

# ЕСТЕСТВЕННЫЕ АРХИВЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ИСТОРИИ СОЛНЦА ЗА ПОСЛЕДНИЕ МИЛЛИОНЫ ЛЕТ

Г. Е. КОЧАРОВ

Санкт-Петербургский государственный технический университет

## NATURAL ARCHIVES OF SOLAR ACTIVITY AND THERMONUCLEAR HISTORY OF THE SUN DURING THE LAST MILLIONS YEARS

G. E. KOCHAROV

*A discussion is given of the possibility of the natural detectors for investigations of history of thermonuclear fuel in the solar interior by measuring of an abundance of technetium and lead isotopes in the Earth's Crust. The results of high-precision measurements of radiocarbon content in tree rings and tree rings growth for the last 8 kyr have been discussed. It is shown that there are correlations between deep minima of solar activity and tree rings depression.*

*Рассмотрены возможности естественных детекторов для изучения истории термоядерного горючего в недрах Солнца путем измерения содержания изотопов технеция и свинца в земной коре. Результаты высокоточных измерений содержания радиоуглерода в кольцах деревьев и прироста годичных колец за последние 8 тыс. лет выявили корреляцию между глубокими минимумами солнечной активности и депрессиями годичных колец.*

Проблема будущего Солнца и Солнечной системы обсуждается в последние годы с нарастающей активностью. Для построения конкретной теоретической модели настоящего и будущего Солнца требуется знание динамики процессов в солнечном веществе за большой интервал времени, миллионы и даже миллиарды лет. Единственным источником такой информации являются те природные архивы, которые способны фиксировать время поступления солнечного сигнала, его тип и амплитуду.

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ АРХИВЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Земная кора является перманентным детектором космических частиц и излучений. Только она создает принципиальную возможность установить динамику генерации термоядерной энергии в глубоких недрах Солнца за последние десятки миллионов лет. Эта возможность связана с прецизионными измерениями содержания изотопов свинца и технеция в веществе земной коры [1, 2].

Годичные кольца деревьев уже стали традиционным источником количественных данных о временных вариациях интенсивности галактических космических лучей на шкале времени от современности до 10 тыс. лет назад. Ширина годичных колец и их изотопный состав содержат информацию о солнечной активности и климатических эффектах на большой шкале времени в прошлом. Недавно было установлено, что по ширине годичных колец можно даже восстановить динамику солнечной активности на огромной шкале времени вплоть до 25 млн лет назад.

Полярный лед также является важным источником информации о вспышечной активности Солнца, взрывов сверхновых звезд и климатических эффектов. Частота и амплитуда солнечно-вспышечных протонов определяются по концентрации нитратов в датированных

# ФИЗИКА

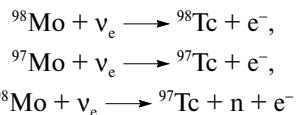
слоях полярного льда. Амплитудно-временные характеристики взрывов сверхновых звезд устанавливаются путем измерения временного хода концентрации космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в датированных независимо образцах полярного льда. Эти изотопы образуются в ядерных реакциях в атмосфере Земли под действием галактических космических лучей, источником которых считаются взрывы сверхновых звезд. Эти же изотопы генерируются и под действием гамма-квантов космической природы. Согласно современному представлению, при взрыве сверхновых звезд образуются как высокоэнергичные протоны, так и жесткие гамма-кванты. Полярный лед является уникальным детектором амплитудно-временных характеристик космического гамма-излучения и высокоэнергичных протонов. Шкала времени получения астрофизической информации с использованием полярного льда в настоящее время охватывает сотни тысяч лет.

Таким образом, обнаруженные и разработанные уже архивы позволяют исследовать природу физических процессов по всему объему Солнца на огромной шкале времени в прошлом. Совместный анализ результатов современных прецизионных измерений солнечных излучений и частиц с данными расшифровки природных архивов может позволить получить уникальную информацию о солнечно-земных связях в далеком прошлом. Такая информация необходима не только для восстановления истории Солнца, но и для предсказания будущего Солнечной системы.

## СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО О ТЕРМОЯДЕРНОЙ ИСТОРИИ СОЛНЦА

Нейтринная палеоастрофизика — относительно новая область науки, экспериментально еще не реализована. Здесь мы лишь кратко рассмотрим основные возможности этой области науки по термоядерной истории Солнца. Идея базируется на генерации в земной коре характерных изотопов под действием солнечных нейтрино различной энергии.

Реакция  $^{205}\text{Tl} + \nu_e \longrightarrow ^{205}\text{Pb} + e^-$  чувствительна к нейтрино малых энергий из-за низкого порога реакции (43 кэВ) и большого потока pp-нейтрино. Источником этой группы нейтрино является первая реакция протон-протонного цикла  $p + p \longrightarrow ^2\text{D} + e^+ + \nu_e$ . Поскольку эта реакция наиболее медленная в протон-протонном цикле, она является прямым индикатором мощности горения водорода в недрах Солнца. Сравнение результатов Tl-Pb эксперимента с данными современных исследований с галлиевым детектором позволит ответить на вопросы, является ли водород единственным горючим и меняется ли мощность горения водорода во времени. Оба вопроса являются принципиально важными. Эксперименты на основе реакций



чувствительны к нейтрино высокой энергии ( $^8\text{B}$ -нейтрино). Поскольку поток  $^8\text{B}$ -нейтрино очень сильно зависит от центральной температуры Солнца, результаты таких экспериментов в сочетании с данными современных исследований позволят ответить на вопрос фундаментальной важности о динамике физических условий в ядре Солнца.

Установлено, что для таллиевого эксперимента наилучшими являются лоренциты в Югославии. Руда из Колорадо удовлетворяет необходимым требованиям с молибденовым детектором. Выделение из огромной массы детекторов небольшого количества атомов свинца и молибдена и их счет — задача чрезвычайного масштаба и трудности. Эксперименты по нейтринной палеоастрофизике являются крупномасштабными, долгостоящими и требуют сотрудничества многих стран. Учитывая фундаментальную важность проблемы, можно надеяться, что в новом столетии экспериментальная нейтринная палеоастрофизика будет одной из центральных областей науки.

## ГОДИЧНЫЕ КОЛЬЦА ДЕРЕВЬЕВ О ГЛУБОКИХ МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Профессор Новороссийского университета Федор Никифорович Шведов был первым, кто понял уникальные возможности годичных колец деревьев для изучения окружающей среды. Его статья “Дерево как летопись засух” была опубликована в 1892 году в журнале “Метеорологический вестник”. В настоящее время исследования по дендрохронологии, дендроклиматологии и изотопному составу годичных колец деревьев ведутся во многих странах. Есть все основания считать основоположником этой комплексной области науки нашего соотечественника Ф.Н. Шведова.

В 1965 году Б.П. Константинов и автор настоящих строк сформулировали комплексную проблему “Астрофизические явления и радиоуглерод”, основанную на высокоточном измерении содержания радиоуглерода в годичных кольцах деревьев [3]. За прошедшие 30 лет выполнен большой цикл дендроклиматологических и радиоуглеродных исследований учеными России, Литвы, Украины, Грузии под руководством автора данной статьи. Ниже будут рассмотрены наиболее яркие результаты в контексте обсуждаемой в работе проблемы.

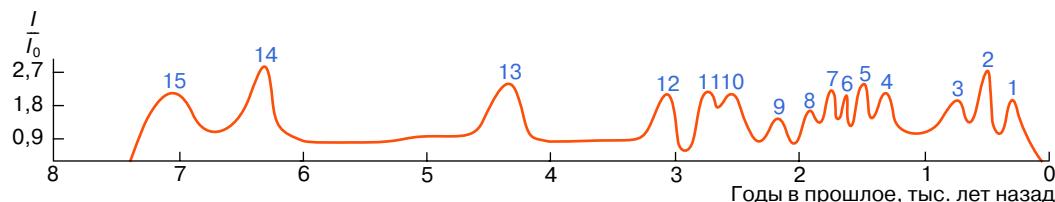
Основное внимание в исследованиях было удалено проблеме долговременных вариаций интенсивности галактических космических лучей путем высокоточных измерений содержания радиоуглерода в годичных коль-

цах деревьев. Напомним, что радиоуглерод  $^{14}\text{C}$  генерируется в атмосфере Земли в ядерных реакциях, инициируемых космическими лучами. Затем радиоуглерод совместно со стабильными изотопами  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  попадает в годичные кольца деревьев. Внесенная в кольца информация сохраняется сотни и тысячи лет. Поэтому, определяя содержание радиоуглерода в точно датированных кольцах деревьев, можно восстановить временной ход галактических космических лучей на большой шкале времени в прошлом. Известно, что с ростом энергии поток космических лучей падает. Однако чем больше энергия частиц, тем легче преодолеть магнитный экран Солнца и достичь атмосферы Земли. В результате компромисса эффективной оказывается область энергии космических лучей от 200 до 50 000 МэВ. Эффект динамики магнитного экрана хорошо проявляется в эпохи глубоких и протяженных минимумов солнечной активности.

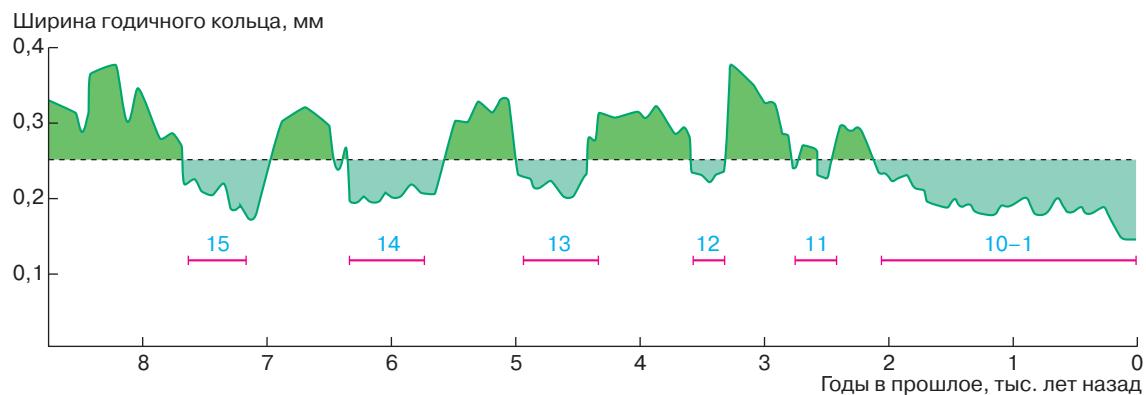
На рис. 1 приведены экспериментальные данные по временному ходу интенсивности галактических космических лучей за последние 8 тыс. лет, восстановленные по данным высокоточных измерений содержания радиоуглерода в датированных кольцах деревьев [4]. Видно, что в жизнедеятельности Солнца были регулярные и длительные минимумы активности, подобные

маундеровскому минимуму (1645–1715 годы). Теория таких минимумов еще не разработана.

Уникальные очевидцы прошлого – кольца деревьев не только помнят погодичный ход содержания радиоуглерода в земной атмосфере, но и концентрации стабильных изотопов  $^{13}\text{C}$  и дейтерия, которые являются индикаторами палеотемпературы. Кроме того, ширина годичных колец деревьев содержит не только информацию о солнечной активности, но и о локальных условиях (температура, осадки и т.д.). Проведенный нами анализ [5] закономерностей приростов сосны остистой в засушливых горных районах США позволил выявить глубокие депрессии в приростах годичных колец (рис. 2), синхронных с максимумами интенсивности галактических космических лучей (см. рис. 1). Ясно, что основным дирижером восьмитысячелетнего глобального земного представления является Солнце. Обращает на себя внимание, что характерный масштаб регулярного уменьшения амплитуды депрессии прироста составляет 5000 лет. Возможно, здесь проявляется модулирующее действие автоколебаний климатической системы атмосфера – глубинный океан – ледники. В течение последних двух тысячелетий наблюдалось понижение среднего уровня приростов, на фоне которого тем не менее отчетливо проявляются минимумы, синхронные с минимумами солнечной активности.



**Рис. 1.** Временной ход концентрации радиоуглерода в годичных кольцах деревьев за последние 8 тыс. лет



**Рис. 2.** Прирост годичных колец деревьев на шкале времени последние 8 тыс. лет

Наиболее подробно по косвенным данным изучена эволюция Солнца за последнее тысячелетие. Как в вариациях содержания радиоуглерода в кольцах деревьев, так и по содержанию  $^{10}\text{Be}$  в кернах антарктических и гренландских льдов надежно установлены три экстремальных периода деятельности Солнца: маундеровский, шпереровский и Вольфа. Анализ пяти хронологий хвойных пород деревьев в горных и северных районах Восточной Европы и Западной Сибири позволяет заключить, что наблюдается не только повсеместное синхронное снижение приростов в указанные периоды, но и совпадение характерных деталей вариаций как по ширине колец, так и по содержанию радиоуглерода в них.

Таким образом, можно заключить, что периоды типа минимума Маундера являются характерными для эволюции Солнца, приводя к глобальным изменениям на Земле, четко фиксируемым кольцами деревьев.

## ПОГОДИЧНЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ НИТРАТОВ В ПОЛЯРНОМ ЛЬДУ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 415 ЛЕТ, СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

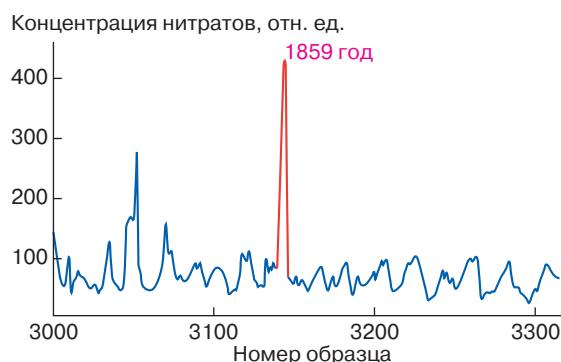
Десять лет назад Г.А. Дрешхофф, Е.Дж. Зеллер и Г.Е. Кочаров подробно обсудили проблему глубоких минимумов Солнца и пришли к выводу о необходимости комплексного подхода с использованием методов космогенных изотопов (ФТИ РАН) и нитратного (Канзасский университет, США).

В 1992 году была организована специальная экспедиция в Гренландию, которая позволила получить уникальные данные по концентрации нитратов за интервал времени с 1576 до 1991 года (415 лет).

Космогенный радиоуглерод позволяет установить временные вариации галактических космических лучей солнечной активностью. Концентрация же нитратов в полярном льду является индикатором времени и мощности солнечной вспышки. Специалистам в области солнечных вспышек хорошо известна вспышка 1859 года (карлингтоновская вспышка). В оптическом диапазоне она была очень мощной. Нитратный архив позволил определить интенсивность и временную структуру потоков ускоренных протонов от этой вспышки (рис. 3). Протонный сигнал также оказался очень большим.

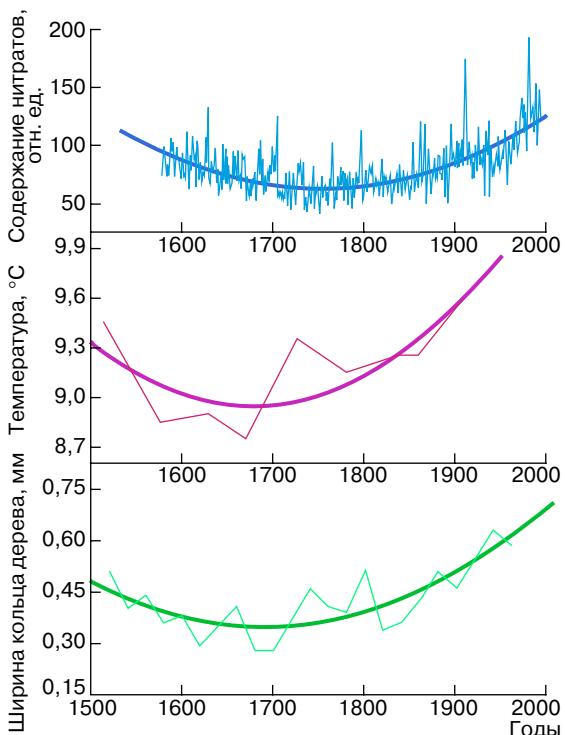
В рамках научного сотрудничества между ФТИ РАН и Университетом штата Канзас (США) проведена статистическая обработка уникальных данных с использованием некоторых методов анализа: спектральный, спектрально-временной, когерентно-временной.

Основные выводы выполненных исследований следующие.



**Рис. 3.** Нитратный след мощной вспышки 1859 года

1. Максимумы концентрации нитратов за период с 1715 года до настоящего времени коррелируют с фазами роста и спада солнечной активности. Этот вывод полностью согласуется с данными прямых регистраций солнечных протонов за последние 40 лет. Такое согласие и значительное расширение диапазона времени от четырех до 25 солнечных циклов свидетельствуют в пользу фундаментальности явления.



**Рис. 4.** Сравнительный анализ временного хода концентрации нитратов в полярном льду и вариации температуры по различным индикаторам: температура центральной Англии, ширина годичных колец сосны в Калифорнии

## ФИЗИКА

2. Во время маундеровского минимума солнечной активности в нитратном сигнале нет 5,5-летней гармоники, что можно рассматривать как свидетельство отсутствия в период глубокого минимума значительных протонных вспышек.

На рис. 4 представлены имеющиеся данные по различным температурным индикаторам в сравнении с погодичным ходом концентрации нитратов в центральной Гренландии. Несмотря на неполноту приведенных данных, можно предположить, что долговременный тренд концентрации нитратов имеет климатическую природу.

В заключение отметим, что имеются и другие природные детекторы частиц и излучений. Очень перспективным объектом является лунный грунт. Он содержит уникальную информацию о количественной истории генерации солнечных космических лучей. Хранителем такой информации являются изотопы, генерированные в лунном грунте солнечными космическими лучами. Сама солнечная атмосфера также содержит информацию о генерации в ней различных изотопов солнечными космическими лучами. Прецизионные измерения изотопного состава солнечного ветра, гамма-линии спокойного Солнца и концентрации характерных изотопов в лунном грунте позволят установить интимные особенности жизнедеятельности Солнца за десятки

миллионов лет. Этой проблеме автор надеется посвятить специальную статью.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кочаров Г.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 1996. Т. 60, № 8. С. 112.
2. Кочаров Г.Е., Огурцов М.Г. // Современные проблемы солнечной цикличности. Санкт-Петербург: Гл. астрон. обсерватория, 1997. С. 130.
3. Константинов А.Н., Кочаров Г.Е. // Докл. АН СССР. 1965. Т. 165, № 1. С. 63.
4. Кочаров Г.Е., Васильев В.А., Дергачев В.А., Острыakov В.М. // Письма в "Астрон. журн.". 1983. Т. 4. С. 206–210.
5. Кочаров Г.Е., Константинов А.Н., Острыakov В.М., Ступнева А.И. // Солнеч. данные. 1986. № 4. С. 84–89.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

\* \* \*

Грант Егорович Кочаров, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой космических исследований Санкт-Петербургского государственного технического университета, член-корреспондент РАН. Область научных интересов – нейтринная астрофизика, физика Солнца, астрофизика космических лучей. Основатель новой области науки “Палеоастрофизика”. Автор более 400 публикаций, в том числе пяти монографий.