Система **SIEVERT:** учёт **GCR** и **SPE-**компонентов космического излучения в авиации

N. Fuller [a], P. Lantos [a] and J.F. Bottollier-Depois [b]

[a] Paris Observatory, 92190 Meudon, FRANCE

[b] IRSN, B.P. 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, FRANCE

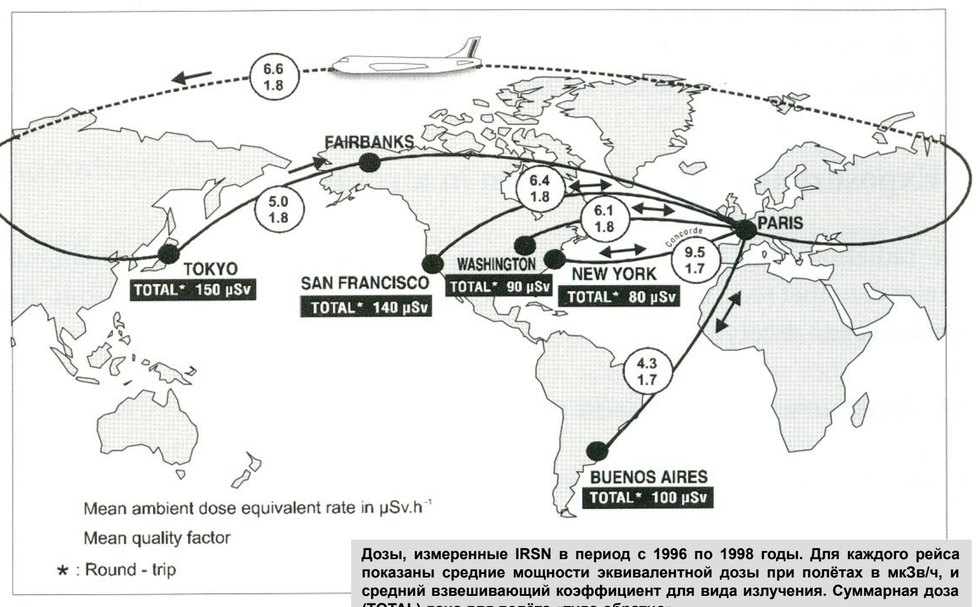
Перевод с английского:

Radsafe.ru, 2009

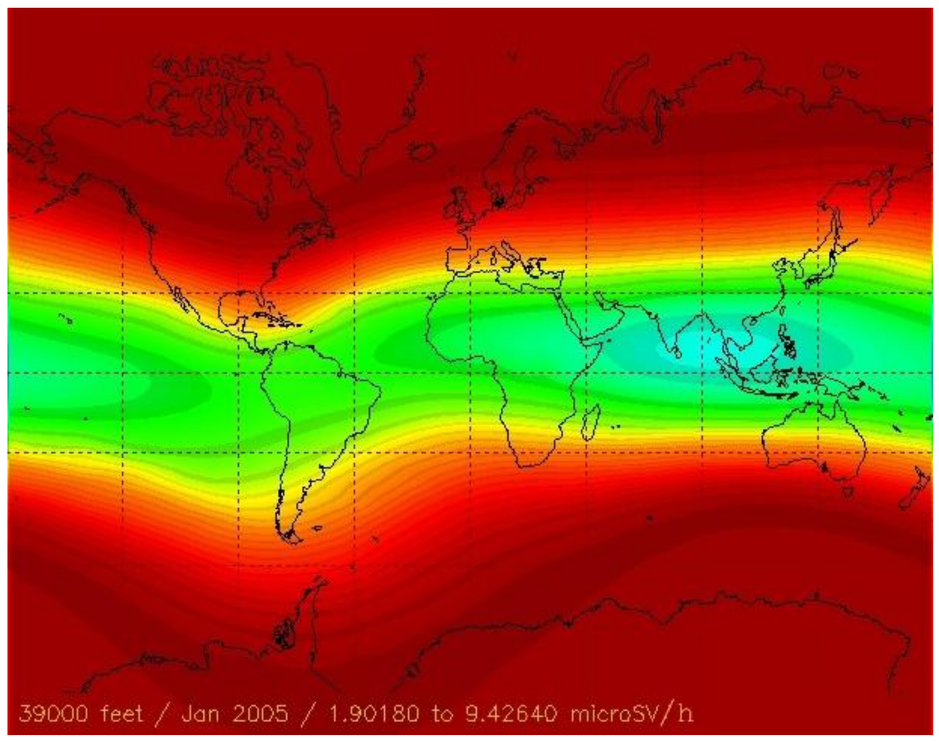
Недавно Еврокомиссия (директива 96/29/EURATOM) отнесла облучение экипажей самолетов от космического излучения к профессиональному облучению. Это следует рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ, 1991) рассмотревшим природные источники, создающие повышенных уровни облучения. Эффективная доза не должна превышать: 100 мЗв за любые последовательные 5 лет, 50 мЗв за любой календарный год (для беременных членов экипажа существуют особые требования).

Дозы облучения на борту самолёта обусловлены двумя источниками: галактическим излучением (GLE) и протонным излучением, связанным с солнечной активностью (SPE). Облучение является результатом многочисленных вторичных частиц, образующихся при взаимодействии высокоэнергетических первичных частиц с атмосферой. Галактическая компонента является постоянной, но модулируется 11-летним циклом солнечной активности. В математических моделях, таких как EPCARD (Schraube, 1999), модуляция учитывается с помощью специального параметра. EPCARD позволяет рассчитать дозу галактического излучения в любой точке для высот до 80000 футов. Вспышки на Солнце, которые на уровне земли регистрируются нейтронными мониторами, могут существенно увеличить дозы облучения на борту самолёта. Для учёта этих событий была разработана специальная полуэмпирическая модель SiGLE (Lantos & Fuller, 2003).

С целью предоставления помощи авиакомпаниям при внедрении новых требований по оценке доз космического излучения предлагается компьютерная система SIEVERT (Bottollier-Depois, 2003), использующая модели EPCARD и SiGLE. Этот инструмент для оценки доз облучения был разработан Генеральным управлением гражданской авиации Франции (DGAC) и партнёрами: Институтом ядерной и радиационной безопасности (IRSN) и Парижской обсерваторией. Данный профессиональный сервис доступен для авиакомпаний, а также для более широкой аудитории, на сайте **www.sievert-system.org,** где любой пассажир может получить оценку дозы, полученной в течение определённого авиаперелёта.



Дозы, измеренные IRSN в период с 1996 по 1998 годы. Для каждого рейса показаны средние мощности эквивалентной дозы при полётах в мкЗв/ч, и средний взвешивающий коэффициент для вида излучения. Суммарная доза (TOTAL) дана для полёта «туда-обратно»..

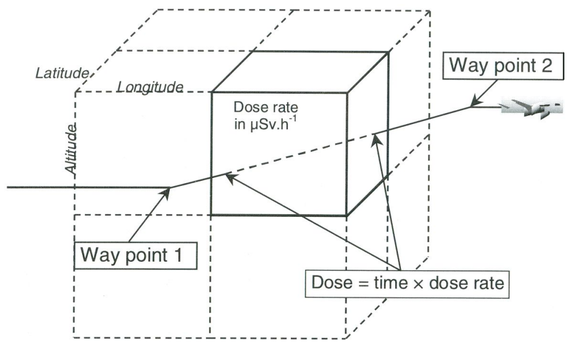


Принцип системы SIEVERT

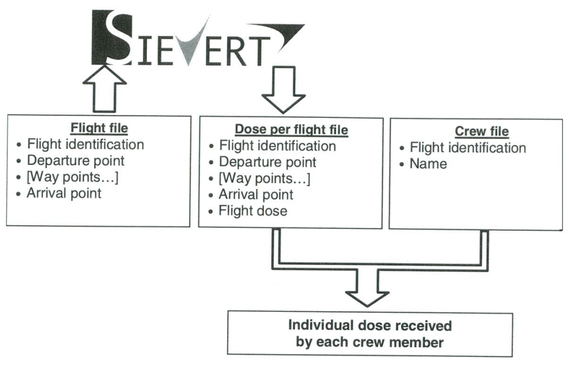
Всё воздушное пространство разбито на ячейки высотой по 1000 футов, 10° по доготе и 2° по широте. Таким образом, вся карта разбита на 265000 ячеек, каждой соответствует своё значение мощности дозы. Рассчитываются время нахождения самолёта в каждой ячейке и доза облучения; сумма доз в отдельных ячейках даёт дозу облучения при перелёте.

IRSN ежемесячно обновляет карту доз с учётом солнечной активности. Слева показаны дозы за 1 час полёта на типичной дозвуковой высоте (январь 2005). Для GLE-компоненты составляется отдельная карта (ниже). Дополнительно выполняются регулярные дозиметрические измерения на уровне земли и в самолётах для подтверждения, а при необходимости – корректировки полученных значений.

Авиакомпания готовит файл с планируемыми или выполненными рейсами и посылает его по адресу SIEVERT в интернете. Система добавляет в полученный файл эффективные дозы для каждого рейса. Дозы рассчитываются на основе характеристик полёта, с использованием верифицированных IRSN дозиметрических данных. Приветствуется описание рейсов в виде маршрутных точек. Если информация о рейсе минимальная (как на авиабилете), доза оценивается с использованием стандартного профиля. На этом этапе данные анонимны. Ответственность за регистрацию доз облучения каждого из членов экипажей несут авиакомпании..



Принцип расчёта дозы системой SIEVERT



Обмен данными между SIEVERT и авиакомпаниями.

Верификация

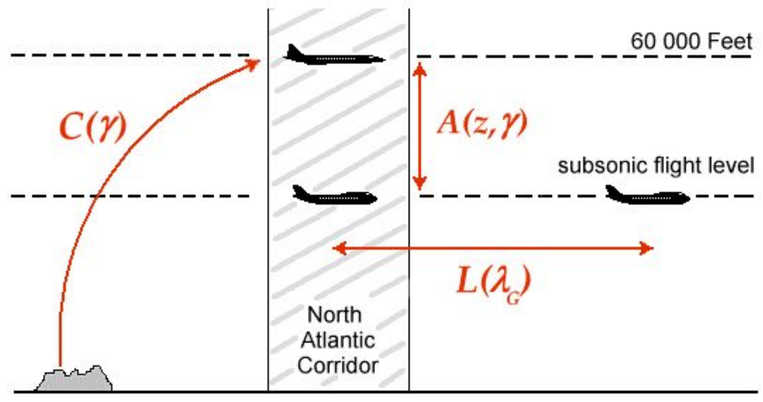
Результаты показывают, что ежемесячного обновления карты на основе усреднённых показаний нейтронного монитора достаточно для достижения точности при расчёте эффективной дозы около 20% для любого полёта. Исследования показывают, что для достижения хорошей точности важно использовать детальные планы полётов. Например при дозвуковом перелёте Париж-Вашингтон для двух рейсов, выполненных в один месяц, тем же самолётом, по одинаковому маршруту, вариации могут достигать 50%.

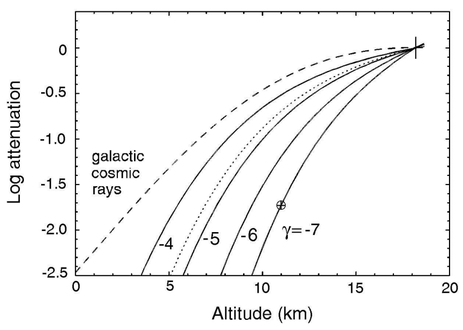
Принцип модели SiGLE

В полуэмпирической модели SiGLE для расчёта оценок дозы **D**(t), полученной во время солнечной вспышки, комбинируются результаты измерений на борту Конкорда во время событий на Солнце в 1989 и 2000 г.г., на борту дозвуковых самолётов в 2001 г.оду и расчётные данные компьютерных программ для события GLE 42 (29.09.1989).

По результатам измерений на Конкордах Air France и British Airways получена линейная зависимость временн*ых* профилей наземного нейтронного монитора и мощностей дозы на высоте 60000 футов для различных показателей спектра вариаций (γ). Экспонента жесткости спектра выведена из отношения показаний двух нейтронных мониторов (Webber &Quenby, 1959 ; Lantos, 2005), если недоступен полный расчёт (например, для недавних событий).

$$D(t) = A(z,\gamma) \times L(\lambda_G) \times C(\gamma) \times I(t)$$



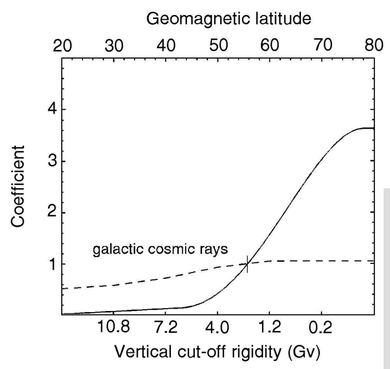


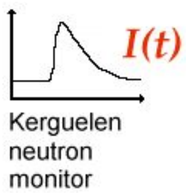
Логарифм ослабления мощности эквивалентной дозы в зависимости от высоты для различных значений показателя жёсткости спектра g. Ослабление галактического излучения показано штриховой линией, а ослабление излучения при GLE со средним значением показателя жёсткости g = - 4,7 показано точками.

Для определения фактора ослабления **A**(z,g) мощности дозы (МД) на высоте 60000 футов к МД на высоте полёта (z) использовались результаты измерений на борту Czech Airlines, выполненные при перелёте Прага-Нью-Йорк (Spurný & Dachev, 2001) во время события под номером 60 (15.04.2001), а также теоретические расчёты O'Brien et al. (1998). Так как для Конкорда были доступны только рейсы из Нью-Йорка (широта λ_G = 50.7°N) до Парижа (λ_G = 51.1°N) и Лондона (λ_G = 53.7°N), рассчитанные дозы действительны только для североатлантического коридора.

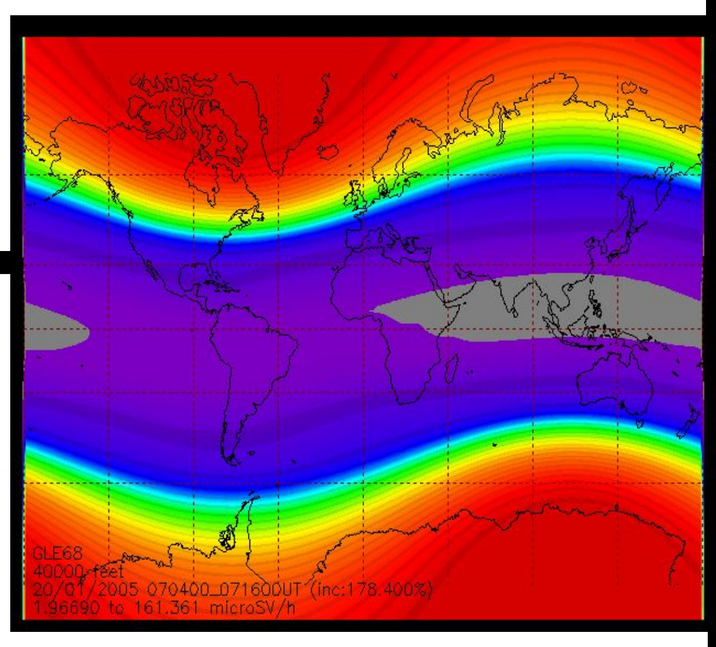
Функция **L**(λ_G), определяющая МД в зависимости от широты на дозвуковых высотах, определяется с использованием расчётов события GLE 42 (O'Brien & Sauer, 2000) для гринвического меридиана. Затем из результатов по североатлантическому коридору выводятся значения мощности дозы для других геомагнитных широт.

Опорный для модели монитор расположен на островах Кергелен в южной части Индийского океана в Порт-Франс (λ_G = 57.5°S, отсечка спектра 1.1 GV). Он эксплуатируется Институтом полярных исследований Франции (IPEV).)



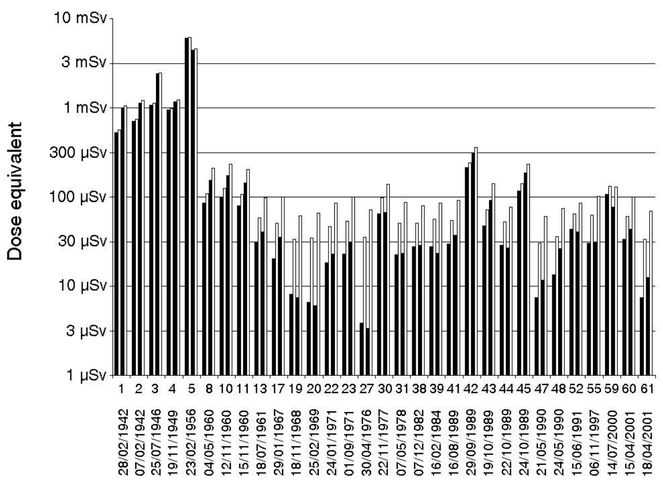


Коэффициент мощности дозы L в зависимости от широты для дозвуковых высот 35000 футов. Референтная широта соответствует трансатлантическим маршрутам. На нижней оси показаны значения вертикальной отсечки жёсткости для северного полушария и европейского сектора (epoch 1995).



Application to past and last GLE

На диаграмме ниже показаны эффективные дозы (ЭД), полученные на 2 маршрутах в период 31 GLE (из 67 GLE до 2004 года), для всех остальных радиационное воздействие было пренебрежимо. Каждому GLE сопоставлены 4 столбца. Первый (черный) это вклад GLE в ЭД при перелёте на Конкорде Париж – Нью-Йорк. Второй (белый) это полная ЭД с учётом вклада GCR, рассчитанного для данного месяца. Два других столбца соответствуют таким же ЭД для дозвукового перелёта Париж – Сан-Франциско. Расчёты выполнены для «неблагоприятного» времени вылета. Необходимо отметить, что меньшая защита на сверхзвуковых высотах компенсируется уменьшением времени полёта, которое составляет 11 часов 24 минуты для дозвукового полёта и 3,5 часа на Конкорде. Этим объясняется малое различие черных стобцов для конкретных GLE. Результаты показывают, что из 67 GLE, зарегистрированных с 1942 года, только 18 должны быть включены в расчёт дозы профессионального облучения, если считать, что можно пренебречь GLE с дозами ниже 30 мкЗв (этот предел сравним с нижней границей диапазона доз облучения от GCR при типовом межконтинентальном перелёте).



История значимых GLE в единицах дозы (с 1942 года) для сверх- и дозвуковых перелетов (см. описание в тексте)

Событие GLE 20 января 2005 г. показывает важную анизотропию север-юг выше широты 65°. Его интенсивность по данным по нейтронных мониторов составила: 178,4% в Kerguelen, 3308% в Terre Adélie и 2091% в McMurdo (с отсчётами по 5 минут). В северном полушарии примерно на тех же широтах интенсивность была всего 277% по монитору в Inuvik (Канада), 114% в Thule (Гренландия) и 112% в Barentsburg (Шпицберген). Таким образом, данное GLE является одним из наиболее интенсивных за последние 50 лет.

В таблице ниже показаны дозы за счёт GLE 68 и галактического излучения для типичных маршрутов. Были использованы реальные полётные планы и проведён расчёт по модели SiGLE. Дозы фонового галактического излучения рассчитаны программой CARI 6.

Дозы при перелётах из Парижа в Сан-Франциско и из Токио в Париж через полюс специально скорректированы с учётом упомянутой анизотропии (SiGLE даёт результаты 96,9 мкЗв с коррекцией и 88,3 мкЗв без неё).

На карте мира дан пример рассчитанных SiGLE доз облучения за один час полёта на дозвуковой высоте за счёт (GLE+GCR) при максимальном GLE.

Route	Dose received from GLE 68 µSv	Dose received from GCR µSv	Total dose µSv
Paris-Washington (B747)	53.1	39.4	92.5
Paris-San Francisco (A340)	73.9	65.8	139.7
Tokyo-Paris (polar route,B747)	49.8	61.8	111.7
Paris-Tokyo (Sib. route,B747)	14.1	44.3	68.4
Paris-Osaka (Sib. route,A340)	21.2	52.2	73.4
Osaka-Paris (Sib. route,A340)	60.8	70.6	131.4
Los Angeles-New York (B747)	15.2	61.8	77.0
Buenos Aires-Paris (B747)	11.7	35.3	47.0

Заключение

SIEVERT обеспечивает соответствие требованиям регламента по крайней мере по 3 причинам. Во-первых, получаемые результаты достаточно близки к действительным, что позволяет избежать недооценки доз. Во-вторых, способ оценки доз облучения одинаков для всех авиакомпаний. В-третьих, в будущем всегда будет возможно проведение ретроспективных расчётов доз облучения. Новаторский аспект SIEVERT в том, что учитываются оба компонента космического излучения (GCR и SPE) с помощью протестированных моделей EPCARD и SiGLE. Система используется на национальном уровне с 2000 года. Авиакомпании Франции используют её для оценки примерно 70000 рейсов ежемесячно.