станций;
- индексы солнечной и геомагнитной активности.

Это можно считать минимальным набором наблюдательных данных, требуемых для мони-

торинга космической погоды в интересах авиаперевозок. Разумеется, что все эти данные должны поступать в реальном или квазиреальном времени. Кто может обеспечивать такой мониторинг, учитывая, что возмущения космической погоды носят, как правило, глобальный характер?

В глобальном масштабе это Международная Служба Окружающей Космической Среды (ISES – [www.ises-spaceweather.org](http://www.ises-spaceweather.org)) которая включает 14 региональных прогностических центров (по одному от страны-участницы), Европейское Космическое Агентство (ECA) и космический центр в Тулузе на правах ассоциированного члена – (China (Beijing), USA (Boulder), Russia (Moscow), India (New Delhi), Canada (Ottawa), Czech Republic (Prague), Japan (Tokyo), Australia (Sydney), Sweden (Lund), Belgium (Brussels), Poland (Warsaw), South Africa (Hermanus), South Korea (Jeju) and Brazil (San Jose dos Campos)). В задачу службы входят наблюдения, сбор и обмен данными о космической погоде. Россию в этой службе представляет Институт прикладной геофизики Росгидромета (рис. 4).

Несомненная и все возрастающая роль явлений космической погоды для авиаперевозок, эксплуатации космических аппаратов, связь, геолокации послужили основой для принятия целого ряда решений в рамках Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Международной организации гражданской авиации (ИКАО).

ИКАО – International Civil Aviation Organization – специализированное учреждение ООН, устанавливающее международные нормы гражданской авиации и координирующее её развитие с целью повышения безопасности и эффективности.

Исполнительный Совет ВМО в 2010 году поручил КОС (Комиссия по основным системам) и КАМ (Комиссия по авиационной метеорологии) разработать планы по деятельности ВМО в области космической погоды. В ходе рассмотрения Комиссия приняла решение об учреждении межпрограммной группы по космической погоде (МКГКП), с участием экспертов, которые были определены как Комиссией по авиационной метеорологии, так и Космической программой. ИКАО приветствовала учреждение МКГКП и выразила желание участвовать в этом процессе.

Таблица 2. Перечень и режим передачи информации о космической погоде на предполётном этапе.

Требования авиации	Время выдачи	Потребитель	Пояснение
Прогноз потоков протонов (текст и график), которые могут быть опасны для экипажа и пассажиров.	6, 12, и 18 часов.	Центр управления полетом, экипаж.	Прогноз необходим для планирования смены экипажа или изменения плана полета. 18 часов – оптимальная заблаговременность, но меньшая тоже поможет принять правильное решение.
Текущая радиационная обстановка (текст и график)	В реальном времени (менее 30 минут).	Центр управления полетом, экипаж.	Поможет уменьшить получаемую дозу радиации во время мощных протонных вспышек.
Прогноз нарушения связи в полярных зонах в графическом виде, включающий данные об интенсивности.	На 12-24 часа с обновлением каждые 3 часа.	Центр управления полетом, экипаж.	Точные прогнозы помогут выбрать правильный маршрут полета и тактику управления полетом в критических ситуациях.
Прогноз состояния магнитного поля	На 12-24 часа с обновлением каждые 3 часа.	Центр управления полетом, экипаж.	Точные прогнозы помогут выбрать правильный маршрут полета и тактику управления полетом в критических ситуациях.
Прогноз прохождения радиоволн	На 12-24 часа с обновлением каждые 3 часа.	Центр управления полетом, экипаж.	Точные прогнозы помогут выбрать правильный маршрут полета и тактику управления полетом в критических ситуациях.



Рис. 4. Региональные центры Международной службы окружающей космической среды.

В заседании рабочей группы ИКАО в Перу (Лима, 15-19 марта 2010 года) был рассмотрен и одобрен проект инструктивного материала под названием «Руководство по эффектам космической погоды в отношении международной аэронавигации». В рамках связанного с этой темой вопроса Группа согласилась с целесообразностью разработки эксплуатационных требований в отношении космической погоды и разработки службы космической погоды для международной аэронавигации. В настоящее время этой группой совместно с межпрограммной группой ВМО по космической погоде (куда в качестве представителя Российской Федерации входит эксперт Института Прикладной Геофизики Росгидромета) дорабатывается документ под названием CONOPS – основополагающий документ о принципах организации

обеспечения авиаперевозок данными о космической погоде. В соответствии с решениями руководящих органов ИКАО в 2016 году обеспечение авиаперевозок данными о космической погоде должно быть включено в регламент ИКАО, регулирующий правила перевозок. Следует заметить, что в тихоокеанском центре управления полетами (Сан-Франциско, США) уже несколько лет наряду с погодным монитором, установлен монитор «космической погоды» NOAA, отражающий ситуацию в интересующем районе (рис. 5).

На веб-сайте прогностического центра Буллера (США) несколько лет функционирует специальный сервис (страница) для авиаперевозчиков. Аналогичные сервисы имеются и в ряде других центров «космической погоды».



Рис. 5. Центр управления полетами, Сан-Франциско, США.



### КТО МОЖЕТ ОБЕСПЕЧИТЬ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ?

Вклад России в обеспечение безопасности полетов в этом аспекте сегодня явно недостаточен. В особенности по сравнению тем, что выполняется в США и Канаде. В то же время ФГБУ «ИПГ» обладает значительным потенциалом в этой области исследований, особенно с учетом развиваемой в последние годы новой системы геофизического мониторинга, и готов включиться в решение проблемы обеспечения безопасности авиаперевозок в высоких и средних широтах в целях минимизации возможного ущерба от неблагоприятных явлений космической погоды.

Уже сейчас ФГБУ «ИПГ» располагает наблюдательной сетью, обеспечивающей выдачу нижеперечисленных видов информации.

### ВЫХОДНАЯ ПРОДУКЦИЯ ФГБУ «ИПГ» РОСГИДРОМЕТА

1. Прогностическая продукция института по космической погоде:
  - долгосрочные (2-5 дней) прогнозы;
  - краткосрочные (сутки), включая информацию о возможных возмущениях;
  - штормовые предупреждения и мониторинг развития.
2. Данные наблюдений института по космической погоде:
  - появление солнечных протонов;
  - геомагнитные бури;
  - ионосферные возмущения;
  - возмущения в радиационных поясах Земли.

На рисунке 6 представлен элемент главной страницы сайта «Космическая погода» ФГБУ «ИПГ» ([www.space-weather.ru](http://www.space-weather.ru)).

На рисунке 7 представлен ситуационный центр института, где собирается и визуально отражается вся информация по космической погоде.

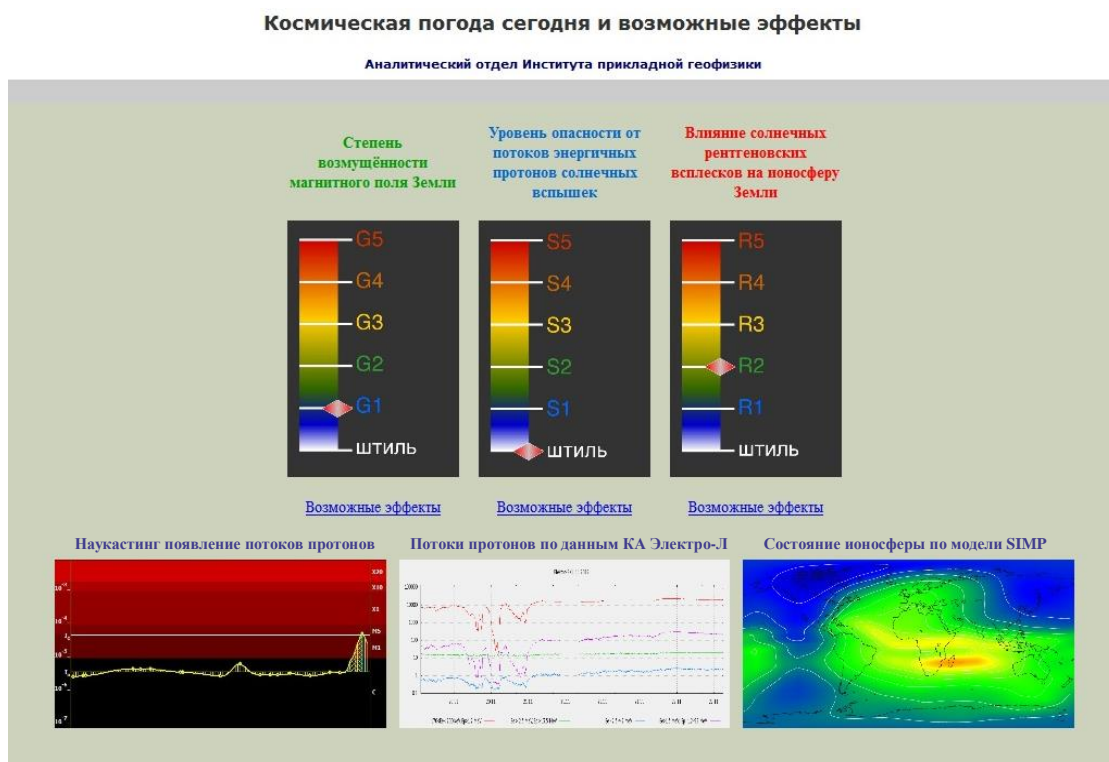


Рис. 6. Элемент главной страницы сайта «Космическая погода» ФГБУ «ИПГ».



Рис. 7. Ситуационный центр космической погоды Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова Росгидромета, Россия, г.Москва.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hammer G.P., Blettner M., Langner I., Zeeb H. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up// *Eur. J. Epidemiol.* 2012. - V.27(6). - P. 419-429.
2. Takada M., Nunomiya T., Ishikura T., Nakamura T., Lewis B.J., Bennett L.G., Getley I.L., Bennett B.H. Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters// *Radiat Prot Dosimetry.* 2012. - V. 149(2). - P. 169-176.
3. Yasuda H., Lee J., Yajima K., Hwang J.A., Sakai K. Measurement of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New York to Seoul// *Radiat Prot. Dosimetry.* 2011. - V. 146(1-3). - P.213-216.
4. Yang W., Elankumaran S., Marr L.C. Concentrations and size distributions of airborne influenza A viruses measured indoors at a health centre, a day-care centre and on aeroplanes// *J. R. Soc. Interface.* 2011. - V. 8(61). - P. 1176-1184.
5. Vuković B., Poje M., Varga M., Radolić V., Miklavčić I., Faj D., Stanić D., Planinić J. Measurements of neutron radiation in aircraft// *Appl. Radiat. Isot.* 2010. - V. 68(12). - P. 2398-2402.
6. Wissmann F., Reginatto M., Möller T. The ambient dose equivalent at flight altitudes: a fit to a large set of data using a Bayesian approach. *J. Radiol. Prot.* 2010. - V. 30(3). - P. 513-524.