

Суперфизкому А.Д.
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

КОНСТАНТИНОВ Алексей Николаевич

УДК 621.039.8 : 523.165

**СОДЕРЖАНИЕ КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ БЕРИЛЛИЙ-10
И АЛЮМИНИЙ-26 В ЗЕМНЫХ ОБРАЗЦАХ И ВАРИАЦИИ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

ЛЕНИНГРАД 1983

Работа выполнена в Ленинградском ордена Ленина политехническом институте имени М. И. Калинина на кафедре «Космические исследования».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Г. Е. Кочаров.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор О. В. Ложкин, кандидат физико-математических наук, доцент Б. П. Шахов.

Ведущая организация: Физический институт имени П. Н. Лебедева АН СССР (Москва).

Защита диссертации состоится «14» февраля 1984 г. в 10 часов на заседании специализированного совета Д 063.38.13 Ленинградского ордена Ленина политехнического института имени М. И. Калинина (195251, Ленинград, Политехническая ул., 29, корп. 4, ауд. 180).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке института.

Автореферат разослан «12» января 1984 г.

Ученый секретарь специализированного совета
А. Г. Дмитриев

СОДЕРЖАНИЕ КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ БЕРИЛЛИЙ-10 И АЛЮМИНИЙ-26 В ЗЕМНЫХ ОБРАЗЦАХ И ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изучение распределения радиоактивных изотопов в геосфере в настоящее время является важной прикладной задачей ядерной физики. Такие исследования позволяют получать уникальные результаты в геологии, океанологии, археологии, метеорологии, астрофизике. Особый интерес представляют космогенные изотопы, такие как радиоуглерод, бериллий-10, алюминий-26 и другие. Изучение этих изотопов дает возможность определять характеристики различных геофизических и астрофизических процессов на большой шкале времени. Так, например, путем определения содержания радиоуглерода в кольцах деревьев получен временной ход интенсивности космических лучей за последние 8 тысяч лет. Это, в частности, позволило сделать вывод, что экстремальное поведение Солнца типа Маундеровского минимума активности является характерным на всей рассмотренной шкале времени. Временной ход интенсивности космических лучей содержит богатую информацию о вспышечной и циклической деятельности Солнца, о механизме ускорения и распространения космических лучей и так далее.

Цель работы. Целью работы является исследование интенсивности галактических космических лучей на шкале времени в десятки тысяч лет по данным измерений содержания космогенного бериллия-10 в земных образцах и привноса на Землю межпланетной пыли путем измерения содержания алюминия-26 в донных отложениях.

Научная новизна.

1. Разработан и создан высокочувствительный спектрометр бета-гамма-гамма совпадений для измерения содержания алюминия-26 в земных образцах.

2. Теоретически рассмотрено влияние геомагнитного поля, солнечной активности и вспышек Сверхновых на временной ход скорости генерации бериллия-10 в ядерных реакциях при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли.

3. Рассмотрены конкретные возможности разделения эффектов вариаций интенсивности космических лучей, изменения свойств геосферы и привноса на Землю межпланетной пыли путем совместного анализа данных по содержанию бериллия-10, радиоуглерода и алюминия-26 в земных образцах. Установлена взаимосвязь изменений скоростей образования бериллия-10 и углерода-14 при изменениях солнечной активности. Предложена

возможность выявления мощных солнечных вспышек в прошлом путем измерения содержания этих изотопов в датированных образцах.

4. Измерено содержание алюминия-26 в красной глубоководной глине и сделан вывод о постоянстве скорости захвата Землей космического вещества за последние 350 тысяч лет.

5. Впервые восстановлена интенсивность галактических космических лучей на орбите Земли за последние 30 тысяч лет.

Научная и практическая ценность. Разработанный и созданный высокочувствительный спектрометр тройных совпадений может быть использован при решении задач ядерной геофизики и астрофизики. Полученные результаты о постоянстве скорости захвата Землей космического вещества за 350 тысяч лет и по временному ходу интенсивности космических лучей за 30 тысяч лет важны для выяснения природы источников космических лучей и космической пыли. Разработанная методика позволяет восстановить интенсивность космических лучей за последние несколько миллионов лет. Возможность разделения причин вариаций содержания космогенных изотопов открывает широкие перспективы исследования геофизических и астрофизических явлений в прошлом. В частности, изучение вариаций солнечной активности в прошлом имеет важное значение как для понимания природы активности Солнца, так и для прогнозирования радиационной обстановки в околоземном пространстве. Космогенные изотопы дают возможность выявлять мощные солнечные вспышки и взрывы близких Сверхновых, имевшие место в прошлом.

Результаты, представляемые на защиту.

1. Разработка и создание спектрометра совпадений для измерения малых количеств алюминия-26. Результаты эксперимента по определению содержания алюминия-26 в образце донных отложений. Оценка скорости привноса на Землю космической пыли в прошлом.

2. Установленную зависимость скорости образования бериллия-10 от величины геомагнитного поля. Результаты расчетов скорости образования бериллия-10 корпускулярной и гамма-компонентой излучения Сверхновой, а также солнечными космическими лучами. Вывод о возможности выявления мощных солнечных вспышек по содержанию бериллия-10 и радиоуглерода в земных образцах.

3. Зависимость между скоростями образования бериллия-10 и радиоуглерода и результаты совместного анализа данных по этим двум изотопам.

4. Временной ход интенсивности галактических космических лучей за 30 тысяч лет.

Апробация работы. Основной материал диссертации опубликован в 6 научных работах. Отдельные аспекты проведенных исследований докладывались на сессии отделения Ядерной физики АН СССР (Москва, 1982), VIII Международной конференции по космическим лучам (Бангалор, Индия, 1983), XI Ленинградском семинаре по космофизике (Ленинград, 1979), У симпозиуме "Состав космического вещества" (Київ, 1981), VI всесоюзном совещании по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод" (Тбилиси, 1976).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и заключения. Диссертация содержит 105 страниц текста, включая 14 таблиц, 46 рисунков. Библиография содержит 113 наименований.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко рассмотрены история исследований космогенных изотопов, полученные к настоящему времени важнейшие результаты. Сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы. Освещен круг вопросов, рассматриваемых в отдельных главах диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению процессов образования долгоживущих космогенных изотопов, их распределения в геосфере и методам измерений малых активностей алюминия-26. Долгоживущие космогенные изотопы образуются в ядерных реакциях скалывания при взаимодействии космических лучей (КЛ) с атмосферой Земли, и затем переносятся в такие природные объекты, как донные отложения озер и океанов, полярные льды. Рассмотрены методы расчетов скоростей образования изотопов, обосновывается выбор диаграммного метода расчета адронного каскада в атмосфере Земли, позволяющего связать изменения солнечной активности и скорости образования изотопа.

Для восстановления временного хода скоростей ядерных реакций в атмосфере Земли по концентрации космогенных изотопов в земных образцах необходимо знать характеристики процессов переноса изотопов в геосфере. Для бериллия-10, алюминия-26 и других изотопов, переносимых на аэрозолях, основную роль играют два параметра: "широтный" эффект и скорость формирования образца. Рассмотрены влияние этих параметров на концентрацию изотопов в природных объектах и методы определения их

величины.

Проведен анализ существующих методов регистрации космогенного алюминия-26 и установок, созданных для этой цели. Рассмотрены лучшие установки, использующие гамма-гамма, бета-гамма, бета-гамма-гамма совпадения. Сделан вывод о том, что установки гамма-гамма совпадений в настоящее время практически достигли предела чувствительности, и что более перспективны установки тройных совпадений. Однако для измерения содержания алюминия-26 в земных образцах на этих установках требуется создание бета-детектора, который мог бы с высокой эффективностью регистрировать бета-излучение образцов массой от единиц до десятков граммов.

Вторая глава посвящена вопросам разработки и создания оригинального спектрометра совпадений, описанию проведенного эксперимента по измерению содержания космогенного алюминия-26 в образце донных отложений и оценке на основе полученного результата скорости привноса на Землю межпланетной пыли в прошлом.

Химическая обработка образцов красной глубоководной глины из донных отложений преследует две основные цели: увеличение удельной активности алюминия-26 и уменьшение содержания радиоактивных примесей. Предложенная в диссертационной работе методика химической обработки образцов позволяет извлекать из красной глубоководной глины примерно 70% содержащейся в ней окиси алюминия.

В качестве бета-детектора в спектрометре тройных совпадений нами предложено использовать сцинтилирующий гель на основе плексигласа (толуол + 4 г/л РРО + 0,1 г/л РРОР + плексиглас). При концентрации плексигласа (полиметилметакрилата) 8-10 весовых процентов гель обладает достаточной для обеспечения постоянной геометрии счета вязкостью. Использование сцинтилирующего геля обеспечивает высокую (до 90%) эффективность регистрации позитрона от распада алюминия-26 при образце массой до 15 граммов и размерах частиц препарата Al_2O_3 до 0,1 мм. Были проведены расчеты эффективности регистрации гамма-квантов кристаллами $NaI(Tl)$ цилиндрической формы, которые позволили выбрать оптимальную геометрию измерений. В установке использованы кристаллы $NaI(Tl)$ размерами $\varnothing 200 \times 160$ мм и $\varnothing 200 \times 100$ мм, объем киветы 160 см³. Схема спектрометра изображена на рис.1.

Радиоэлектронная часть разработанной установки, выполненная на интегральных микросхемах, предусматривает многоцелевой характер работы в нескольких режимах (поочередно или одновременно) и быстрой пе-

рестройки на регистрацию другого изотопа.

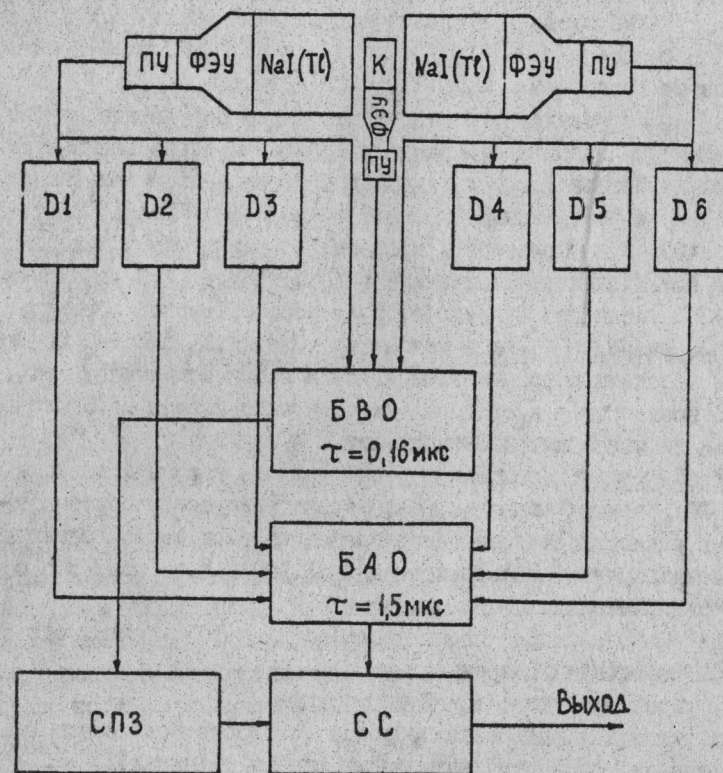


Рис.1. Схема спектрометра совпадений. К - кивета, ПУ - предусилитель и делитель ФЭУ, Д - амплитудный дискриминатор, БВО - блок временного отбора, БАО - блок амплитудного отбора, СПЗ - схема переменной задержки, СС - схема совпадений, τ - разрешающее время схемы совпадений.

Было измерено содержание алюминия-26 в образце донных отложений из Тихого океана ($32^{\circ} 13' 7''$ ю.ш., $154^{\circ} 59' 7''$ з.д.), взятого с глубины 5300 м. Возраст измеренного образца определен палеомагнитным методом и равен 200-350 тысяч лет. Величина удельной активности алюминия-26 в образце составила $0,12 \pm 0,04$ расп/мин на 1 кг сухой пробы, что соответствует содержанию ^{26}Al $(6,8 \pm 2,3) \cdot 10^7$ ат/г.

На основе полученного экспериментально результата, а также результатов выполненных нами расчетов скорости образования алюминия-26 в земной атмосфере и его активности в межпланетной пыли вычислен верхний предел скорости захвата Землей межпланетной пыли: 150 тонн/сутки в период 200-350 тысяч лет в прошлое. По результатам измерений других авторов нами получена величина верхнего предела 250 тонн/сутки в период 0-300 тысяч лет в прошлое. Проведено сравнение с результатами измерений скорости захвата Землей космического вещества другими косвенными методами и прямыми измерениями на космических аппаратах. Сделан вывод о постоянстве в среднем скорости поступления на Землю межпланетной пыли за последние 300 тысяч лет.

Третья глава посвящена изучению причин вариаций содержания бериллия-10 в земных образцах, взаимосвязи скоростей образования бериллия-10 и радиоуглерода, восстановлению интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) за последние 30000 лет по данным о содержании ^{10}Be в полярных льдах.

Причинами вариаций содержания бериллия-10 в земных образцах могут быть изменения во времени:

- 1) характера атмосферной циркуляции;
- 2) условий формирования образца (скорости осадконакопления в озерах и океанах, скорости аккумуляции льда в ледниках);
- 3) магнитного поля Земли;
- 4) солнечной активности;
- 5) потока ГКЛ, падающего на Солнечную систему.

Первые две причины учитываются при восстановлении скорости образования бериллия-10 Q :

$$Q = Anv \quad (1)$$

где A - коэффициент, учитывающий широтный эффект, v - скорость формирования образца (осадкообразования или скорости аккумуляции льда), n - содержание изотопа в образце в ат/см³

Основываясь на диаграммном методе расчета адронного каскада в атмосфере Земли, мы получили зависимость скорости образования ^{10}Be

от величины коэффициента модуляции солнечной активностью K . Результаты расчета представлены на рис.2 для различных значений дипольного магнитного момента Земли. Учет влияния магнитного поля проводился по формуле

$$R_{\text{обр}}(\lambda) = 14,9 \frac{M_t}{M_0} \cos^4 \lambda, \quad (2)$$

где $R_{\text{обр}}(\lambda)$ - жесткость геомагнитного обрезания на геомагнитной широте λ , $14,9$ ГВ-жесткость геомагнитного обрезания на экваторе в настоящее время, M_0 и M_t - дипольный магнитный момент Земли в настоящее время и в момент времени t . Усреднение скорости образования по поверхности Земли с учетом магнитного поля производится следующим образом:

$$Q = A \cdot \int_{E_n}^{\infty} (E + mc^2)^{-\gamma} \exp\left(-\frac{K}{R}\right) X(E) [1 - \sin \lambda(E)] dE, \quad (3)$$

где $A(E + mc^2)^{-\gamma} \exp\left(-\frac{K}{R}\right)$ - дифференциальный спектр ГКЛ, модулированный солнечной активностью, $1 - \sin \lambda(E)$ - доля поверхности Земли, где частицы с энергией E дают вклад в скорость образования, $X(E)$ - выход изотопа на первичную частицу с энергией E , E_n - пороговая энергия ядерной реакции с выходом интересующего нас изотопа. Из выражений (2) и (3) получена зависимость, представленная на рис.2. Зависимость скорости образования бериллия-10 от магнитного момента не имеет простого аналитического выражения, но при малых изменениях магнитного поля можно использовать такую же зависимость, как для радиоуглерода:

$$Q = Q_0 \left(\frac{M}{M_0}\right)^{-0,5} \quad (4)$$

Солнечная активность двояко влияет на скорость образования космических изотопов. С одной стороны, скорость образования уменьшается при увеличении активности Солнца за счет усиления модулирующего действия на поток ГКЛ, с другой, - вклад в скорость образования могут давать солнечные космические лучи (СКЛ), образованные в солнечных вспышках. За счет модулирующего действия солнечной активности скорость образования бериллия-10 меняется примерно на $\pm 40\%$. При вычислении вклада СКЛ в скорость генерации ^{10}Be для спектра вспышечных частиц принята экспоненциальная зависимость от жесткости. Полученные результаты приведены на рис.3.

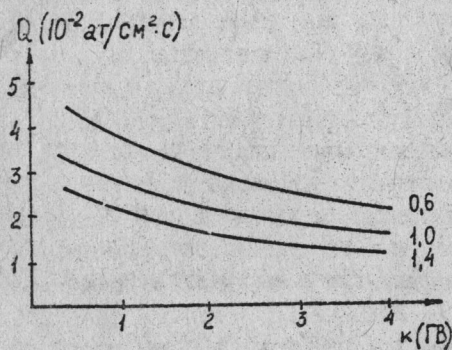


Рис.2. Зависимость скорости образования бериллия-10 от величины коэффициента модуляции солнечной активности. Цифры у кривых – относительная величина дипольного магнитного момента Земли M/M_0 , $M_0 = 8 \cdot 10^{25}$ г·с·см³.

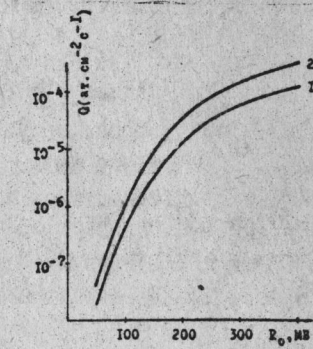


Рис.3. Зависимость скорости образования бериллия-10 СКЛ на один протон с энергией больше 30 МэВ от величины характеристической жесткости спектра. 1 – для нормального геомагнитного обрезания, 2 – для 20% нормального.

Для потока СКЛ 100 протонов/см²·с с характеристической жесткостью 100 МэВ получаем среднюю скорость образования бериллия-10 СКЛ равной $4 \cdot 10^{-5}$ ат/см²·с, что составляет 0,2% от скорости образования за счет ГКЛ. Во время геомагнитных бурь жесткость геомагнитного обрезания может существенно отличаться от невозмущенной. Кривая 2 на рис.3 рассчитана для значения геомагнитного обрезания 20% от нормального. И в этом случае вклад СКЛ много меньше вклада ГКЛ.

Таким образом, концентрация ¹⁰Ве в атмосфере Земли практически нечувствительна к солнечным вспышкам. С другой стороны, известно, что СКЛ вносят в вариации концентрации ¹⁴С вклад, сравнимый с вариациями за счет 11-летней модуляции ГКЛ, что не позволяет надежно разделить эти эффекты по радиоуглеродным данным. В диссертационной работе предложена возможность выявления солнечных вспышек на основе совместного анализа данных по бериллию-10 и радиоуглероду.

Установлено, что при изменениях коэффициента модуляции солнеч-

ной активностью скорости образования бериллия-10 и радиоуглерода изменяются прямо пропорционально друг другу, несмотря на то, что образуются в различных процессах. Зависимость между относительными изменениями скоростей образования $\Delta Q = \frac{Q-Q_0}{Q_0}$ можно записать как

$$\Delta Q_{10} = 1,4 \cdot \Delta Q_{14}, \quad (5)$$

где индексы 10 и 14 относятся к бериллию-10 и радиоуглероду. Проведенный в работе анализ имеющихся экспериментальных данных по содержанию ¹⁴С и ¹⁰Ве в датированных образцах за последнюю тысячу лет подтвердил полученное соотношение (5). Это означает, что имеется реальная возможность выявления имевших место в прошлом мощных солнечных вспышек по результатам измерений содержания этих изотопов в земных образцах.

В работе рассмотрен вопрос об образовании бериллия-10 корпускулярным и гамма-излучением близкой Сверхновой. Спектр корпускулярного излучения Сверхновой принимался таким же, как измеренный в настоящее время спектр ГКЛ. На рис.4 показана зависимость скорости образования бериллия-10 ускоренными во вспышке Сверхновой частицами для различных значений энерговыделения в ускоренных частицах W и расстояния до Сверхновой R . Длина свободного пробега частиц в Галактике принята равной 3 парсекам.

Рассчитана также скорость образования бериллия-10 гамма-квантами, образующимися при взрыве Сверхновой. Получено, что увеличение скорости образования в два раза по сравнению с современной произойдет при расстоянии до Сверхновой 40 пс и энергии гамма-вспышки 10^{48} эрг.

Восстановлена скорость образования бериллия-10 за 30 тысяч лет по данным о содержании изотопа во льдах Гренландии и Антарктиды. Получено хорошее согласие как между результатами по различным образцам, так и с результатами по радиоуглероду.

С помощью разработанной автором методики восстановлена интенсивность ГКЛ за 30 тысяч лет по содержанию бериллия-10 в полярных льдах. Результат представлен на рис.5. Видно, что результаты по образцам из Антарктиды и Гренландии хорошо согласуются. Имеется также согласие с интенсивностью ГКЛ, восстановленной по радиоуглеродным данным, пределы изменения которой показаны на рис.5 пунктиром. Отмечены две особенности временного хода интенсивности ГКЛ: 1) повышение среднего уровня интенсивности примерно в 2 раза в период 10-30 тысяч

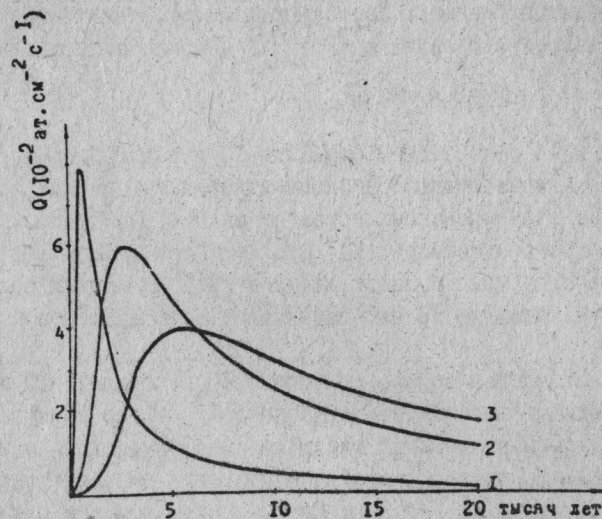


Рис.4. Зависимость скорости образования бериллия-10 корпускулярным излучением Сверхновой от времени после взрыва. 1 - $R = 30$ пс, $W = 10^{50}$ эрг; 2 - $R = 70$ пс, $W = 4 \cdot 10^{50}$ эрг; 3 - $R = 100$ пс, $W = 8 \cdot 10^{50}$ эрг.

лет назад; 2) кратковременные повышения интенсивности в 4-6 раз 9-II и 13-15 тысяч лет назад. Высокий средний уровень интенсивности ГКЛ можно объяснить пониженной солнечной активностью, примерно такой же, как в Маундеровском минимуме.

В работе выдвигаются и обосновываются следующие возможные причины особенностей временного хода интенсивности ГКЛ 9-15 тысяч лет назад: 1) кратковременное изменение атмосферной циркуляции или скорости аккумуляции льда; 2) вспышка Сверхновой примерно 15 тысяч лет назад на расстоянии 30-70 пс от Солнца (кривая на рис.5 - для расстояния 30 пс и энергии ускоренных частиц 10^{50} эрг); 3) одновременное уменьшение солнечной активности и геомагнитного поля.

Основные результаты и выводы проведенных исследований, нашедших отражение в реферируемой диссертации, сводятся к следующему.

1. Разработан и создан спектрометр тройных совпадений для изме-

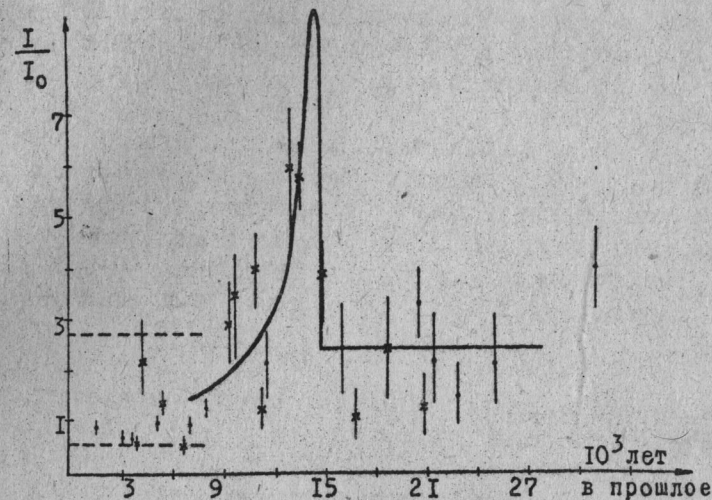


Рис.5. Интенсивность ГКЛ за 30000 лет. Кривая - ход интенсивности при взрыве Сверхновой 15 тысяч лет назад.

рения содержания алюминия-26 в земных образцах. Созданный прибор обладает высокой чувствительностью при использовании образцов массой до пятнадцати граммов. Проведено измерение содержания алюминия-26 в красной глубоководной глине возрастом 200-350 тысяч лет.

2. На основе полученного результата и результата других авторов оценена скорость привноса на Землю межпланетной пыли за 350 тысяч лет. Сделан вывод о примерном постоянстве скорости захвата Землей космического вещества в этот период времени.

3. Установлена взаимосвязь изменений скоростей образования бериллия-10 и радиоуглерода при изменениях солнечной активности. Разработан метод совместного анализа данных по двум изотопам. Отмечено хорошее согласие результатов, полученных по этим изотопам.

Проведены расчеты скорости образования бериллия-10 солнечными космическими лучами. Показана принципиальная возможность выявления мощных солнечных вспышек в прошлом по результатам измерений содержания бериллия-10 и радиоуглерода в земных образцах.

4. Проведены расчеты скорости образования бериллия-10 корпускулярным и гамма-излучением от взрыва Сверхновой. Показана возможность обнаружения вспышки Сверхновой по измерениям содержания бериллия-10 в земных образцах.

5. Разработана методика восстановления интенсивности галактических космических лучей по содержанию бериллия-10 в земных образцах. По данным о концентрации изотопа в полярных льдах восстановлены скорость образования бериллия-10 и интенсивность космических лучей за последние 30 тысяч лет. Обсуждены возможные причины вариаций интенсивности космических лучей в интервале времени 10-30 тысяч лет в прошлое.

Основные результаты, включенные в диссертационную работу, изложены в следующих статьях.

1. Блинов А.В., Константинов А.Н. Космогенный алюминий-26 и интенсивность космических лучей в далеком прошлом. - Изв.АН СССР, сер. Физическая, 1977, 41, с.446-452.

2. Блинов А.В., Ковалев В.П., Константинов А.Н. Получение 4π-геометрии регистрации позитронов от распада алюминия-26. - В кн.: Труды XI Ленинградского семинара по космофизике. Л.: ЛЯФ, 1979, с.257-263.

3. Блинов А.В., Ковалев В.П., Константинов А.Н., Терентьева З.П. Космогенный алюминий-26 в земных образцах. - В кн.: Труды XI Ленинградского семинара по космофизике. Л.: ЛЯФ, 1979, с.264-272.

4. Константинов А.Н., Кочаров Г.Е. Концентрация ^{10}Be и ^{14}C в образцах с известным возрастом. - Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе АН СССР, 1982, № 801, 15 с.

5. Константинов А.Н., Кочаров Г.Е. Интенсивность космических лучей за последние 30000 лет. - Письма в АЖ, 1984, № 2.

6. Kocharov G.E., Konstantinov A.N. Cosmogenic nuclide ^{10}Be abundance in the ice core and the time variation of cosmic rays. - In: Proc. XVIII Intern. Cosmic Ray Conference, v.2, p.333-336, India, 1983.

Подписано к печати 23.12.83. М-42831.

Заказ 457.

Тираж 100.

Бесплатно

Отпечатано на ротапринте Ленинградского политехнического института имени М.И.Калинина, Ленинград, Политехническая ул., 29.