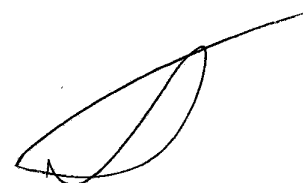


*На правах рукописи*



Салагаева Анжелика Валериевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛОННОГО КОМПОНЕНТА ВТОРИЧНЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ КАК ИСТОЧНИКА РАДИАЦИОННОГО  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ**

05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов  
и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск –2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Красноярском  
научном центре Сибирского Отделения РАН

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор  
Хлебопрос Рем Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Кашкин Валентин Борисович

кандидат физико-математических наук  
Васильев Юрий Владимирович

Ведущая организация: Сибирский государственный аэрокосмический  
университет им. акад. Решетнева М.Ф.

Защита состоится «22» апреля 2011 года в \_\_ часов на заседании диссер-  
тационного совета ДМ 212.099.05 в Сибирском федеральном университете по  
адресу: 660074, Красноярск, ул.Киренского, 26, ауд. УЛК 1-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федераль-  
ного университета по адресу: 660074, Красноярск, ул.Киренского, 26, Г 2-74.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



О.В.Непомнящий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интерес к пространственному распределению вторичных космических лучей как эколого-инженерная задача прежде всего связан с проблемами радиационной безопасности при полярных и приполярных перелетах.

Известно, что некоторые трассы межконтинентальных перелетов (Колтунов Я.И., 2007 г.) проходят вблизи северной полярной области. Эта область наименее защищена от вторжения энергичных частиц, и поэтому во время солнечных вспышек опасность радиационного облучения экипажа и пассажиров возрастает. Солнечные вспышки увеличивают дозы радиации на высотах, где проходят трассы пассажирских самолётов, в 20 – 30 раз. Так, во время гигантской солнечной вспышки 23 февраля 1956 г. (Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясно М.И., 1971 г.) мощность дозы возросла в 45 раз, а во время вспышки 6 апреля 2010 года – в сто раз (по данным российской орбитальной обсерватории "Тесис", спутник "Коронас-Фотон", 2010 г.). В настоящее время экипажи некоторых авиалиний предупреждают о начале солнечных вспышек. Так, во время сильнейшей вспышки в ноябре 2003 года экипаж авиакомпании "Дельта" рейса Чикаго – Гонконг вынужден был скорректировать маршрут в область более низких широт. Европейский Союз принял закон, согласно которому беременным женщинам-пилотам самолетов запрещается налёт часов с суммарной эквивалентной дозой радиации более 1,6 мЗв в год (постановление (ЕС) № 785/2004 от 21 апреля 2004 года).

Тем не менее, вопрос о радиационной безопасности при полетах в области высоких широт до последнего времени не подвергался серьезному научному исследованию. Исключением стали исследования влияния солнечных космических лучей на радиационную безопасность при космических полетах, при этом принимали во внимание только общеионизирующий компонент (H.J. Shaefer, J.I. Vette, R.W. Lowen, *et al.*, 1966; J.W. Haffner, R.C. Savin, J.M. Deerwester, A.C. Mascy, 1967; Л.И. Дорман, Л.И. Мирошниченко, 1968).

Особую актуальность приобретает исследование влияния вторичных нейтронов на естественный радиационный фон Земли в периоды максимальной солнечной активности, т.к. нейтроны наиболее активно взаимодействуют с ядрами атомов воздуха. Так, эквивалентная доза, получаемая полубесконечным слоем биологической ткани толщиной 20 см при облучении его изотропным потоком нейтронов на уровне моря, равна  $162 \pm 5$  Зв/год (J.I. Vette, 1966), что приблизительно составляет 50% от общего радиационного фона Земли. Более того, вторичные нуклоны, в отличие от общеионизирующего компонента вторичных космических лучей, обладают значительным широтным эффектом (С.Н. Вернов, Л.В. Границкий, 1970; Л. И. Дорман, 1975) – максимальная интенсивность вторичных нуклонов приходится на полярные широты. Для вторичных нуклонов эффект солнечной модуляции в сотни раз больше, чем для общеионизирующего компонента (электронов и мюонов), т.е. интенсивность вторичных нуклонов во время солнечных вспышек увеличивается в десятки раз (во

время некоторых вспышек – в сотни), соответственно увеличивается и уровень естественного радиационного фона Земли.

Таким образом, актуальным является разработка новых методов вычисления и контроля вариаций интенсивности вторичных космических лучей, а также методов оценки превышения уровня предельно допустимой дозы (ПДД) облучения.

**Цель работы.** Разработка метода вычисления интенсивности вторичных космических лучей, позволяющего контролировать динамику их распределения в атмосфере Земли с использованием глобальной сети нейтронных мониторов.

**Задачи исследования.**

1. Обобщить данные натурных измерений интенсивности вторичных космических лучей, полученные с использованием нейтронных мониторов и полупроводниковых детекторов в пунктах с разными значениями географических широты, долготы и высоты над уровнем моря, и провести качественный анализ физических явлений, лежащих в основе взаимодействия нуклонов с ядрами атомов атмосферных газов.

2. Разработать метод вычисления интенсивности вторичных космических лучей, основанный на применении теории вероятности и метода коэффициентов связи, для получения широтного, долготного и высотного распределений вторичных нейтронов и электронов в атмосфере Земли.

3. Построить математическую модель пространственного распределения вторичных нейтронов и электронов для нижней и верхней тропосферы в периоды минимальной и максимальной солнечной активности.

4. На основе математической модели пространственного распределения вторичных нейтронов и электронов в нижней и верхней тропосфере построить пространственное распределение их биологической эквивалентной дозы в зависимости от циклов солнечной активности.

5. На основе полученных результатов оценить возможность применения современных нейтронных мониторов для контроля вариаций естественного радиационного фона верхней тропосферы.

**Объект исследования.** Вторичные космические лучи (преимущественно нейтроны), которые генерируются первичными протонами при взаимодействии с ядрами атомов атмосферных газов (в основном с ядрами азота).

**Предмет исследования.** Оценка, контроль и пространственное распределение уровня мощности естественного радиационного фона планеты в различные периоды солнечной активности.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики с использованием вероятностного подхода и метода коэффициентов связи согласно теории марковских процессов. При разработке математической модели использовался алгоритмический язык C++ и пакет программ Matlab 6.5.

**Достоверность научных положений, результатов и выводов,** содержащихся в диссертационной работе, защищенная приоритетом авторских публикаций, подтверждается корректным использованием теории марковских про-

цессов, методов солнечно-земной физики и сравнении полученных результатов с известными экспериментальными данными (С.Н. Вернов, Л.В. Границкий, 1970; М. Лонгейер, 1985; А.В. Белов, Л.М. Байсултанова, Е.А. Ерошенко, 2007).

**На защиту выносятся:**

1. Научно обоснованный новый метод вычисления интенсивности вторичных космических лучей.
2. Научно обоснованная математическая модель пространственного распределения интенсивности вторичных космических лучей.
3. Научно обоснованные результаты исследования влияния солнечной активности на распределение интенсивности вторичных нейтронов и электронов.

**Научная новизна работы.**

1. Выявлен доминирующий вклад вторичных нейтронов в естественный радиационный фон Земли и их решающий вклад в превышение ПДД облучения экипажа и пассажиров при межконтинентальных перелетах.
2. Разработан новый метод расчета интенсивности пространственного распределения вторичных нейтронов, основанный на синтезе вероятностного подхода и метода коэффициентов связи, позволяющий получить аналитические решения для пространственного распределения интенсивности вторичных нейтронов, которые не всегда возможно получить методом решения уравнений переноса, особенно для атмосферы.
3. Выявлены географические зоны, в которых ПДД облучения для экипажа и пассажиров летательных аппаратов при максимальной солнечной активности превышена в десятки и сотни раз.

**Практическая значимость работы.** Разработанный метод вычисления интенсивности вторичных космических лучей (преимущественно нейтронов) позволяет экстраполировать результаты наземных измерений посредством глобальной сети нейтронных мониторов для различных высот над уровнем моря, в том числе и на высоты, где проходят трассы приполярных и полярных перелетов. Построенная математическая модель пространственного распределения вторичных космических лучей позволяет выявлять географические области и временные интервалы, представляющие значительную радиационную опасность для пассажиров и экипажей самолетов.

Предлагаемая математическая модель пространственного распределения вторичных космических лучей может быть использована для оценки эффекта солнечной модуляции уровня радиационной дозы при максимуме солнечной активности.

Для контроля вариаций радиационного фона в нижней и верхней тропосфере высоких широт в разные фазы солнечной активности рекомендуется использовать глобальную сеть нейтронных мониторов, расположенных в разных участках планеты. Предлагаемый метод позволяет существенно расширить спектр возможностей существующей в настоящее время глобальной сети нейтронных мониторов.

**Теоретическая значимость работы.** Разработан новый метод вычисления интенсивности пространственного распределения вторичных космических лу-

чей, позволяющий контролировать естественный радиационный фон атмосферы с помощью глобальной сети нейтронных мониторов. К достоинствам предложенного способа следует отнести существенное упрощение вычислительных процедур в сравнении с методом, основанным на решении уравнений переноса. На основе разработанного нового способа вычисления интенсивности вторичных нейтронов и электронов построена математическая модель их пространственного распределения в нижней и верхней тропосфере.

**Личный вклад автора.** Автором лично разработан на основе обобщения материала натурных измерительных данных новый метод вычисления интенсивности вторичных нейтронов для контроля естественного радиационного фона верхней тропосферы с применением глобальной наземной сети нейтронных мониторов, построена математическую модель пространственного распределения вторичных частиц в нижней и верхней тропосфере для различных циклов солнечной активности, и на основе построенной им математической модели выявлены географические зоны со значительным превышением ПДД для пассажиров и экипажей самолетов.

**Использования результатов работы.** Результаты диссертационной работы используются в составе информационно-измерительного комплекса наземной сети нейтронных мониторов НИИЯФ г. Новосибирск, МГУ, г. Москва и др. для ядерно-физических исследований космических лучей, и могут быть использованы для измерения интенсивности нейтронных потоков в атмосфере и обеспечения радиационной безопасности российскими и зарубежными авиакомпаниями при полетах в приполярных и полярных широтах. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ГОУ ВПО Сибирский аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева при подготовке студентов специальности 010400 по курсу «Ядерная физика».

**Апробация результатов.** Основные результаты работы были представлены на Научных конференциях аспирантов и молодых ученых-физиков (Красноярск, 2005, 2007); Международной конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2007); Конференции молодых ученых (Красноярск, 2009), V северном социально-экологическом конгрессе (Москва, 2009); Международной конференции «Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование» (Красноярск, 2009); Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика 2009», (Санкт-Петербург, 2009); VII Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, Казахстан, 2009); Международном симпозиуме по нанотехнологиям и освоению космического пространства (Хьюстон, США, 2009); Симпозиуме с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях» (Красноярск, 2010).

**Публикации.** По материалам диссертации работы опубликовано 11 работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 9 – в материалах и трудах конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа из-

ложена на 101 странице машинописного текста, содержит 32 рисунка и 11 таблиц. Список цитируемой литературы включает 116 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы, выносимых на защиту, дается краткое описание работы.

**Первая глава.** В первой главе приводится обзор литературных данных по исследованию вторичных космических лучей, преимущественно нейтронов. Известно, что пространственное распределение вторичных нейтронов может быть найдено как решение уравнения переноса (Л.И. Дорман, 1975; В.А. Наумов, А.А. Качанов, Т.С. Синеговская, С.И. Синеговский, 2006; А. В. Нифанова, 2008). Точное решение этого уравнения возможно только в нескольких случаях. В данной работе предполагается, что процесс соударения первичного протона с ядром атома воздуха является случайным марковским процессом – первичный протон «не помнит» предыдущего столкновения.

**Вторая глава.** Во второй главе анализируется взаимодействие вторичных космических лучей с ядрами атомов атмосферных газов. Вводится функция  $\Psi(x)$ , где  $x$  – атмосферное давление на данной высоте  $h$  над уровнем моря ( $x=x_0 \exp(-h/H)$ ), характеризующую вероятность  $k$ -го столкновения первичного нуклона с ядрами атомов атмосферного газов. Тогда вероятность  $k$ -го столкновения первичного нуклона с ядром атомов воздуха будет:

$$\Psi_k(x) = \frac{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1}}{\lambda \cdot (k-1)!} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

Вероятность прохождения частицы от уровня  $x$  до уровня  $x_0$  без распада и захвата дается функцией  $\varphi(x_0, x)$  где  $E_n$  – энергия нейтрона. Для нейтрона  $\varphi(x_0, x, E_n)$ , равна:

$$\varphi(E_n, x_0, x) = \exp\left(-\frac{x_0 - x}{\lambda}\right) \quad (2)$$

Интегрируя произведения (1) и (2), находим интенсивность вертикального потока нейтронов, генерированных в  $k$  столкновении:

$$j_{n,k} = \frac{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}{k \cdot (k-1)!} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \cdot D(E_n). \quad (3)$$

Полная интенсивность будет:

$$j_{n,k} = \frac{2\pi}{\left(\frac{x}{L_n} + 1\right)} \cdot \frac{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}{k \cdot (k-1)!} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \cdot D(E_n), \quad (4)$$

где  $D(E)$  – параметр взаимодействия, который, согласно современным представлениям (А.А Качанов, 2006), для нейтронов равен  $D(E_n) = E^{-\alpha-1}$ ,  $\alpha = \lg(E_n / E_0)$ ;  $E$  – энергия нейтрона  $k$ -го поколения;  $E_0=1$  МэВ. График зависимости интенсивности высокоэнергичных нейтронов от высоты, рассчитанной согласно (3), представлен на рис. 1

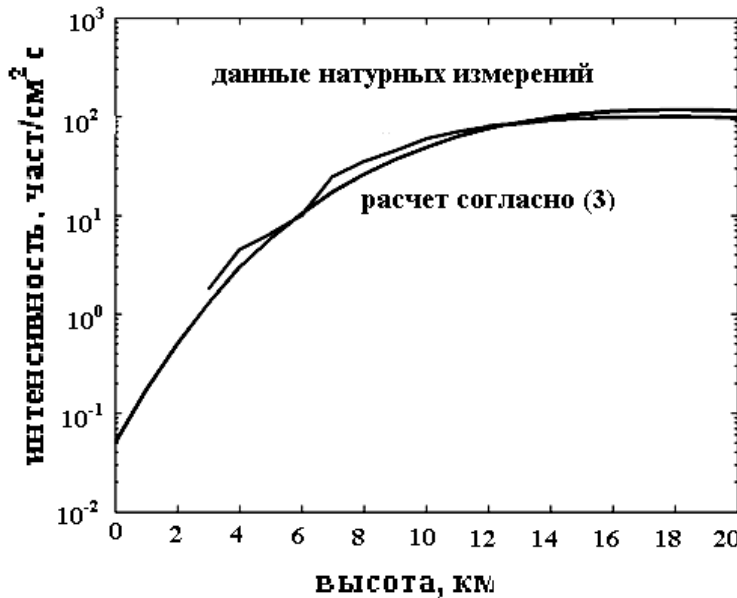


Рис. 1. Высотное распределение интенсивности вторичных нейтронов с энергией 26 МэВ, рассчитанной по (3), и экспериментальным данным.

Из сопоставления расчетов, выполненных высотно-каскадным методом (3) по натурным измерениям (М. Лонгейр, 1985), следует, что высотно-каскадным методом можно адекватно описывать высотное распределение нейтронов.

Аналогичным способом рассчитывается интенсивность мюон и электронов. Число  $\mu$ -мезонов, родившихся в слое  $x_2, x_2 + dx_2$  равно числу распавшихся  $\pi$ -мезонов в этом слое:

$$j_{\mu,k} \left( \frac{4}{5} E_\pi, x_2 \right) = \frac{b_\pi}{E_\pi} \cdot \frac{dx_2}{x_2} \cdot j_{\pi,k} (E_\pi, x_2), \quad (5a)$$



$$j_{\pi,k}(E_{\pi}, x_2) = \frac{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1}}{\lambda \cdot (k-1)! \left(1 + k \cdot \frac{E_{\pi}}{b_{\pi}}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{x_2}{\lambda}\right) \cdot D(E_{\pi}), \quad (56)$$

где  $b_{\pi} = 115$  (ГэВ) – постоянная распада  $\pi$ -мезонов;  $E_{\mu}$  – энергия мюона на уровне регистрации;  $a = 2,5$  МэВ см<sup>2</sup>/г – эффективная скорость энергетических потерь для области низких энергий (до 200 ГэВ);  $\rho(x)$  – плотность воздуха на уровне с давлением  $x$ .

Вероятность прохождения мюонов от уровня с давлением  $x_2$  до уровня регистрации  $x_0$  без распада и захвата:

$$\varphi_{\mu}(x_2, x) = \exp\left[-b_{\mu} \int_{x_2}^x \frac{dx}{\rho(x) E_{\mu} - a(x - x_2)}\right] = \left(\frac{x_2}{x}\right)^{\frac{b_{\mu}}{E_{\mu}(x)}}. \quad (6)$$

Предварительный расчет для мюонов дает

$$j_{\mu,k}\left(\frac{4}{5}E_{\pi}, x_2\right) = \frac{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\frac{b_{\mu}}{E_{\mu}(x)}}}{(k-1)! \left(1 + k \cdot \frac{E_{\pi}}{b_{\pi}}\right)} \cdot \gamma\left(k + \frac{b_{\mu}}{E_{\mu}(x)}, \frac{x_2}{\lambda}\right), \quad (7)$$

где  $\gamma\left(k + \frac{b_{\mu}}{E_{\mu}(x)}, \frac{x}{\lambda}\right)$  – неполная гамма-функция.

Пространственное распределение вторичных нуклонов найдено методом коэффициентов связи.

Коэффициенты связи определяются выражением:

$$\omega^i(R, h) = \frac{D(R) \cdot m^i(R, x)}{j^i(R, x)}, \quad (8)$$

где  $D(R)$  – дифференциальный спектр первичного потока;  $m^i(R, x)$  – интегральная кратность для числа частиц типа  $i$ , образованных от одной, вошедшей в атмосферу первичной частицы в пункте с жесткостью  $R$  на уровне  $x$ . Коэффици-

енты связи можно определить по геомагнитным эффектам, в частности, по зависимости интенсивности космических лучей от геомагнитной жесткости обреза:

$$\omega^i(R, x) = -\frac{1}{j^i(R, x)} \cdot \frac{\partial j^i(R, x)}{\partial R}. \quad (9)$$

Из (8) следует, что

$$j^i(R, x) = -j^i(R, x) \cdot \int \omega^i(R, x) dR. \quad (10)$$

Л.В. Границким предложено следующее выражение для коэффициентов связи:

$$\omega^i(R, x) = \alpha \cdot \gamma \cdot R^{\gamma-1} \cdot \exp(-\alpha \cdot \gamma \cdot R^\gamma). \quad (11)$$

При подстановке (11) в (10) и интегрировании получается:

$$j^i(R, x) = j_0^i(R_0, x_0) \cdot \exp(-\alpha \cdot R^\gamma), \quad (12)$$

где  $\alpha, \gamma$  – коэффициенты, не зависящие от  $R$ ;  $\alpha = 0,003729943$ ,  $\gamma = 1,924027991$ .

Функция (11) удовлетворяет следующим условиям:

имеет плато, потом убывает и при  $R \rightarrow \infty$  стремится к нулю;

имеет одну точку перегиба;

удовлетворяет условию нормировки:

$$\int_0^\infty \omega^i(R, x) dR = 1. \quad (13)$$

Объединяя (12) с выражением для высотного распределения нейтронов (4), можно получить выражение пространственного распределения вторичных потоков космических лучей:

$$j_n(R, x) = \frac{2\pi}{(x/L_n + 1)} \frac{\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k D(E_n)}{k(k-1)!} \exp\left[-\left(x/\lambda + \alpha R^\gamma\right)\right]. \quad (14)$$

При подстановки (14) в выражения для геомагнитной жесткости

$$R = 15 \cdot \cos^4(\Lambda(\varphi, \psi)) = \left(1 - (\cos(\varphi_0) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\psi - \psi_0) + \sin(\varphi_0) \cdot \sin(\varphi))^2\right)^2 \quad (15)$$

получается окончательный результат:

$$j_{n,k}(h, \varphi, \psi) = \frac{2\pi}{\left(1 + \frac{x_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{H}\right)}{\lambda}\right)} \cdot \frac{x_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{H}\right)}{\lambda \cdot k!} \cdot D(E_n) \times \exp\left(-\alpha \left(15 \cdot \left(1 - (\cos(\varphi_0) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\psi - \psi_0) + \sin(\varphi_0) \cdot \sin(\varphi))^2\right)^{\gamma}\right)\right), \quad (16)$$

где  $\varphi$  – географическая широта;  $\psi$  – географическая долгота;  $\varphi_0=82,07^{\circ} N$ ;  $\psi_0=114,04^{\circ} W$ ;  $\varphi_0=64,30^{\circ} S$ ;  $\psi_0=137,42^{\circ} W$ ;  $H=7,457$  км;  $h$  – высота (км).

Соответствующие результаты математического моделирования пространственного распределения вторичных космических лучей при минимальной солнечной активности, выполненного в пакете Matlab 6.5, представлены на рис. 2 – рис. 3.

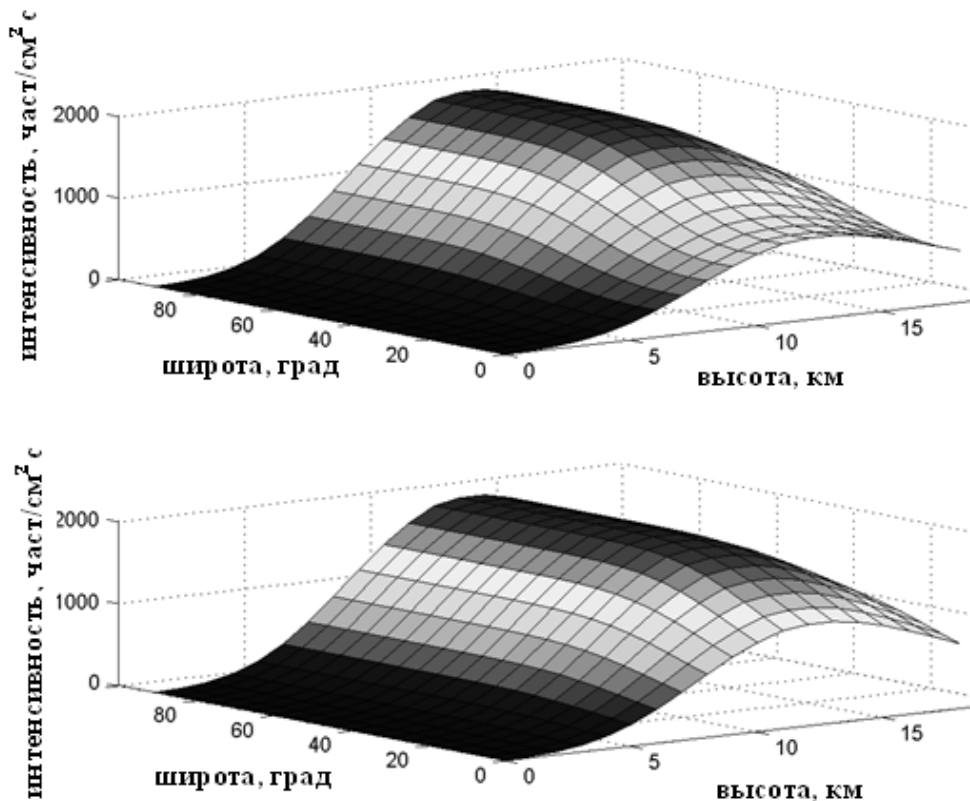


Рис. 2 Пространственное распределение вторичных нейтронов при минимальной солнечной активности в северном (верхний рисунок) и южном (нижний рисунок) полушариях

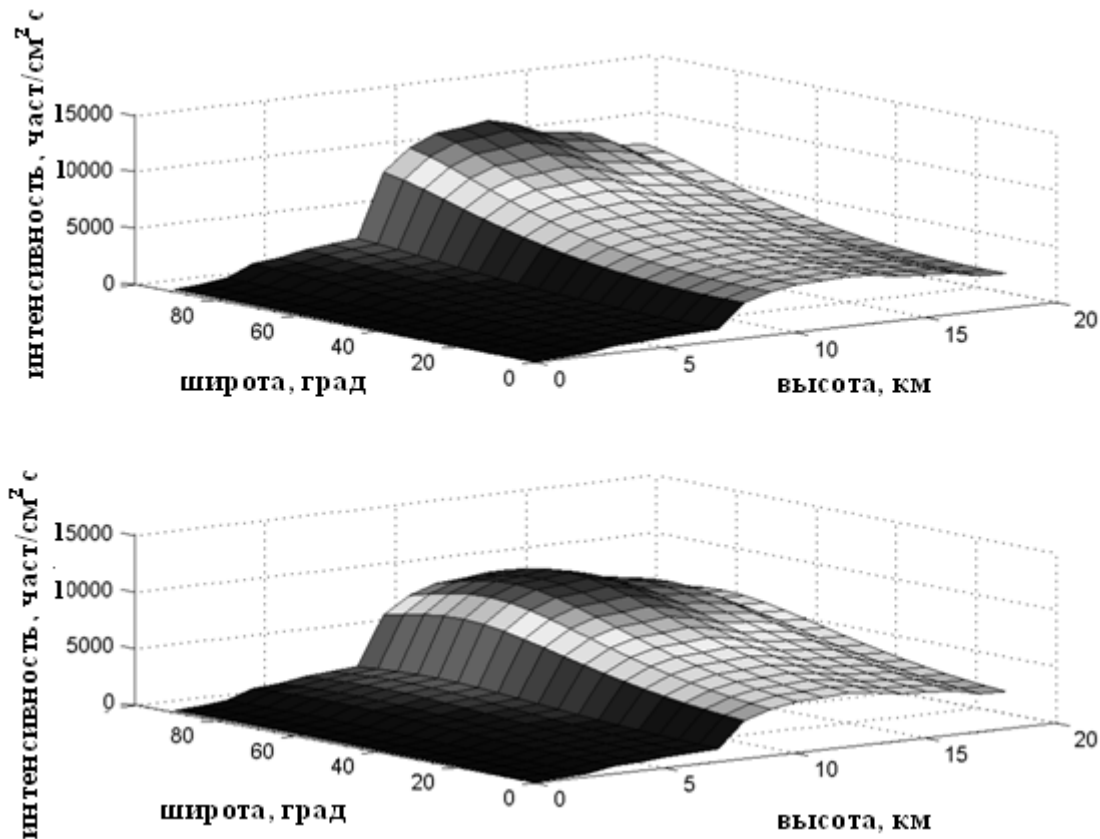


Рис 3 Пространственное распределение электронов при минимальной солнечной активности в северном (верхний рисунок) и южном (нижний рисунок) полушариях

Из рис. 2 видно, что «широтный эффект» наиболее ярко выражен в северном полушарии, где его амплитуда достигает 50%. В южном полушарии амплитуда «широтного эффекта» гораздо меньше – всего 10%. Вопреки утверждениям Л.И. Дормана (Л.И. Дорман, 1975), для вторичных электронов наблюдается значительный «широтный эффект» (рис. 3): электроны с малыми энергиями практически не проникают в область низких широт как в северном, так и в южном полушарии.

Нуклонный компонент можно регистрировать с помощью пропорциональных счетчиков, наполненных трехфтористым бором, обогащенным изотопом  $B^{10}$ , взаимодействие которого с нейтронами приводит к реакции:  $B_5^{10} + n_0^1 \rightarrow Li_3^7 + He_2^4$ . В результате этой реакции освобождается энергия около 2,5 МэВ, причем на долю  $\alpha$ -частицы приходится около 1,6 МэВ, а на долю ядра  $Li_3^7$  – 0,9 МэВ. Обе частицы разлетаются в противоположных направлениях и образуют при полном использовании пробега около 80000 пар ионов. Благодаря тому, что фтористый бор принадлежит к гасящим газам, счетчик работает стабильно при коэффициенте усиления, достигающем нескольких тысяч.

С 1990 года счетные трубки нейтронных мониторов заполняют газом  ${}^3\text{He}$  вместо  $\text{BF}_3$ .  ${}^3\text{He}$ -счетчики имеют более простую конструкцию.

Еще одним преимуществом  $^3\text{He}$  как счетного газа является то, что счетная трубка может работать на гораздо более высоком давлении газа и с напряжением менее 1500 В. При более высоком давлении в счетном газе может быть достигнута большая эффективность обнаружения в единице объема.

Хотя счетчики на основе реакций с трехфтористым бором являются наиболее эффективными для обнаружения тепловых нейтронов за счет обратной зависимости сечения взаимодействия от скорости, быстрые нейтроны могут быть обнаружены путем окружения счетных трубок замедляющими материалами, содержащими водород, например парафином или полиэтиленом. На рис. 4 представлен внешний вид нейтронного монитора.

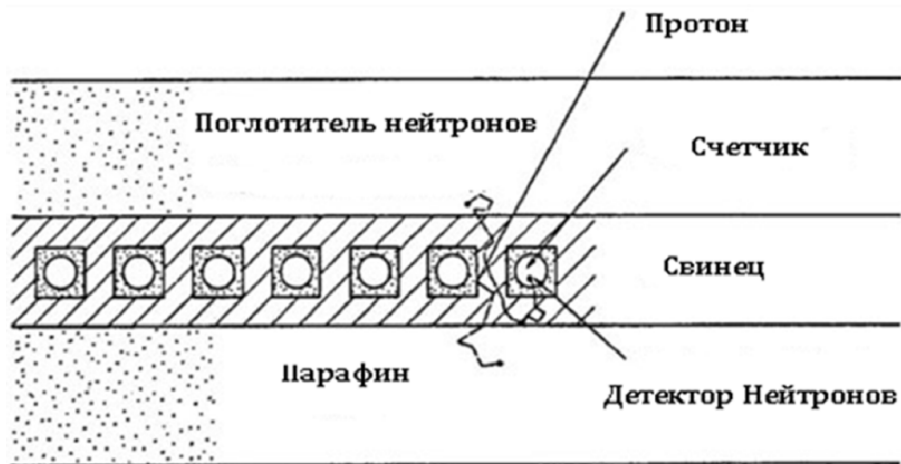


Рис. 4 Схематический вид нейтронного монитора

**Третья глава.** Третья глава посвящена исследованию вариаций космических лучей. Вторичные космические лучи, как и первичные, подвержены 11-летней солнечной модуляции. Наиболее ярко солнечная модуляция проявляется у вторичных нейтронов, т.к. нуклонный компонент обладает наибольшим широтным эффектом. Для ионизирующего компонента вторичных космических лучей эффект солнечной модуляции практически незаметен. Вторичные нейтроны, в отличие от первичных космических лучей, находятся в антикорреляции с солнечной активностью. Следовательно, во время солнечной вспышки интенсивность вторичных нейтронов резко возрастает. Это обусловлено следующими причинами. В результате рассеяния галактических космических лучей на магнитных неоднородностях большая часть первичного космического излучения не проникает в Солнечную систему, и спектр жесткостей  $D(R)$  претерпевает изменение. Геомагнитный порог в период максимума солнечной активности уменьшается, что открывает доступ малоэнергетичным частицам к поверхности Земли. Вероятность избежать взаимодействия при прохождении от уровня с давлением  $x$  до уровня с давлением  $x_0$  также увеличивается, т.к. возрастает длина пробега до поглощения. Для количественной оценки эффекта солнечной модуляции использован метод коэффициентов связи (Л.И. Дорман, 1975; А.В. Белов, Л.М. Байсултанова, Е.А. Ерошенко, 2004).

Как было упомянуто выше, солнечная модуляция вторичных нейтронов обусловлена вариациями первичного спектра жесткостей  $D(R)$ , геомагнитного порога и атмосферного давления. Для учета влияний этих вариаций Л.И. Дорманом (Л.И. Дорман, 1975) предложен метод переменных коэффициентов связи. При определении  $\delta j(R)/j(R)$  используются коэффициенты связи, включая первичный спектр, возмущенный 11-летними вариациями:

$$\frac{\delta j^i(R, x)}{j^i(R, x)} = \left[ \frac{\delta x}{x} - \delta R \omega^i(R, x) + \int_{R_k}^{\infty} \frac{\delta D(R)}{D(R)} \omega^i(R, x) dR \right]. \quad (17)$$

Если аппроксимировать энергетический спектр вариаций первичных космических лучей в виде прямоугольника:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta D(R)}{\delta R} &= -a, R \leq R_{\max} \\ &= 0, R \geq R_{\max} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

а вариации спектра геомагнитной жесткости в виде и проинтегрировать (16), то можно получить:

$$\frac{\delta j^i(R, x)}{j^i(R, x)} = \frac{\delta x}{x} - \delta R \omega^i(R, x) + \int_{R_k}^{\infty} \frac{\delta D(R)}{D(R)} \omega^i(R, x) dR \quad (19)$$

Результаты математического моделирования в программе Matlab 6.5 пространственного распределения вторичных нейтронов во время солнечной вспышки в мае 2007 г. представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что эффект солнечной модуляции для вторичных нейтронов наиболее ярко проявляется в области средних и высоких широт. При этом в южном полушарии «широтный эффект» выражен менее ярко, как и при минимальной солнечной активности. Эффект солнечной модуляции для ионизирующего компонента рассчитывается аналогично эффекту модуляции для нуклонного компонента, но, в отличие от нейтронов, интенсивность электронов во время солнечной вспышки возрастает всего на порядок.

**Четвертая глава.** В четвертой главе рассматриваются вопросы радиационной безопасности при межконтинентальных перелетах. Связь между интенсивностью нейтронов и мощностью поглощенной дозы находится следующим образом:

$$D = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot E \cdot N \cdot \sigma_i \cdot j(\varphi, \psi, h). \quad (20)$$

Для общеионизирующего компонента мощность поглощенной дозы будет

$$D = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot E / L \cdot N \cdot \sigma_i \cdot j(\varphi, \psi, h), \quad (21)$$

где  $D$  – мощность поглощенной дозы (мкГр/ч);  $\sigma_i$  – сечение взаимодействия;  $j_i$  – интенсивность  $i$ -го компонента;  $\varphi$ ,  $\phi$ ,  $h$  – географические широта, долгота и высота, соответственно;  $E$  – энергия частицы;  $E/L$  – линейные потери энергии.

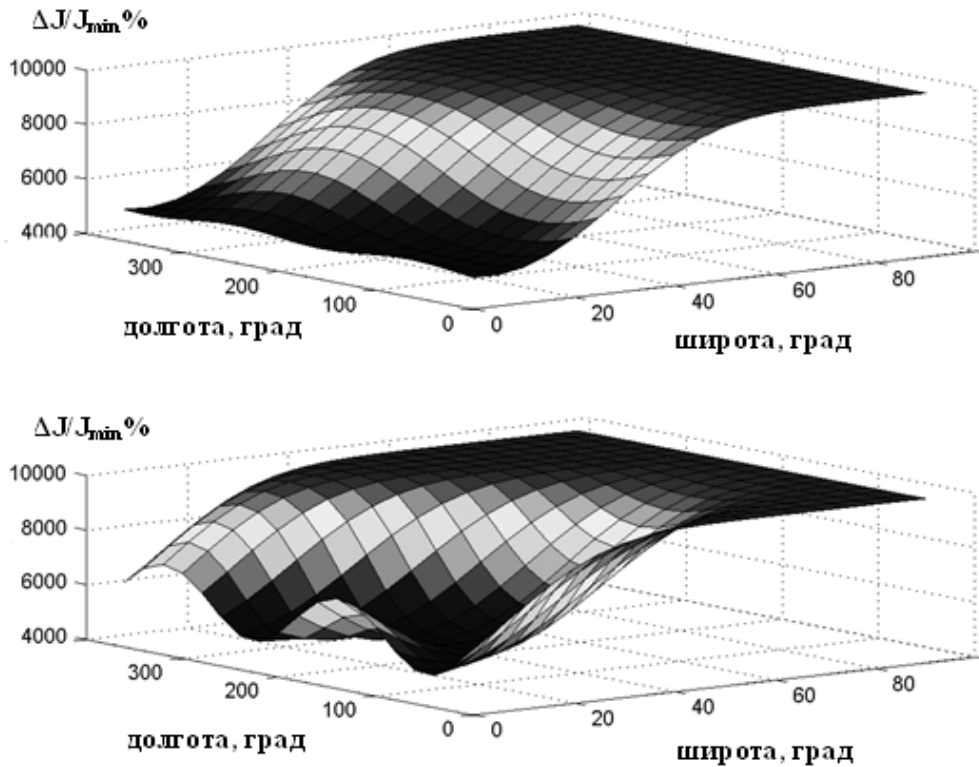


Рис. 5 Относительная вариации интенсивности (%) вторичных нейтронов при максимальной солнечной активности (вспышка в мае 2007 г.) в северном (верхний рисунок) и южном (нижний рисунок) полушарии

Эквивалентная доза  $H$  определяется как поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент  $k$  для данного вида излучения:

$$H = k \cdot D. \quad (22)$$

Зная пространственное распределение нейтронов, легко получить количественную оценку мощности радиационной дозы. Пространственное распределение мощности поглощенной дозы соответствует распределению вторичных нейтронов. На рис. 6 представлено высотное распределение эквивалентной дозы при минимальной и максимальной солнечной активности. Видно, что во время сильнейшей солнечной вспышки, которая произошла в мае 2007 г., эквивалентная доза превзошла на высоте 12 км ПДД в сотни раз. В период минимальной солнечной активности эквивалентная доза от нейтронов превышает ПДД всего в 1,5 – 2 раза. Ниже на рис. 7 представлены результаты математического моделирования пространственного распределения эквивалентной дозы при мини-

мальной и максимальной солнечной активности для северного и южного полушарий, выполненного в пакете Matlab 6.5.

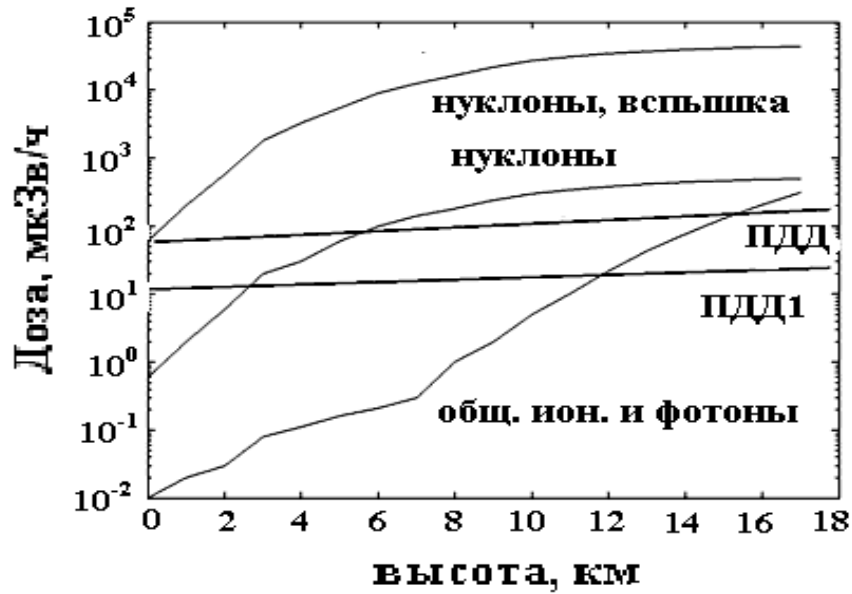


Рис. 6 Высотное распределение эквивалентной дозы для нуклонов и общеионизирующего компонента. ПДД соответствует 5,7 мкЗв/час. ПДД 1 (для беременных женщин) – 1 мкЗв/ч

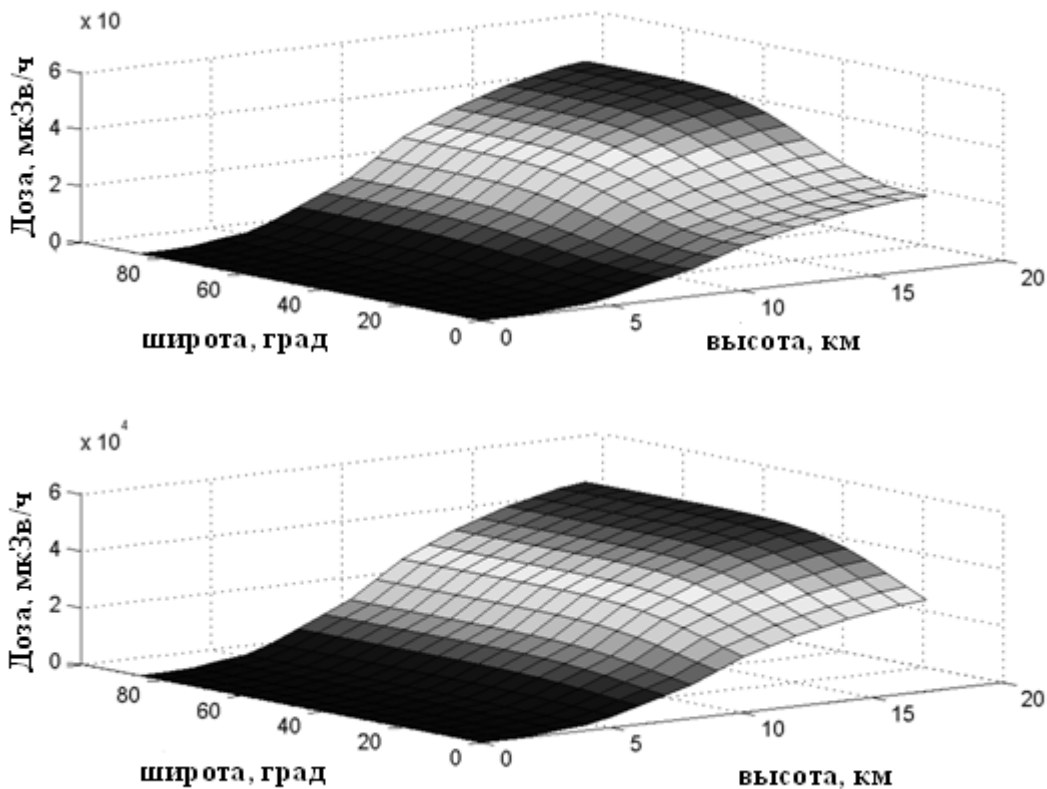


Рис. 7 Пространственное распределение эквивалентной дозы при минимальной солнечной активности в северном (верхний рисунок) и южном (нижний рисунок) полушариях



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан новый метод расчета интенсивности вторичных космических лучей на основе марковских процессов и коэффициентов связи.
2. Построено планетарное распределение интенсивности вторичных потоков космических лучей и биологической эквивалентной дозы облучения при минимальной и максимальной солнечной активности.
3. Показано, что вторичные нейтроны вносят наибольший вклад в естественный радиационный фон Земли в полярных широтах ( $60-90^\circ N$ ,  $65-90^\circ - S$ ).
4. Предложен метод оценки вклада нуклонного компонента в естественный радиационный фон планеты для высоких широт на разных высотах в режиме реального времени, используя имеющуюся в настоящее время наземную сеть нейтронных мониторов.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах ВАК

1. Салагаева, А.В. Планетарное распределение вторичных нейтронов и радиационная безопасность при межконтинентальных перелетах / В.М. Владимиров, Л.В. Границкий, А.В. Салагаева, Р.Г. Хлебопрос // Инженерная экология. – 2009. – № 4. – С. 33–48.
2. Салагаева, А.В. Предотвращение воздействия глобального потепления в результате изменения альбедо / А.В. Салагаева, Р.Г. Хлебопрос // Инженерная экология. – 2009. – №4. – С. 8–18.

### Прочие публикации

3. Салагаева, А.В. Вторичные частицы в протонной терапии / Н.Н. Гурова, А.В. Салагаева, Р.Г. Хлебопрос // Материалы VII Международной конференции Ядерная и радиационная физика. – 2009. – С. 200–202
4. Салагаева, А.В. Планетарное распределение вторичных космических лучей / А.В. Салагаева // Материалы XI Междунар. научной конф. Решетневские чтения. – 2007. – С. 294–295.
5. Салагаева, А.В. Планетарное распределение вторичных космических лучей / А.В. Салагаева // Материалы XXXVI научной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2007. – С.45–49.
6. Салагаева, А.В. Планетарное распределение вторичных космических лучей / А.В. Салагаева // Материалы конференции молодых ученых. – 2009 – С. 47–52.
7. Салагаева, А.В. Планетарное распределение вторичных нейтронов / А.В. Салагаева // Материалы пятого северного социально–экологического конгресса. – 2009. – С. 10–14.
8. Салагаева, А.В. Альтернативные решения проблемы глобального изменения климата / А.В. Салагаева, Р.Г. Хлебопрос // Материалы Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца. – 2009, – С. 8–12.

9. Салагаева, А.В. Вторичные сверхбыстрые частицы в протонной терапии / А.В. Салагаева // Материалы Всероссийской медицинской конференции. – 2009. – С. 204 – 206.
10. Salagaeva, A.V. Spatial distribution of secondary neutrons / Graniczkiy L.V., Khlebopros R.G., Salagaeva A.V., Vladimirov V.M. // Доклад на Международном симпозиуме по нанотехнологиям и освоению космического пространства. – 2009. – С. 100–104.
11. Салагаева, А.В. Влияние солнечной активности на генерацию импульсов радиоволн земной коры / Забродин С. М., Перетокин С. А., Салагаева А. В., Сибгатулин В.Г. // Тезисы доклада на симпозиуме с международным участием конференции "Сложные системы в экстремальных условиях" – 2010. – С. 25–26.

Бумага офсетная. Печать плоская. Тираж ??? экз.

Отпечатано в типографии «ГОРОД».  
г. Красноярск, ул. 2-ая Брянская, 59/6

