

Учреждение Российской академии наук  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

На правах рукописи

Нестерёнок Александр Владимирович  
КОСМОГЕННЫЙ РАДИОУГЛЕРОД В ПОЛЯРНЫХ ЛЬДАХ

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН и ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете.

Научный руководитель доктор физ.-мат. наук, проф. В.О. Найденов  
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты доктор физ.-мат. наук, проф. О.М. Распопов  
(Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Санкт-Петербург)

доктор физ.-мат. наук, с.н.с. М.Г. Огурцов  
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург)

Ведущая организация Учреждение Российской академии наук Главная  
(Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Защита состоится «29» декабря 2011 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан «28» ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_

Красильщиков А.М.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Начало систематического исследования содержания космогенных нуклидов в окружающей среде положили работы американского ученого Уилларда Либби, который в 1960 году был удостоен Нобелевской премии за разработку радиоуглеродного метода датирования. Возможность приложения исследований космогенных радионуклидов для решения задач астрофизики высказана в работе [1]. Применение ускорительной масс-спектрометрии позволило существенно повысить чувствительность измерений и расширить границы анализа содержания космогенных нуклидов [2]. Данные по космогенному радионуклиду  $^{14}\text{C}$  в кольцах деревьев совместно с данными по  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в полярных льдах являются хрониками прошлых изменений интенсивности космических лучей, солнечной активности, магнитного поля Земли и климатических условий [3]. В настоящей работе проводится детальное исследование процессов образования «in situ» и накопления в полярных льдах космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$ . Проводится анализ экспериментальных данных по  $^{14}\text{C}$  в образцах льда гренландской и антарктических скважин. В работе рассматривается возможность использования данных по  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах для оценки уровня солнечной активности и интенсивности высокоэнергичных космических лучей в периоды времени в прошлом.

### Цель и задачи работы

1. Статистическое моделирование распространения космического излучения в атмосфере Земли и в полярных льдах в условиях высоких геомагнитных широт и среднего уровня солнечной активности. Определение высотной зависимости потоков и энергетических спектров нейтронов и протонов в атмосфере и во льдах.
2. Определение скорости образования  $^{14}\text{C}$  во льду на основе рассчитанных энергетических спектров частиц ядерно-активного компонента космических лучей и набора данных по сечениям ядерных реакций.
3. Расчет концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в образцах льда для скважины GISP2 в Гренландии и скважин Тейлор Доум и Восток в Антарктиде. Интерпретация экспериментальных данных.
4. Построение модели накопления космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах, в которой учитываются процессы образования нуклида космическим излучением и процессы потерь на стадии льдообразования.

## Научная новизна

1. Впервые в рамках решения проблемы накопления космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах проведено совместное рассмотрение задач распространения космического излучения в атмосфере Земли и в полярных льдах.
2. Впервые получено, что экспериментальные значения концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  для образцов льда гренландской скважины GISP2 систематически меньше теоретически рассчитанных значений. Подобный результат был получен ранее в работе [4] для образцов льда антарктических скважин. Таким образом, дефицит космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  является общей характеристикой образцов льда гренландской и антарктических скважин. В работе рассматривается влияние климатических факторов на степень сохранения в зернах фирна космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$ , образованного «in situ».
3. Впервые показано, что значительная часть концентрации  $^{14}\text{C}$  в образцах льда антарктических скважин обусловлена образованием радиоуглерода мюонами космических лучей на больших глубинах.

## Достоверность научных результатов

Достоверность результатов обеспечена применением последних версий вычислительных программ для моделирования процессов распространения и взаимодействия элементарных частиц с веществом. Задачи распространения космического излучения в атмосфере Земли и в полярных льдах рассматриваются в работе совместно. Согласие результатов расчетов потоков частиц в атмосфере с данными измерений является косвенным подтверждением справедливости результатов расчетов для потоков частиц во льдах, где аналогичное сравнение невозможно вследствие отсутствия экспериментальных данных.

## Научная и практическая ценность работы

В работе представлены результаты статистического моделирования процессов распространения космического излучения в атмосфере Земли и в полярных льдах. Полученные энергетические спектры частиц ядерно-активного компонента космических лучей могут быть использованы для расчета скоростей образования космогенных нуклидов как в атмосфере, так и в полярных льдах. На основе рассчитанных энергетических спектров частиц и функций возбуждения определена скорость образования  $^{14}\text{C}$  во льдах.

В расчетах концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в образцах льда рассмотрено образование радиоуглерода во льду в реакциях, вызванных частицами ядерно-активного и мюонного компонентов космических лучей. Полученные

результаты имеют значение для теоретических расчетов концентрации  $^{14}\text{C}$  и интерпретации экспериментальных данных.

В работе рассматривается влияние метаморфозных и диффузионных процессов в слое фирна, покрывающем ледник, на уровень концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в образцах фирна и льда. При интерпретации экспериментальных данных по концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в образцах льда периода голоцена гренландской скважины GISP2 рассматривается возможность исключения климатических факторов. В этом случае основным параметром, определяющим относительные вариации концентрации  $^{14}\text{C}$  во льдах, является уровень солнечной активности.

Показано, что значительная часть концентрации  $^{14}\text{C}$  в образцах льда антарктических скважин обусловлена образованием радиоуглерода мюонами космических лучей. Это открывает новые возможности использования данных по  $^{14}\text{C}$  во льдах для решения таких задач, как оценка значений потока мюонов космических лучей в прошлом.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Определение высотных зависимостей и энергетических спектров частиц космических лучей в атмосфере Земли и в полярных льдах с помощью статистического моделирования процессов распространения космического излучения для условий высоких геомагнитных широт и среднего уровня солнечной активности.
2. Определение скорости образования  $^{14}\text{C}$  во льду на основе рассчитанных энергетических спектров частиц ядерно-активного компонента космических лучей.
3. Теоретический расчет концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в образцах льда гренландской скважины GISP2. Построение качественной модели накопления  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах.
4. Теоретический расчет концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в образцах льда антарктических скважин Восток и Тейлор Доум. Объяснение особенностей экспериментальных данных по концентрации  $^{14}\text{C}$  глубинным образованием радионуклида мюонами космических лучей.

### **Апробация работы**

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 2008 по 2011 год и изложены в четырех статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты работы были представлены на конференциях:

1. Конференция по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб», Россия, Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2009, доклад «Радиоуглерод в антарктических льдах: образование мюонной

компонентой космических лучей на больших глубинах», Нестеренок А.В., Найденов В.О.

2. 31 Всероссийская конференция по космическим лучам, Россия, Москва, НИИЯФ МГУ, 2010, доклад «Механизмы сохранения космогенного  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах», Нестеренок А.В., Найденов В.О.

3. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2011», Россия, Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2011, доклад «Космогенный радиоуглерод в полярных льдах как метод исследования солнечной активности», Нестеренок А.В., Найденов В.О.

Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на семинарах СПбГПУ и ААНИИ.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 91 страницу печатного текста, 18 рисунков и список литературы, включающий 128 наименований.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении к диссертации (глава 1) показана актуальность темы диссертации, дано описание процессов образования и накопления космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах. Сформулированы цель и задачи работы.

В главе 2 приведены результаты статистического моделирования распространения космического излучения в атмосфере Земли и в полярных льдах. Результаты этого исследования опубликованы в работах [1а,2а]. Параграф 2.1 носит вводный характер. Дана краткая характеристика основных подходов к проблеме расчетов потоков частиц космического излучения в атмосфере Земли и в веществе на поверхности Земли.

В параграфе 2.2 дано описание численных расчетов. Численный код для моделирования распространения частиц космического излучения в веществе был написан на основе пакета программ GEANT4 9.4 [5]. В моделировании электромагнитных взаимодействий использовался стандартный набор процессов – ионизация, тормозное излучение, образование электрон-позитронных пар, аннигиляция и другие [6]. В моделировании учитывались фотоядерные и электроядерные процессы, а также процессы распада частиц. Для описания процессов неупругого рассеяния адронов на ядрах использовались низко- и высоко-энергетические модели, основанные на параметризации экспериментальных данных. Для моделирования процессов неупругого рассеяния нуклонов и мезонов на ядрах в диапазоне энергий до 6 ГэВ использовалась модель внутриядерного каскада Бертини [6]. Неупругие взаимодействия легких ядер описывались с помощью модели внутриядерного бинарного каскада [6]. Для описания процессов взаимодействия нейтронов с ядрами использовались модели, которые основаны на данных по

сечениям взаимодействий из библиотек ENDF-B VI, JENDL [7,8] и других для энергий нейтронов меньше 20 МэВ, и данных JENDL/HE для энергий от 20 МэВ до 3 ГэВ. Плотность воздуха в зависимости от высоты полагалась равной средней плотности воздуха для высоких географических широт согласно данным COSPAR [9]. Статистическое моделирование процессов рождения и распространения каскада вторичных частиц проводилось для протонов и ядер гелия первичных космических лучей. Использовалось выражение для дифференциального потока частиц первичных космических лучей в околоземном пространстве, полученное в работе [10]. Параметр солнечной модуляции был выбран равным 0,69 ГВ – среднему значению за период второй половины XX века согласно данным [10]. Энергия первичных частиц определялась согласно дифференциальному энергетическому спектру в диапазоне энергий от 100 МэВ/нуклон до 1000 ГэВ/нуклон. Геомагнитное обрезание дифференциального энергетического спектра космических лучей не учитывалось, так как в диссертационной работе рассматриваются процессы образования космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах на высоких геомагнитных широтах. Расчеты проводились на базе Санкт-Петербургского филиала Межведомственного Суперкомпьютерного Центра РАН (СПбФ МСЦ РАН).

В параграфе 2.3 представлены результаты расчетов всенаправленных интегральных и дифференциальных потоков протонов и высокоэнергичных нейтронов ядерно-активного компонента космических лучей в атмосфере Земли и во льдах. Расчетное значение длины ослабления всенаправленного интегрального потока высокоэнергичных нейтронов для высот до 3,5 км составило  $134 \text{ г/см}^2$ , что согласуется с результатами измерений [11]. В параграфе исследуется относительный вклад вторичных каскадов, инициированных ядрами первичных космических лучей с зарядовыми числами  $Z \geq 2$ , в потоки протонов и высокоэнергичных нейтронов в атмосфере Земли. Потоки частиц космического излучения в атмосфере, инициированные ядрами  $Z \geq 2$  галактических космических лучей, оценивались на основе данных, полученных для ядер  $^4\text{He}$  галактических космических лучей [1а,2а].

На Рис. 1 приведены результаты наших расчетов всенаправленного дифференциального потока нейтронов на уровне моря. Приводятся также данные измерений [11] и результаты расчетов [12]. В области энергий нейтронов 10-300 МэВ наблюдается хорошее согласие расчетных данных с данными измерений [11] – в пределах 30%. Заметим, что согласно оценкам [11], ошибка экспериментальных данных в области энергий нейтронов более 150 МэВ составляет около 10-15% и меньше в области меньших энергий. Наблюдается также хорошее согласие результатов расчетов с результатами численного моделирования из работы [12]. Численные расчеты в исследовании [12] проводились с помощью программы RHITS, использовались данные по сечениям JENDL/HE. В диссертации обсуждаются возможные причины расхождения экспериментального и расчетных спектров в области более низких и более высоких энергий [1а,2а].

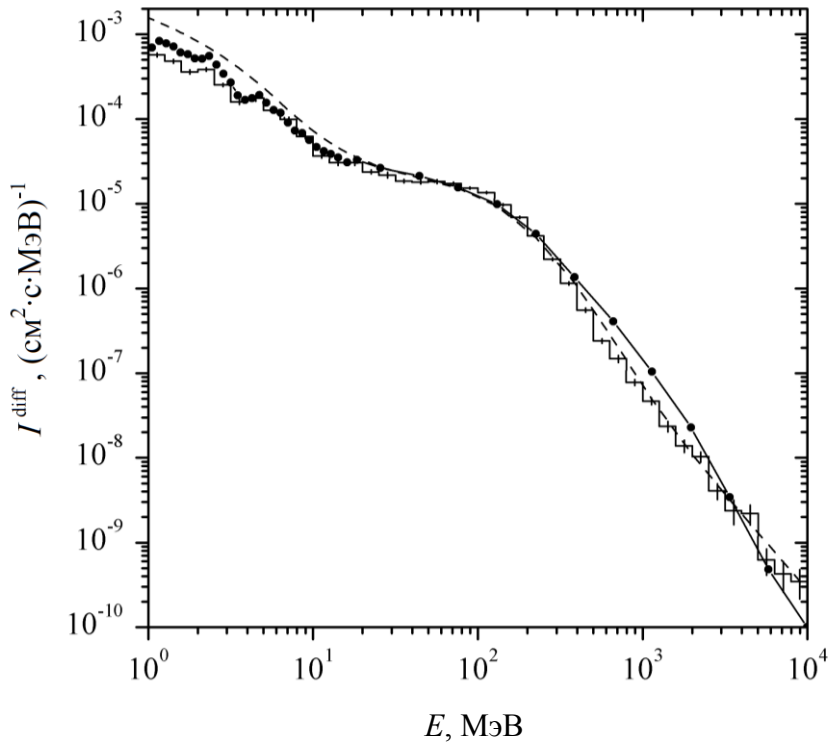


Рис. 1. Всенаправленный дифференциальный поток нейтронов. Ломаная линия – результаты расчетов, вертикальные штрихи – статистические ошибки [1a,2a]. Точки – данные измерений [11], штриховая линия – результаты численного моделирования из работы [12].

Глава 3 посвящена расчету скорости образования космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах в реакциях, вызванных частицами ядерно-активного и мюонного компонентов космического излучения. Результаты этого исследования опубликованы в работе [2a].

В параграфе 3.1 рассматривается образование  $^{14}\text{C}$  частицами ядерно-активного компонента космических лучей во льдах на уровне моря. Основной вклад в образование радиоуглерода этим компонентом вносит реакция скалывания ядер кислорода нейтронами  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$ , где X обозначает продукты реакции. На Рис. 2 приведены экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов для функции возбуждения реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$ : круги – экспериментальные значения сечений [13], треугольники – сечения, предоставленные доктором Робертом Риди из Университета Нью Мексико в США [14], сплошная кривая – сечения, предоставленные доктором Рольфом Михелем из Университета Ганновера в Германии [15]. Штриховой и штрихпунктирной линиями на Рис. 2 обозначены функции возбуждения, полученные в результате численного моделирования реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$  с помощью пакета программ GEANT4 9.4 [2a]. Для описания неупругого



взаимодействия нейтронов с ядрами использовались данные полных сечений JENDL/HE [8] и две модели внутриядерного каскада – модель каскада Бертини (штриховая линия на Рис. 2) и модель бинарного каскада (штрихпунктирная линия). Отличие моделей заключается в описании адрон-адронных взаимодействий частиц [6]. Статистические ошибки расчетных значений сечений не превышают 0,3 мбарн ( $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ). Данные по сечениям, предоставленные Робертом Риди, а также функция возбуждения реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$ , полученная в результате численного моделирования внутриядерного бинарного каскада, приводят к результатам, наиболее хорошо согласующимся с опубликованными экспериментальными данными по скорости образования  $^{14}\text{C}$  в кварце [2a].

В Таблице 1 приведены значения скорости образования  $^{14}\text{C}$  в приповерхностном слое льда на уровне моря (толщина атмосферы  $1034 \text{ г/см}^2$ ) [2a]. Результаты приведены для расчетных энергетических спектров протонов и нейтронов и различных функций возбуждения реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$ .

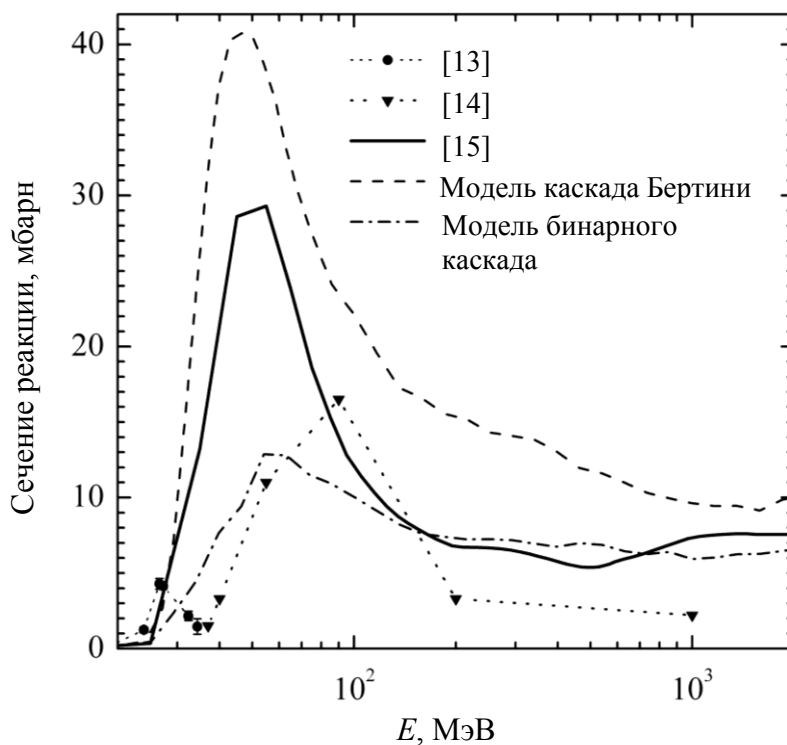


Рис. 2. Функции возбуждения реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$ .

Таблица 1. Скорость образования  $^{14}\text{C}$  в приповерхностном слое льда на уровне моря.

Ядерная реакция	Данные по сечениям	Скорость образования, ат/г/год
$^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$	[13], Р. Риди	26
	Р. Михель	39
	Модель каскада Бертини	66
	Модель бинарного каскада	26
$^{16}\text{O}(p,3p)^{14}\text{C}$	[19,20]	0,6

В работе [2a] было получено, что длина, на которой скорость образования радионуклида  $^{14}\text{C}$  во льдах частицами ядерно-активного компонента космических лучей уменьшается в  $e \approx 2,72$  раз, составляет  $130 \text{ г/см}^2$ . Это меньше значений  $150\text{-}160 \text{ г/см}^2$ , которые использовались в работах, посвященных анализу экспериментальных данных по  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах [4,16,17,18] и др. Точное определение длины ослабления потока частиц ядерно-активного компонента космических лучей существенно для расчета концентрации  $^{14}\text{C}$  в областях абляции ледника [2a].

В параграфе 3.1 представлено энергетическое распределение ядер  $^{14}\text{C}$ , полученное в результате численного моделирования внутриядерного бинарного каскада для реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$  [2a]. Обсуждается вопрос химических реакций с участием энергичного атома  $^{14}\text{C}$ , приводятся опубликованные в литературе экспериментальные данные по относительному содержанию продуктов «горячей» химии энергичного атома углерода во льду. Энергетическое распределение ядер  $^{14}\text{C}$  может быть использовано для моделирования торможения энергичного иона  $^{14}\text{C}$  в среде и химических процессов с его участием.

Параграф 3.2 посвящен описанию расчетов скорости образования  $^{14}\text{C}$  мюонами космических лучей во льдах. Используются данные по потокам мюонов и данные сечений реакций из работ [21,22,23]. Характерная глубина образования радионуклида в реакциях захвата отрицательных мюонов составляет около  $1000 \text{ г/см}^2$ ; в реакциях, индуцированных высокоэнергичными мюонами – в несколько раз больше. Образование радионуклида происходит главным образом в верхнем слое ледника высотой несколько десятков метров.

В параграфе 3.3 описан метод расчета скоростей образования  $^{14}\text{C}$  во льдах для заданной высоты над уровнем моря, используются данные работ [1a,24,25] и др. Показано, что значения скорости образования  $^{14}\text{C}$  во льду ядерно-активной компонентой космического излучения для полярных станций GISP2 в Гренландии, Восток и Тейлор Доум в Антарктиде в два раза больше, чем это опубликовано в работах [4,17,18].

В главе 4 проводится анализ данных по  $^{14}\text{C}$  в образцах льда гренландской скважины GISP2 [3а,5а]. Экспериментальные данные опубликованы в работах [17,18]. Возраст рассматриваемых образцов льда не превышает 11000 лет – начала эпохи голоцена. В параграфе 4.1 сделано введение, где обоснована целесообразность пересмотра результатов и выводов, сделанных в работах [17,18]. Учет образования радиоуглерода мюонным компонентом космических лучей, а также использование более точного значения скорости образования ядерно-активным компонентом, приводит к скорости образования  $^{14}\text{C}$  во льдах, которое более чем в два раза превышает значение скорости образования из работ [17,18].

Описание экспериментальных данных [17,18] дано в параграфе 4.2.

В параграфе 4.2 для рассматриваемых образцов льда приводятся результаты расчетов концентрации «атмосферного»  $^{14}\text{C}$ , заключенного в пузырьках воздуха во льду. Концентрация «атмосферного»  $^{14}\text{C}$  определялась согласно выражению [3а]:

$$n_{\text{атм}} = V \cdot \frac{p_{\text{CO}_2}}{10^6} \cdot \frac{N_A}{V_M} \cdot \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right) \cdot (1 + \Delta^{14}\text{C}) \cdot \exp(-\lambda t_{\text{в}}),$$

где  $V$  – объем воздуха на единицу массы льда при нормальных условиях [17,18],  $p_{\text{CO}_2}$  – объемное содержание углекислого газа в воздухе в единицах ppmv в период времени, соответствующий возрасту образца льда,  $N_A$  и  $V_M$  – число Авогадро и молярный объем, соответственно,  $\lambda$  – постоянная распада радиоуглерода,  $\lambda = 1/8270$  лет $^{-1}$ ,  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  – «стандартное» отношение концентраций изотопов углерода в воздухе,  $t_{\text{в}}$  – возраст воздуха в образце льда, параметр  $\Delta^{14}\text{C}$  характеризует отклонение содержания  $^{14}\text{C}$  в атмосфере Земли в прошлом от «стандартного». Размерность концентрации  $n_{\text{атм}}$  – атом/г.

Экспериментальные значения концентрации  $^{14}\text{C}$ , образованного в образцах льда «in situ», определялись следующим образом [3а]:

$$n_{\text{in situ, эксп}} = n_{\text{эксп}} - n_{\text{атм}} - n_{\text{втор}},$$

где  $n_{\text{эксп}}$  – экспериментально измеренные значения концентрации  $^{14}\text{C}$  [17,18],  $n_{\text{втор}}$  – малая поправка, вызванная наличием некоторого количества  $^{14}\text{C}$ , образованного во время хранения образцов льда [18].

В параграфе 4.2 приводятся результаты расчетов концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  «in situ» на основе данных по потокам частиц вторичного космического излучения и сечений реакций образования. Концентрация радионуклида  $^{14}\text{C}$  «in situ» во льдах на глубине  $z_0$  равна:

$$n_{\text{in situ, теор}}(z_0) = \int_0^{t_0} dt P[z(t)] \cdot \exp[-\lambda(t_0 - t)],$$

где  $t_0$  – возраст льда на глубине  $z_0$ ,  $z(t)$  – зависимость от времени толщины льда над пробным слоем,  $z(0) = 0$ ,  $P(z)$  – скорость образования радионуклида на глубине  $z$ . Для рассматриваемых образцов льда скважины GISP2 выполняется условие  $z_0 \gg \Lambda$  и  $s\rho_i \gg \lambda\Lambda$ , где  $\Lambda \approx 1000$  г/см<sup>2</sup> – глубина образования радионуклида,  $s$  – средняя скорость аккумуляции льда в эквивалентных см льда в год,  $\rho_i$  – плотность льда. В этом случае для концентрации радионуклида <sup>14</sup>C «in situ» во льдах на глубине  $z_0$  имеем [3а,4а]:

$$n_{in situ, теор}(z_0) = Q \frac{\exp(-\lambda t_0)}{s\rho_i}, \quad Q = \int_0^{\infty} dz P(z),$$

где  $Q$  – интегральная скорость образования радионуклида космическим излучением во льдах на заданной высоте, единица измерения  $Q$  – атом/см<sup>2</sup>/год,  $s$  – средняя скорость аккумуляции льда в период времени, соответствующий возрасту образца льда. В расчетах использовались данные по скорости аккумуляции льда  $s$  из работы [26].

В Таблице 2 приведены значения интегральных скоростей образования <sup>14</sup>C во льду различными компонентами космического излучения для высоты полярной станции GISP2;  $Q_n$  – в реакциях, вызванных частицами ядерно-активного компонента космических лучей,  $Q_{\mu^-}$  – в реакциях захвата отрицательных мюонов,  $Q_{\mu f}$  – в реакциях, индуцированных высокоэнергичными мюонами. Значения параметров  $Q$  соответствуют условиям высоких геомагнитных широт и среднему уровню солнечной активности. Для мюонного компонента космических лучей погрешности скоростей образования определялись на основе ошибок сечений реакций образования и потоков частиц. Для ядерно-активного компонента космических лучей погрешность скорости образования оценивалась исходя из величины расхождения расчетов и скорости образования во льдах, полученной на основе опубликованных экспериментальных значений скорости образования радиоуглерода в кварце [2а].

Таблица 2. Интегральные скорости образования <sup>14</sup>C во льдах

Станция	$Q_n$	$Q_{\mu^-}$	$Q_{\mu f}$	$Q_{\Sigma}$
	10 <sup>3</sup> атом/см <sup>2</sup> /год			
GISP2, Гренландия	54±10	33±9	3,2±2,1	90±14

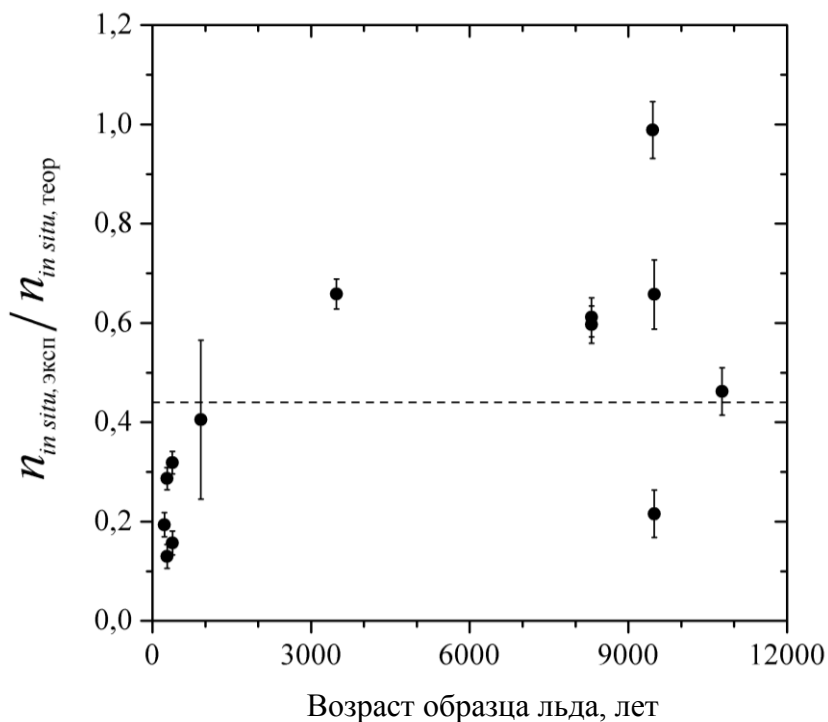


Рис. 3. Отношение экспериментальных данных по концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» к расчетным значениям для образцов льда гренландского ядра GISP2.

На Рис. 3 представлены значения отношения  $n_{in\ situ, \text{эксп}} / n_{in\ situ, \text{теор}}$ . Указанные ошибки соответствуют ошибкам экспериментальных значений концентрации  $^{14}\text{C}$  без учета погрешности расчетов; вклад погрешности расчетов в неопределенность отношения носит систематический характер и составляет около 15-20%. Экспериментальные значения концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда систематически меньше значений, предсказываемых теорией. Штриховая линия на рисунке показывает среднее значение отношения около  $0,4 \pm 0,1$ . В условиях низких температур ледник покрыт слоем фирна – зернистым и частично перекристаллизованным многолетним снегом. В качестве основной причины наблюдаемого дефицита концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда рассматриваются процессы потерь химических соединений, содержащих  $^{14}\text{C}$ , зернами фирна на стадии льдообразования. Предложена простая модель накопления  $^{14}\text{C}$  «in situ» во льдах, учитывающая потери  $^{14}\text{C}$  на стадии льдообразования.

Параграф 4.3 посвящен проблеме потерь содержащих  $^{14}\text{C}$  химических соединений зернами фирна. На основе имеющихся в литературе данных по коэффициентам диффузии газов во льдах впервые показано, что характерные времена диффузии газов в ледяных крупинках фирна меньше времени льдообразования [3а]. Обсуждается роль процессов метаморфизма фирновых зерен в дефиците  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда – в результате циклов сублимации и конденсации водяного пара

происходит высвобождение летучих химических соединений, образовавшихся и содержащихся в крупинках льда. Сделан вывод, что дефицит концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  «in situ» во льдах является закономерным результатом процессов метаморфизма фирновых зерен и диффузии содержащих  $^{14}\text{C}$  химических соединений.

В параграфе 4.4 обсуждаются астрофизические и геофизические факторы, которые оказывают влияние на уровень концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда. Определяющие факторы можно разделить на две группы: параметры, контролирующие скорость накопления радиоуглерода во льдах – уровень солнечной активности, геомагнитное поле, скорость аккумуляции льда, а также параметры, от которых зависит степень сохранения содержащих  $^{14}\text{C}$  химических соединений в зернах фирна – климатические условия. Приведены оценки степени влияния различных факторов на значения концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в полярных льдах. Эпоха голоцена является периодом относительно стабильных климатических условий в сравнении с предшествующими геохронологическими периодами [27]. Рассматривается возможность исключения климатических факторов при интерпретации данных по концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда периода голоцена. Сделан вывод, что основным параметром, определяющим относительные вариации концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах гренландского льда периода голоцена является уровень солнечной активности [5a].

В главе 5 проводится анализ данных по концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда антарктических скважин Восток и Тейлор Доум, опубликованных в работе [4]. Результаты этого исследования опубликованы в работах [4a,6a]. Параграф 5.1 посвящен введению, где кратко изложена основная идея расчетов.

В параграфе 5.2 дано описание экспериментальных данных [4].

В параграфе 5.3 представлены результаты расчетов концентрации  $^{14}\text{C}$ , образованного космическим излучением в образцах льда. Показано, что значения концентрации, предсказываемые теорией, много больше экспериментальных значений. Это означает, что космогенный радионуклид  $^{14}\text{C}$  «in situ» практически полностью теряется зернами фирна в результате процессов метаморфизма и диффузии. Аналогичный вывод сделан в работе [4].

Параграф 5.4 посвящен расчету концентрации  $^{14}\text{C}$ , который был образован космическим излучением на глубинах, превышающих толщину фирнового слоя. Образование  $^{14}\text{C}$  «in situ» во льдах на таких глубинах происходит в реакциях, вызванных мюонами космических лучей. Какие-либо потери радиоуглерода льдом на таких глубинах, за исключением радиоактивного распада, невозможны.

Концентрация космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  «in situ», который был образован космическим излучением в образцах льда на глубинах, превышающих толщину фирнового слоя, определялась по формуле:

$$n(z_0) = \exp(-\lambda t_0) \cdot \int_{z_c}^{z_0} dz \cdot P(z) \cdot \frac{dt(z)}{dz} \cdot \exp[\lambda t(z)],$$

где  $z_0$  – глубина образца льда,  $z_c$  – толщина слоя фирна в период времени, соответствующий возрасту образца,  $t(z)$  – функция, обратная к функции зависимости глубины пробного слоя льда от времени  $z(t)$ . Величина параметра  $z_c$  определялась с учетом изменения климатических условий – температуры окружающей среды и скорости аккумуляции льда – в периоды времени в прошлом, соответствующие возрасту образцов льда [4а]. В расчетах использовалась стационарная модель течения ледника [28].

На Рис. 4 представлены результаты расчетов концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  «in situ» совместно с экспериментальными данными [4] для образцов льда скважины Восток. Во всех данных по концентрации  $^{14}\text{C}$  сделана поправка на радиоактивный распад. Расчетные значения концентрации  $^{14}\text{C}$ , образованного космическим излучением на больших глубинах, не превышают в пределах ошибок экспериментальные данные.

Поток мюонов во льдах не чувствителен к возможным изменениям среднего атмосферного давления и уровня солнечной активности, однако чувствителен к изменениям потока высокоэнергичных частиц галактических космических лучей. Основной вклад в неопределенность расчетов вносят ошибки сечений реакций образования радионуклида и современного потока мюонов. Исследования содержания космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  во льдах антарктических скважин позволят делать оценки значений потока мюонов космических лучей в периоды времени в прошлом.

В параграфе 5.5 обсуждаются особенности экспериментальных данных по концентрации космогенных радионуклидов  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в образцах фирна и льда скважины Восток. Высказано предположение, что высокая степень дефицита концентрации  $^{14}\text{C}$  «in situ» в образцах льда и особенности распределения концентрации  $^{36}\text{Cl}$  в верхнем слое фирна являются следствиями длительности процессов льдообразования.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации, показана научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

Положения, выносимые на защиту, под номерами 1, 3, 4 являются результатом работы, выполненной во время обучения в аспирантуре Физико-технического института, положение 2 – во время обучения и работы в СПбГПУ.

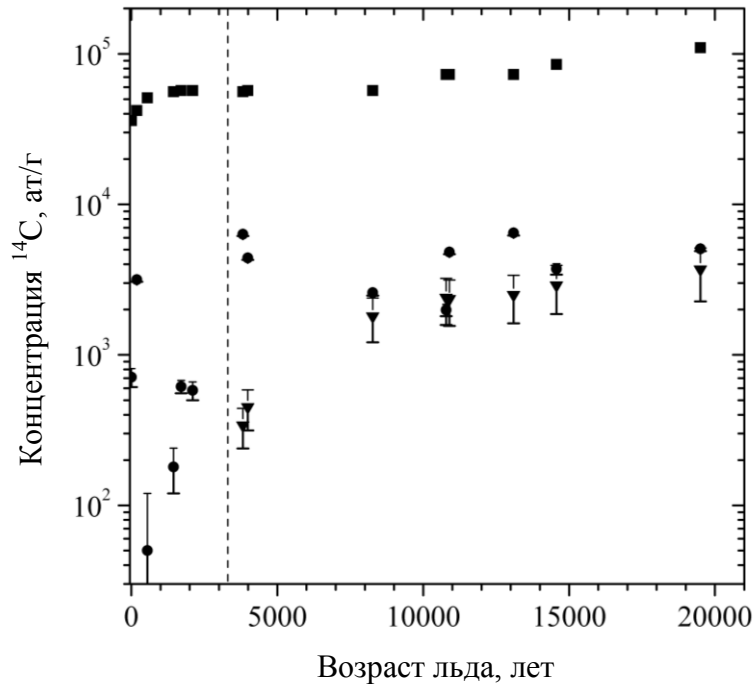


Рис. 4. Экспериментальные данные [4] и результаты расчетов для образцов льда скважины Восток [4a]. Круги – экспериментальные данные; квадраты – результаты расчета полной концентрации космогенного  $^{14}\text{C}$  «in situ»; треугольники – результаты расчета концентрации  $^{14}\text{C}$ , образованного на глубинах, больших толщины фирнового слоя. Вертикальной чертой отмечен возраст, соответствующий глубине границы фирна и льда.

### 3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые в рамках решения проблемы накопления космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах проведено совместное рассмотрение задач распространения космического излучения в атмосфере Земли и в полярных льдах. Наблюдается согласие результатов расчетов потоков частиц в атмосфере с данными измерений. Было получено, что длина ослабления потока высокоэнергичных нуклонов космических лучей во льдах на 15% меньше, чем это полагалось в предшествующих работах, посвященных полярным исследованиям.
2. На основе рассчитанных энергетических спектров частиц ядерно-активного компонента космических лучей и различных функций возбуждения реакций получены скорости образования радиоуглерода во льдах. Результат существенно зависит от используемой в расчетах функции возбуждения реакции  $^{16}\text{O}(n,X)^{14}\text{C}$ . Показано, что функция возбуждения реакции согласно [14], а также функция возбуждения, полученная в результате численного моделирования внутриядерного бинарного каскада [2a], приводят к результатам, наиболее



хорошо согласующимся с опубликованными экспериментальными данными по скорости образования  $^{14}\text{C}$  в кварце.

3. Проведен расчет концентрации  $^{14}\text{C}$  в образцах льда, извлеченных из гренландской скважины GISP2. Впервые получено, что экспериментальные значения концентрации космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  для образцов льда гренландской скважины GISP2 систематически меньше теоретически рассчитанных значений. Построена качественная модель накопления космогенного радионуклида  $^{14}\text{C}$  в полярных льдах, в которой учитываются процессы образования нуклида космическим излучением и процессы потерь на стадии льдообразования.
4. Показано, что экспериментальные данные по концентрации  $^{14}\text{C}$  в образцах льда, извлеченных из антарктических скважин Восток и Тейлор Доум, можно объяснить образованием радионуклида мюонами космических лучей на больших глубинах.

#### 4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1а. Нестеренок А.В., Найденов В.О. Моделирование процессов распространения ядерно-активной компоненты космических лучей в атмосфере Земли // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Физико-математические науки. 2011. №1. С. 94-98 (участие в постановке задачи, проведение численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).
- 2а. Nesterenok A.V., Naidenov V.O. In situ formation of cosmogenic  $^{14}\text{C}$  by cosmic ray nucleons in polar ice // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2012. Vol. 270. Pp. 12-18. Полный текст статьи доступен на сайте издательства с 08.10.2011. doi:10.1016/j.nimb.2011.09.026 (участие в постановке задачи, проведение численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).
- 3а. Нестеренок А.В., Найденов В.О. Радиоуглерод в полярных льдах: механизмы сохранения в зернах фирна // Геомагнетизм и Аэрономия. 2011. Т. 51. №3. С. 425-432 (участие в постановке задачи, проведение численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).
- 4а. Нестеренок А.В., Найденов В.О. Радиоуглерод в антарктических льдах: образование мюонной компонентой космических лучей на больших глубинах // Геомагнетизм и Аэрономия. 2010. Т. 50. №1. С. 138-144 (участие в постановке задачи, проведение численных расчетов, анализ результатов, подготовка статьи к публикации).
- 5а. Нестеренок А.В., Найденов В.О. Космогенный радиоуглерод в полярных льдах как метод исследования солнечной активности // Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2011». Программа и тезисы, Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2011. С. 95 (участие в постановке задачи, проведение расчетов, анализ результатов, представление доклада на конференции).

- ба. Нестеренок А.В., Найденов В.О. Радиоуглерод в антарктических льдах: образование мюонной компонентой космических лучей на больших глубинах // Конференция по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб 2009». Программа и тезисы, Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2009. С. 94-95 (участие в постановке задачи, проведение расчетов, анализ результатов, подготовка статьи и представление доклада на конференции).

### Список литературы

1. Константинов Б.П., Кочаров Г.Е., ДАН СССР, т. 165, с. 63-64 (1965).
2. Suter M., Nuclear Instruments in Physics Research B, vol. 64, p. 321-329 (1992).
3. Блинов А.В., Научно-технические ведомости СПбГПУ, №4, с. 108-139 (2003).
4. Lal D., Jull A.J.T., Donahue D.J. et al., J. of Geophysical Research D, vol. 106, № 23, p. 31933-31941 (2001).
5. Agostinelli S., Allisonas J., Amakoe K. et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 506, p. 250-303 (2003).
6. Geant4 Collaboration, URL: <http://geant4.cern.ch/support/index.shtml>, дата обращения 31.03.2011.
7. National Nuclear Data Center, URL: <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endlf00.jsp>, дата обращения 30.05.2011.
8. Nuclear Data Evaluation Center of Japan Atomic Energy Agency, URL: <http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/jendl.html>, дата обращения 30.05.2011.
9. NCAS British Atmospheric Data Centre, URL: [http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_\\_ATOM\\_\\_dataent\\_CIRA](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_CIRA), дата обращения 22.02.2011.
10. Usoskin I.G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G.A., Mursula K., J. of Geophysical Research, vol. 110, № A12, CiteID A12108 (2005).
11. Gordon M.S., Goldhagen P., Rodbell K.P. et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 51, № 6, p. 3427-3434 (2004).
12. Sato T., Niita K., Radiation Research, vol. 166, p. 544-555 (2006).
13. Imamura M., Nagai H., Takabatake M. et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 52, p. 595-600 (1990).
14. Reedy R.C., персональное сообщение 2010.
15. Michel R., персональное сообщение 2010.
16. Lal D., Nishiizumi K., Arnold J.R., J. of Geophysical Research, vol. 92, p. 4947-4952 (1987).
17. Lal D., Jull A.J.T., Burr G.S., Donahue D.J., J. of Geophysical Research C, vol. 102, p. 26505-26510 (1997).
18. Lal D., Jull A.J.T., Burr G.S., Donahue D.J., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 172, p. 623-631 (2000).
19. Jull A.J.T., Cloudt S., Donahue D.J. et al., Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 62, p. 3025-3036 (1998).
20. Reedy R.C., Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, vol. 38, p. 1192 (2007).
21. Rogers I.W., Tristram M., J. of Physics G: Nuclear Physics, vol. 10, p. 983-1001 (1984).
22. Heisinger B., Lal D., Jull A.J.T. et al., Earth Planetary Science Letters, vol. 200, p. 345-355 (2002).
23. Heisinger B., Lal D., Jull A.J.T. et al., Earth Planetary Science Letters, vol. 200, p. 357-369 (2002).
24. Desilets D., Zreda M., Earth and Planetary Science Letters, vol. 206, p. 21-42 (2003).
25. Boezio M., Carlson P., Franke T. et al., Physical Review D, vol. 62, p. 032007 (2000).
26. Alley R.B., Quaternary Science Reviews, vol. 19, p. 213-226 (2000).
27. Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B. et al., Nature, vol. 364, p. 218-220 (1993).
28. Reeh N., J. of Glaciology, vol. 35, № 121, p. 406-417 (1989).