

## EXPERIMENTAL PALEOASTROPHYSICS: ACHIEVEMENTS AND PERSPECTIVES

G. E. KOCHAROV

*The basis, achievements and perspectives of the investigation of a new region of the science have been discussed.*

**Обсуждаются основы новой области науки “экспериментальная палеоастрофизика”, ее достижения и перспективы.**

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПАЛЕОАСТРОФИЗИКА: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Г. Е. КОЧАРОВ

Санкт-Петербургский государственный  
технический университет

## ВВЕДЕНИЕ

Что такое экспериментальная палеоастрофизика? Это область науки, охватывающая совокупность астрофизических явлений, сигналы от которых достигли Солнечной системы до возникновения инструментальной астрономии. Рождение инструментальной астрономии закономерно связывается с началом систематических исследований неба великим ученым эпохи Ренессанса Галилеем. Именно он в начале XVII века, используя самодельную трубу с линзой 4 см, открыл спутники Юпитера, обнаружил пятна на Солнце и др. Таким образом, инструментальная астрономия молода — ей всего 400 лет, что значительно меньше продолжительности существования земной цивилизации и, конечно же, меньше миллионов и миллиардов лет — возраста галактик и Вселенной в целом.

Известно, что на Земле имеются естественные архивы космических частиц и излучений, имеющих хорошую память об астрономических явлениях на большой шкале времени в прошлом. Такими детекторами являются кольца деревьев, кораллы, полярный лед, донные отложения морей и океанов, сталактиты и т.д. Каков принцип их действия? Космические лучи, генерируемые естественными ускорителями частиц в космосе, непрерывно бомбардируют земную атмосферу, инициируя различные ядерные реакции. В них генерируются радиоактивные ядра, такие, как  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$ .  $^{14}\text{C}$  — один из изотопов углерода, радиоактивный с периодом полураспада 5730 лет.  $^{10}\text{Be}$  тоже радиоактивный с периодом 1,5 млн лет.

Генерируемый космическими лучами радиоуглерод окисляется до  $^{14}\text{CO}_2$  и вместе с обычным углекислым газом участвует во всех природных процессах: поглощается растениями и соответственно попадает в организмы животных и людей. Наиболее удобным объектом для исследований являются кольца деревьев. Концентрация радиоуглерода в кольце пропорциональна интенсивности космических лучей в год роста этого кольца. Таким образом, измерив содержание радиоуглерода в кольце дерева, можно вычислить интенсивность космических лучей в тот год. Это позволяет восстановить интенсивность космических лучей в прошлом (за последние несколько тысяч лет по живым деревьям и до

100 тыс. лет назад по сталагмитам, кораллам, полярному льду).

Судьба  $^{10}\text{Be}$  отличается от углеродной тем, что в атмосфере  $^{10}\text{Be}$  прилипает к пылинкам и оседает вместе с ними в земных архивах: донных отложениях морей и океанов, полярном льду. Удаётся получить необходимое для эксперимента количество датированного льда за интервал времени вплоть до 200–300 тыс. лет тому назад.

Космические лучи, рентгеновское и гамма-излучение в атмосфере производят также ионизацию (генерацию электронов). Обилие электронов влияет на скорость химических процессов, в частности резко растет концентрация нитратов, которые как в Антарктиде, так и в Арктике переносятся атмосферными вихрями в лед. В ледяных условиях нитраты сохраняются наподобие ядер  $^{10}\text{Be}$ . Поэтому, измерив независимым методом возраст льда, можно по содержанию нитратов в нем восстановить интенсивность космических протонов, электронов, рентгеновского и гамма-излучения. По имеющимся данным, этот метод дает возможность охватить несколько последних десятков тысяч лет.

Таким образом, существуют два канала информации: космогенные изотопы в различных земных образцах и нитраты в полярном льду.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИРОДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис. 1 показан принцип работы природных детекторов космического излучения. На примере галактических космических лучей рассмотрим ос-

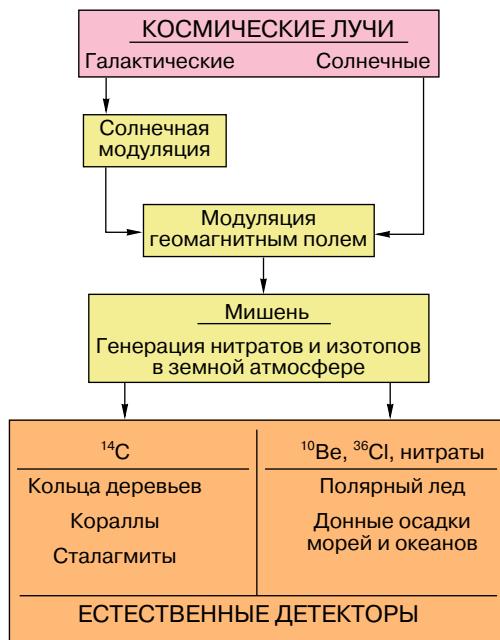


Рис. 1. Принцип работы естественных детекторов космических лучей.

новные особенности естественных детекторов. При вхождении в Солнечную систему космические лучи должны преодолеть барьер магнитного поля Солнца. Чем больше энергия частиц и чем меньше солнечная активность, тем легче частицам проникнуть в Солнечную систему. Таким образом, частицы, проникшие в Солнечную систему, несут информацию как об источнике, где они родились, так и о состоянии солнечной активности. Похожее явление наблюдается и при проникновении через магнитный экран Земли. В ядерных реакциях в атмосфере Земли генерируются разные изотопы, и среди них  $^{10}\text{Be}$  и  $^{14}\text{C}$  – главные объекты нашего рассмотрения. Как уже указывалось, в атомных столкновениях в атмосфере генерируются электроны, которые в конечном итоге увеличивают концентрацию нитратов. Другими словами, говоря языком ядерной физики, атмосфера Земли является детектором космических лучей. Кольца деревьев, кораллы, сталагмиты, полярный лед, донные отложения являются погодичными хранителями информации о ядерных реакциях.

Методы датировки меняются в зависимости от типа хранителя информации и интервала времени, прошедшего с момента “запоминания”. Кольца деревьев представляются наиболее наглядными с точки зрения датировки. Есть живые деревья, возраст которых несколько тысяч лет, например секвойя в США, арча туркестанская. Для того чтобы измерить содержание радиоуглерода в кольце дерева с точностью 0,3%, требуется примерно 50 г с каждого кольца древесины. Концентрация  $^{14}\text{C}$  мала и составляет примерно  $10^{-12}$  от концентрации основного изотопа  $^{12}\text{C}$ . Поэтому задача эта нелегкая, но она уже решена. В мире есть несколько лабораторий, в которых проводятся высокоточные погодичные измерения концентрации радиоуглерода.

Как уже отмечалось, изотоп  $^{10}\text{Be}$  тоже радиоактивный. Однако измерить количество атомов по радиоактивности не удается из-за низкого ее уровня. Кроме того, из-за большого периода полураспада и малой концентрации  $^{10}\text{Be}$  во льду (всего 10 млн атомов на 1 кг льда) невозможно набрать статистически надежный результат. Концентрация этого изотопа измеряется новым методом, рожденным в начале 80-х годов. Сочетанием принципов масс-спектрометрии и ускорителя частиц (ускорительная масс-спектрометрия) удается осуществить счет атомов  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$  и др. Итог такой: десятков граммов древесных колец и нескольких килограммов льда достаточно для измерения количества указанных космогенных изотопов, то есть для решения астрофизических задач. Концентрация нитратов во льду измеряется по методу ультрафиолетовой спектрометрии. Экспериментально охвачены следующие интервалы времени: по  $^{10}\text{Be}$  – последние 200 тыс. лет (этот интервал соответствует глубине 2 км льда); по  $^{14}\text{C}$  – последние 50 тыс. лет (кольца деревьев, стеклакиты, кораллы). Интервал времени по нитратам 30 тыс. лет, из которых последние 415 лет погодично.

Естественные детекторы космического излучения позволяют решить следующие проблемы.

1. Экспериментальная проверка фундаментальной идеи о генерации галактических космических лучей при взрыве сверхновых звезд.

2. Определение частоты вспышек сверхновых в нашей Галактике.

3. По временному профилю генерации космогенных изотопов в результате взрыва сверхновых определение механизма ускорения частиц в естественном ускорителе частиц.

4. Природа длительных и глубоких минимумов солнечной активности.

5. Модуляция галактических космических лучей на большой шкале времени (в десятки и сотни раз большей, чем шкала прямых измерений).

6. Получение ответа на принципиально важный вопрос, какая может быть максимально возможная энергия солнечной вспышки.

7. Даты и масштабы катастрофических событий в прошлом.

Полученные за последние 30 лет результаты будут рассмотрены ниже. Автор был научным руководителем общесоюзной проблемы “Астрофизические явления и радиоуглерод” в течение трех десятков лет, участником и свидетелем развития новой области науки “экспериментальная палеоастрофизика”.

### ПРОБЛЕМА МОДУЛЯЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 400 ЛЕТ

Согласно историческим данным, в прошлом в истории Солнца существовали такие длительные промежутки времени, когда на поверхности Солнца не отмечалось ни одного пятна. Ближайший к нам по времени глубокий и длительный минимум Солнца был с 1645 по 1715 год. Этот минимум носит имя Е. Маундера, английского ученого, опубликовавшего в 1921 году статью о существовании указанного минимума.

Метод космогенных изотопов позволяет получить количественные данные о модуляции космических лучей в прошлом. Поэтому высокоточные погодичные измерения содержания радиоуглерода в годичных кольцах деревьев за последние 400 лет, включающих периоды до маундеровского минимума, во время и после минимума, были центральной задачей общесоюзной программы “Астрофизические явления и радиоуглерод” [1].

Первая серия измерений была выполнена в 70-е годы [2] в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе АН СССР. Второй цикл измерений был выполнен в Тбилисском государственном университете [3] в первой половине 80-х годов. Третья серия измерений осуществлена в США в конце 80-х годов в лаборатории крупного специалиста по радиоуглеродным исследованиям М. Стуйвера [4].

Во всех трех сериях измерений имеется согласие по ключевым результатам исследований: 11-летняя цикличность до маундеровского минимума и после него; повышение общего уровня содержания радиоуглерода в атмосфере Земли во время глубокого минимума солнечной активности; наличие временных вариаций во время минимума. Последнее является наиболее ярким результатом, так как теория не предсказывала модуляцию галактических космических лучей во время практически полного отсутствия пятен на Солнце.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Переходы Солнца из нормального состояния в глубокий минимум активности и после минимума в обычное состояние осуществляются относительно быстро (~1 год).

2. Характер 11-летних вариаций до маундеровского минимума и после него такой же, как и за последние 50 лет.

На рис. 2 приведены первые детальные данные по содержанию радиоуглерода в эпоху маундеровского минимума [2]. Наглядно видны наличие 11-летних вариаций до минимума, повышение среднего уровня и наличие вариации во время маундеровского минимума. Важно также подчеркнуть, что в эпоху маундеровского минимума (малый ледниковый период) прирост древесных колец был подавлен [5], как, впрочем, и во время глубоких минимумов Вольфа и Шперера.

На основе имеющихся экспериментальных данных нами впервые получен погодичный временной ход интенсивности галактических космических лучей за последние 400 лет. Особый интерес представляют зависимости интенсивности  $I_p$  галактических космических лучей и чисел Вольфа  $W$  до периода

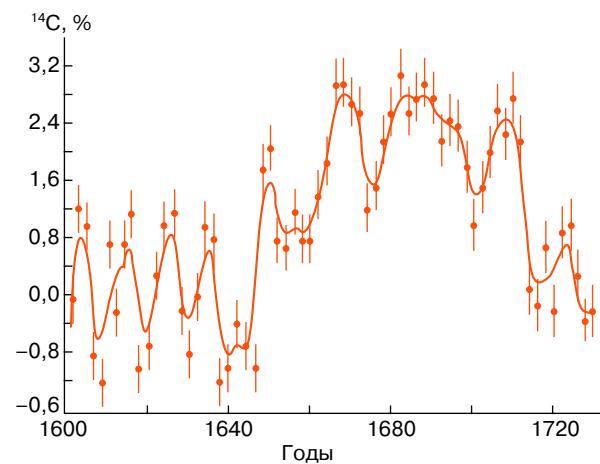


Рис. 2. Временной ход концентрации радиоуглерода в атмосфере Земли в эпоху маундеровского минимума.

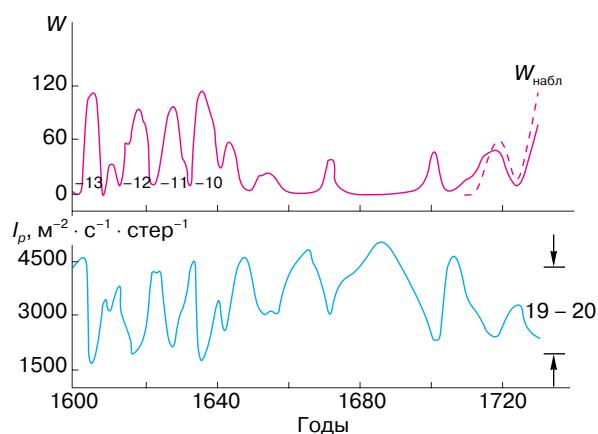
глубокого минимума и после него (рис. 3). Видно, что во время маундеровского минимума пятен на Солнце было мало. В то же время наблюдалась вариация интенсивности галактических космических лучей, причем амплитуда была больше, чем за пределами маундеровского минимума, и характерный период вариации не 11 лет, а близок к 22 годам.

Нами проведен детальный анализ полученных экспериментальных данных. Установлено, что наиболее сильно выражен в эпоху маундеровского минимума период 22 года, что соответствует периоду переполюсовки общего магнитного поля Солнца.

Сформулируем основные свойства маундеровского минимума:

- 1) практически полное отсутствие магнитной активности в течение 70 лет,
- 2) достаточно быстрый переход в состояние глубокого минимума и быстрое восстановление солнечной активности в конце минимума,
- 3) непредсказанное теорией наличие модуляции интенсивности галактических космических лучей во время глубокого минимума.

Представляется, что последняя особенность исключительно важна; она подтверждена в экспериментах других авторов по вариации содержания  $^{14}\text{C}$  в кольцах деревьев, изотопа  $^{10}\text{Be}$  в полярном льду и диаметра Солнца во время маундеровского минимума. Чрезвычайно важно теперь измерить содержание космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в датированных кольцах деревьев и полярном льду соответственно для более древнего минимума солнечной активности: минимум Шперера, длительность которого больше маундеровского (1450–1550 годы). Он соответствует пяти периодам 22-летнего цикла, и более надежно будут определены характеристики вариаций.



**Рис. 3.** Временной ход чисел Вольфа  $W$  и интенсивности галактических космических лучей  $I_p$  в эпоху маундеровского минимума солнечной активности.

За время, прошедшее после обнаружения нами эффекта модуляции интенсивности галактических космических лучей при практическом отсутствии солнечных пятен, достигнут значительный успех в теории солнечной модуляции интенсивности галактических космических лучей. Уже предложены конкретные физические процессы, ответственные за 11- и 22-летние циклы.

#### НИТРАТЫ В ПОЛЯРНОМ ЛЬДУ – НОВОЕ ОКНО В ИССЛЕДОВАНИЯХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ И ДАЛЕКОМ ПРОШЛОМ

На основе многолетних систематических измерений концентрации нитратов в снегах Антарктиды, выполненных Г. Дрешхофф и Э. Целлером, разработана уникальная методика исследования астрофизических и земных явлений. Она основана на том, что снег содержит химическую запись процессов ионизации в полярной атмосфере заряженными частицами, рентгеновскими и гамма-лучами. Антарктида действует как холодная ловушка, способная заморозить астрофизические сигналы и сохранить их в течение длительного времени.

Общепринято, что солнечное магнитное поле является единственным источником энергии солнечных космических лучей. Это обусловлено прежде всего тем, что измеренные в экспериментах величина напряженности магнитного поля Солнца и геометрический размер области способны обеспечить вспышечную энергию. В то же время у нас нет выбора: мы не знаем другого источника энергии. По мере расширения экспериментальных возможностей удается более точно и полно определять основные характеристики ускоренных во вспышках протонов и электронов (полная энергия всех частиц, их полное число, мощность генерации частиц и т.д.). При этом все труднее становится интерпретация полученных данных в рамках гипотезы о магнитной природе источника энергии. Поскольку напряженность магнитного поля конечна, должен быть верхний предел полной энергии  $E_{\max}$ , переданной частицам. Поэтому очень важно на опыте установить это значение  $E_{\max}$ . Задача очень сложная, поскольку чем больше полная энергия ускоренных частиц, тем меньше вероятность такого события. Ясно, что нужен длинный ряд исследований.

Нитратным методом надежно зарегистрированы солнечно-вспышечные протоны от вспышек 1859, 1946, 1972 годов и др. Это делает вполне реальной задачу обнаружения самой крупной вспышки на основе изучения содержания нитратов в полярных льдах.

В настоящее время активно обсуждается проблема возможных земных проявлений космологических гамма-всплесков. В частности, отмечается, что гамма-всплески могут оставить след в земной атмосфере в виде нитратов и космогенных изотопов. Если предположить, что полная энергия

гамма-всплеска составляет  $10^{52}$  эрг и расстояние от Земли до источника 1 кпк, то общий поток энергии от такого источника у Земли будет  $2,7 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . При этом скорость генерации радиоуглерода будет  $34 \text{ атома} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что в 16 раз меньше скорости генерации радиоуглерода галактическими космическими лучами. Скорость генерации другого важного космогенного изотопа –  $^{10}\text{Be}$  будет пренебрежимо мала, так как основной диапазон энергии гамма-квантов во всплесках составляет 30 кэВ–2 МэВ, что меньше, чем порог генерации  $^{10}\text{Be}$  на ядре азота. Таким образом, принципиально возможной является регистрация всплеска по радиоуглероду. Однако время жизни радиоуглерода относительно мало (5740 лет) и с помощью радиоуглерода можно охватить интервал времени в несколько десятков тысяч лет. За такой интервал времени вероятность события с близким гамма-всплеском очень мала. С точки зрения вероятности “регистрации” хорошим космогенным изотопом является  $^{10}\text{Be}$  (шкала времени – сотни тысяч лет). Однако из-за высокого порога генерации изотопа (40–50 МэВ) эффект от гамма-всплеска пренебрежимо мал. Нитратный метод наиболее перспективен для регистрации гамма-всплесков. Оценки показывают, что при полной энергии  $10^{52}$  эрг и расстоянии 10 кпк полное число нитратных молекул будет  $10^{34}$  и вполне реальна регистрация гамма-всплеска.

## ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Происхождение космических лучей является одной из ключевых проблем астрофизики высоких энергий в течение нескольких десятилетий. Четыре вопроса являются центральными.

1. Какое происхождение – галактическое или метагалактическое – имеют космические лучи, регистрируемые в спутниковых, баллонных и наземных экспериментах?

2. Что является источником космических лучей, энергия которых простирается до величины, недоступной для наземных ускорителей частиц?

3. Каков физический механизм ускорения частиц?

4. Как объяснить тот экспериментальный факт, что интенсивность космических лучей практически не меняется во времени?

Более 20 лет назад В.Л. Гинзбург [6] сформулировал четкую экспериментальную возможность ответа на первый вопрос: сравнить интенсивность космических лучей в нашей Галактике и ближайшем к нам внегалактическом объекте – Магеллановых облаках. Он предложил детектировать гамма-излучение, генерируемое в Магеллановых облаках, по взаимодействию с ними космических лучей. Интенсивность гамма-квантов дает непосредственно информацию о внегалактических космических лучах. Идея изящна и проста: если космические лучи

имеют метагалактическое происхождение, то поток гамма-квантов должен быть таким, который можно вычислить на основе измеренного потока космических лучей в нашей Галактике. Если же поток гамма-квантов окажется меньше, то регистрируемые в земных условиях космические лучи имеют галактическое происхождение (то есть они наши). Подготовка и реализация такого спутникового эксперимента потребовали около 20 лет. В 1993 году экспериментально было получено, что поток гамма-излучения приблизительно на 100 МэВ меньше, чем если бы космические лучи были метагалактического происхождения. Таким образом, давняя идея В.Л. Гинзбурга о том, что космические лучи имеют галактическое происхождение, получила экспериментальное подтверждение.

Возможность генерации космических лучей при взрыве сверхновых звезд была предложена в 1934 году Бааде и Цвикки. Эта гипотеза была значительно усиlena в начале 50-х годов, когда из астрономических данных стало ясно, что в остатках сверхновых звезд имеется большое количество релятивистских электронов. Проверка этой фундаментальной гипотезы естественно требовала регистрации космических лучей от взрыва сверхновой звезды.

Эта задача, однако, чрезвычайно трудная. Для того чтобы средняя плотность энергии космических лучей ( $1 \text{ эВ/см}^3$ ) изменилась так, чтобы это изменение можно было измерить, требуется взрыв сверхновой звезды на близком от Солнечной системы расстоянии: менее 100 пк (расстояние в 1 пк свет проходит за 3 года). Известно, что в сфере радиусом 100 пк взрыв в среднем должен происходить один раз в каждые 100 тыс. лет. Ясно, что вероятность взрыва в реальном масштабе времени очень мала. Более того, если даже такой взрыв имел место, то для установления природы источника (сверхновая или нет) требуется проведение непрерывных измерений в течение десятков тысяч лет. Б.П. Константинов и автор сформулировали и разработали метод регистрации космических лучей от взрыва сверхновой в далеком прошлом. Речь идет о методе космогенных изотопов, который рассмотрен выше.

Первые экспериментальные результаты по содержанию  $^{10}\text{Be}$  в полярном льду за последние 40 тыс. лет были опубликованы в начале 80-х годов. Было обнаружено значительное повышение интенсивности космических лучей в интервале времени 10–40 тыс. лет тому назад. Поскольку автор давно ждал этих результатов, уже в 1982 году была опубликована работа, в которой было показано, что полученный временной ход количественно и качественно свидетельствует о взрыве близкой (50 пк) от Солнечной системы Сверхновой звезды с общим энерговыделением  $10^{50}$  эрг в космических лучах. Впоследствии новые экспериментальные данные по  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  полностью подтвердили (рис. 4 и 5)

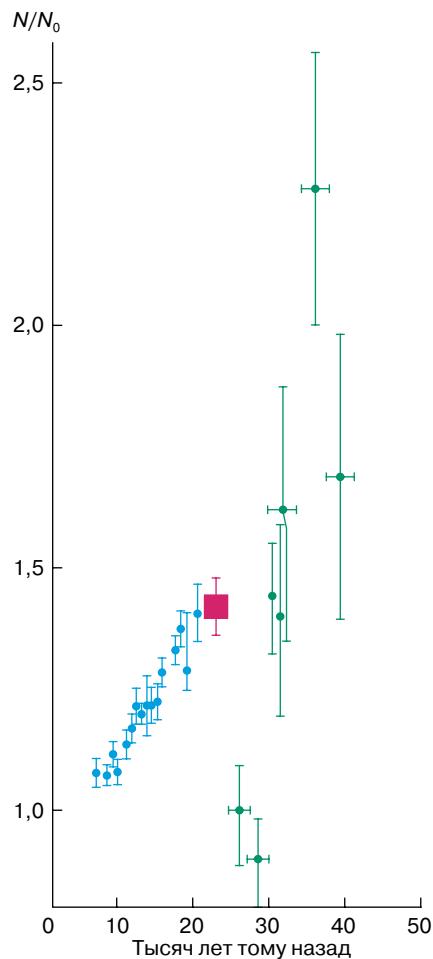
вывод о взрыве близкой сверхновой 35 тыс. лет тому назад.

Анализ полученных данных позволяет сформулировать следующие выводы.

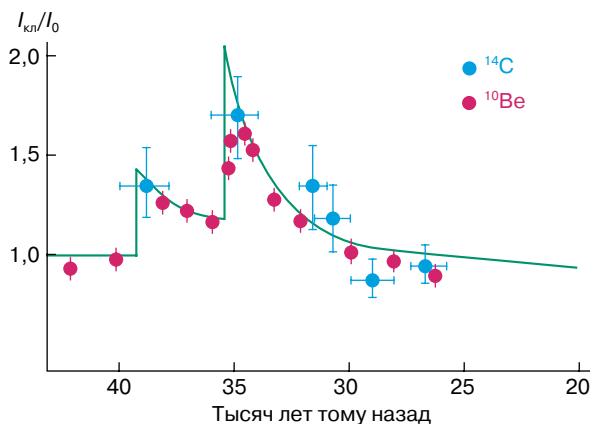
1. Нет сомнений в существовании максимума генерации космогенного  $^{10}\text{Be}$  в кернах льда 35 тыс. лет тому назад.

2. Согласно экспериментальным данным, имеется синхронное возрастание содержания  $^{10}\text{Be}$  в южном и северном полушариях.

3. Имеющиеся экспериментальные данные по содержанию космогенного радиоуглерода в земных архивах (кораллы, сталактиты) показывают, что в атмосфере Земли содержание радиоуглерода в интервале времени от 30 тыс. до 40 тыс. лет тому назад было в два раза больше, чем в настоящее время, причем максимум концентрации также был 35 тыс. лет тому назад.



**Рис. 4.** Экспериментальные данные по содержанию радиоуглерода за последние 50 тыс. лет.  $N/N_0$  — относительное содержание радиоуглерода в образцах.



**Рис. 5.** Космогенный след взрыва Сверхновой звезды в атмосферном радиоуглероде и  $^{10}\text{Be}$ .  $I_{kn}/I_0$  — относительная интенсивность космических лучей.

4. Космогенные изотопы  $^{10}\text{Be}$  и  $^{14}\text{C}$  сильно различаются как механизмом их генерации в атмосфере Земли, так и их геофизическим и геохимическим поведением. Общим для всех трех изотопов  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  является то, что все они имеют общего родителя — космические лучи. Поэтому есть все основания для утверждения, что многолетняя гипотеза о том, что основным источником галактических космических лучей являются взрывы сверхновых звезд, получила экспериментальное подтверждение.

Рассмотрим теперь вид полученного на опыте временного хода интенсивности космических лучей. Надежность максимума 35 тыс. лет тому назад не вызывает сомнений. Несколько раньше (около 40 тыс. лет тому назад) наблюдалось возрастание интенсивности космических лучей. В качестве рабочей гипотезы будем считать, что в интервале времени от 35 тыс. до 40 тыс. лет тому назад также есть максимум. Как можно объяснить такой предмаксимум? В любом источнике, в том числе и в сверхновых, ускорение частиц требует времени, и это время частицы проводят не в пустоте, а в том же “материи”, который снабжает естественный ускоритель частицами. При этом неизбежны ядерные взаимодействия, в результате которых генерируются частицы и гамма-кванты. Гамма-кванты легче (и быстрее) покинуть источник. Гамма-кванты также рождаются в атмосфере Земли космогенные изотопы. Поэтому нельзя исключить, что предимпульс обязан гамма-квантам. В то же время в рамках механизма ускорения на ударных волнах может быть получена двухпиковая структура интенсивности космических лучей от взрыва сверхновой. Важным является получение более детальных экспериментальных данных для интервала времени от 50 тыс. до 35 тыс. лет тому назад.

## ОСНОВНЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЗАДАЧИ

Наиболее важным итогом, по-видимому, следует считать то, что благодаря усилиям ученых многих стран создано новое перспективное научное направление – экспериментальная палеоастрофизика. Среди полученных результатов выделим фундаментальные.

1. Экспериментально обнаружено не предсказанное теорией явление – модуляция космических лучей Солнцем во время глубокого минимума его активности.

2. Впервые зарегистрированы космические лучи от взрыва Сверхновой и построен временной профиль явления.

В перспективе наиболее важными представляются следующие задачи.

1. Для Сверхновой, вспыхнувшей 35 тыс. лет тому назад, крайне важно детально измерить временной профиль предыmpульса и путем измерения концентрации изотопов  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  в образцах льда установить энергетический спектр космических лучей.

2. Принципиально важно обнаружить на опыте еще хотя бы одну сверхновую для установления частоты вспышек сверхновых в нашей Галактике. Для этих исследований в настоящее время наилучшим объектом является “ГЕМИНГА”.

3. Очень важно получить погодичные данные по космогенным изотопам еще хотя бы для одного глубокого минимума Солнца – шпереровский минимум 1450–1550 годов. Если и в этом случае будет установлена модуляция космических лучей с периодом 22 года, проблема модуляции станет безусловно одной из центральных в астрофизике космических лучей и физике Солнца.

4. Коррелированные исследования радиоуглеродным и нитратным методами обещают ответить на один из ключевых вопросов физики Солнца – каков механизм энергетического обеспечения солнечных вспышек.

5. Выше были рассмотрены только земные детекторы космических лучей. Имеются и космические архивы радиационной истории. Метеориты непре-

рывно облучаются космическими лучами, и неизбежно в них генерируются космогенные изотопы. Установление космогенного следа от Сверхновой 35 тыс. лет тому назад чрезвычайно важно, так как вся имеющаяся информация получена только из земных архивов. Для исследований нужен метеорит, космический возраст которого не очень большой. В противном случае фон накопленного интересующего нас изотопа будет большим и не удастся обнаружить эффект взрыва сверхновой. Анализ показывает, что наилучшим объектом является метеорит Фаргмингтон. Космический возраст приемлемый (~40 тыс. лет). Для обнаружения эффекта необходимо измерить содержание космогенного изотопа  $^{81}\text{Kr}$  в образцах метеорита. К сожалению, чувствительность регистрации этого изотопа недостаточна. Требуется ее увеличение примерно в десять раз.

В заключение хотелось бы отметить, что возможности экспериментальной палеоастрофизики очень широкие как в плане изучения уникальных мощных явлений, так и радиационной истории Солнечной системы и Галактики в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов Б.П., Кочаров Г.Е. // Докл. АН СССР. 1965. Т. 165. № 1. С. 63.
2. Васильев В.А., Кочаров Г.Е. // Тр. XIII Междунар. Ленингр. семинара по космофизике. Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1983. С. 75.
3. Кочаров Г.Е. и др. // Письма в “Астрон. журн.”. 1990. Т. 16. С. 723.
4. Stuiver M., Braziunas T.F. // Holocene. 1993. V. 3. P. 289.
5. Шиятов С.Г. В кн.: Биологические основы дендрохронологии. Вильнюс; Л., 1975. С. 47.
6. Гинзбург В.Л. // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166(2). С. 169.

\* \* \*

Грант Егорович Кочаров, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой космических исследований Санкт-Петербургского государственного университета, научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук. Область научных интересов: нейтринная астрофизика, физика Солнца, астрофизика космических лучей, палеоастрофизика.