

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ
ИЗОТОПОВ
В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ
ЯВЛЕНИЯ

Ленинград
1984


АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А. Ф. ИОФЕ - 20

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ИЗОТОПОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

(Тематический сборник)

Ленинград
1984

С о д е р ж а н и е

1. Г.Е.КОЧАРОВ, Н.И.АКАТОВА, В.В.АЛЕКСЕЕВ, Т.Т.БИТВИНСКАС, В.А.БАСИЛЬЕВ, А.Н.КОНСТАНТИНОВ, Ю.Н.МАРКОВ, Р.Я.МЕЦХВАРИШВИЛИ, С.Л.ЦЕРЕТЕЛИ, В.П.ШАХОВ. 11-ти и 22-летние циклы до, во время и после маундеровского минимума солнечной активности	5
2. В.М.ОСТРЯКОВ. Проявления долговременных вариаций космических лучей в радиоуглеродных данных.	25
3. В.А.ЛЕВЧЕНКО, А.В.БЛИНОВ. Расчёт скорости образования радиоизотопов в атмосфере Земли . .	61
4. Т.Т.БИТВИНСКАС. Дендрохронология на службе проблемы "Астрофизические явления и радиоуглерод"	75
5. Т.Т.БИТВИНСКАС, Р.Я.МЕЦХВАРИШВИЛИ, А.В.СТУПНЕВА. Солнечная активность, радиоуглерод и радиальный прирост.	84
6. В.И.ЧЕСНОВОВ. Хронология проведения работ по поиску образцов точно датированной древесины и проведению радиоуглеродных измерений в рамках общей проблемы "Астрофизические явления и радиоуглерод"	106
7. В.А.АЛЕКСЕЕВ, А.И.ИВЛИЕВ, А.К.ЛАВРУХИНА. Применение радиоуглерода для измерения малых количеств азота нейтроноактивационным методом в природных объектах.	121
8. Я.Д.ЯНСОНС, А.А.КРИСТИН. Последимпульсы в фотоэлектронных умножителях, применяемых в оцинтилляционной технике.	129
9. А.А.КРИСТИН. Устройство отбора для оцинтилляционных установок	145

Под общей редакцией Г.Е.Кочарова

Contents

1. G.E.KOCHAROV, N.I.AKATOVA, V.B.ALEKSEEV, T.T.BITVINSKAS, V.A.VASILIEV, A.N.KONSTANTINOV, Yu.N.MARKOV, R.Ya.METSKHVARISHVILI, S.L.TSERETELI, B.P.SHACHOV.	11- and 22-years cycles before, during and after Maunder Minimum of Solar activity.	5
2. V.M.OSTRYAKOV.	Display of the long-term cosmic ray variations in the radiocarbon data.	25
3. V.A.LEVCHENKO, A.V.BLINOV.	The production rate of cosmogenic radionuclides in the atmosphere of the Earth.	61
4. T.T.BITVINSKAS.	Dendrochronology in the research the problem "Astrophysical phenomena and radiocarbon.	75
5. T.T.BITVINSKAS, R.Ya.METSKHVARISHVILI, A.V.STUPNEVA.	Solar activity, radiocarbon and tree increment.	84
6. V.I.GHESNOKOV.	The chronology of research on obtaining the high accuracy dated wood samples and radiocarbon measurements in the framework of the national problem "Astrophysical phenomena and radiocarbon".	106
7. V.A.ALEXIEV, A.I.IVLIEV, A.K.LAVRUKHINA.	Use of radiocarbon for measurements of small quantities of nitrogen by neutron activation method in neutral objects.	121
8. Ya.L.YANSONS, A.A.KRISTIN.	Afterpulses in the photo-multipliers used in scintillation counting.	129
9. A.A.KRISTIN.	Selection device for scintillation counting.	145

II-ТИ И 22^Х-ЛЕТНИЕ ЦИКЛЫ ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ МАУНДЕРОВСКОГО МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Г.Е.Кочаров, Н.И.Акатова, В.Б.Алексеев,
Т.Т.Битвинскас, В.А.Васильев, А.Н.Константинов,
Ю.Н.Марков, Р.Я.Метсхваришвили, С.Л.Церетели, Б.П.Шахов

А н н о т а ц и я

Проводится анализ полученных экспериментальных данных о концентрации радиоуглерода в годовичных кольцах деревьев на шкале времени, охватывающей период Маундеровского минимума. Сделаны следующие основные выводы: 1) содержание радиоуглерода в атмосфере Земли во время Маундеровского минимума было в среднем на 2,2-2,4% выше нормального уровня, что объясняется ослаблением солнечной активности; 2) на общем фоне повышения концентрации космогенных изотопов в атмосфере Земли обнаружены 22-х и II-летние флуктуации, обусловленные модулирующим действием Солнца.

11- AND 22-YEARS CYCLES BEFORE, DURING AND AFTER MAUNDER MINIMUM OF SOLAR ACTIVITY

G.E.Kocharov, N.I.Akatova, V.B.Alekseev,
T.T.Bitvinskass, V.A.Vasiliev, A.N.Konstantinov,
Yu.N.Markov, R.Ya.Metskvarishvili, S.L.Tseretely, B.P.Shachov

A b s t r a c t

Experimental data on the radiocarbon abundance in the tree rings during the time interval including the period of Maunder minimum have been considered. The following main conclusions have been made: 1) radiocarbon abundance in the Earth's atmosphere during Maunder minimum was higher 2,2-2,4% than during the period of normal solar activity due to the decreasing of solar activity; 2) 22- and 11-years variations of radiocarbon abundance and cosmic ray intensity are discovered during Maunder minimum.

II-ти и 22^х-летние циклы до, во время и после маундеровского минимума солнечной активности

Г.Е.Кочаров, Н.И.Акатова, В.Б.Алексеев,
Т.Т.Битвинская, В.А.Васильев, А.Н.Константинов,
Ю.Н.Марков, Р.Я.Мещваридзе, С.Л.Церетели, Б.П.Шахов

В в е д е н и е

Важность изучения процессов, протекающих в солнечном веществе, непрерывно растёт. Возникли и успешно развиваются научные направления, нацеленные на установление характеристик внутренней структуры Солнца и природы энерговыделения (нейтринная астрофизика); конкретных механизмов мощного энерговыделения в атмосфере Солнца (физика солнечных вспышек); характер прямого и косвенного воздействия солнечной активности на земные процессы (физика солнечно-земных связей). Эти направления развиваются в большой степени независимо друг от друга как в экспериментальном плане, так и в теоретическом. В то же время ясно, что "главный дирижер" находится в центральной части Солнца и в конечном итоге он определяет все многообразие процессов на Солнце и в гелиосфере.

Подчеркивая принципиальное значение исследований в области нейтринной астрофизики и физики солнечных вспышек, хотелось бы отметить исключительную важность изучения природы процессов, протекающих на участке от недр Солнца до фотосферы. Именно этот участок не доступен в настоящее время для прямых экспериментов. В то же время, согласно существующему представлению, здесь разыгрываются процессы, играющие решающую роль в формировании глобальных свойств Солнца. Одно из проявлений глобальных свойств заключается в модуляции интенсивности галактических космических лучей. Поэтому, определение на опыте временного хода интенсивности космических лучей позволяет изучать характеристики протекающих под фотосферой процессов. Такие исследования особенно важно проводить с высоким временным разрешением и на большой шкале времени. В настоящее время имеется только одна возможность проведения таких работ. Она связана с высокоточными измерениями содержания космогенных изотопов в датированных образцах.

Измерения концентрации радиоуглерода в датированных кольцах деревьев позволяют проводить исследования с разрешением в 1 год на шкале времени в десятки, сотни и тысячи лет. В последние годы интенсивное развитие получили исследования концентрации ^{10}Be в ядрах полярного льда, датированных независимым образом. Здесь уже достигнута разрешающая способность по времени в несколько лет и реализованы первые эксперименты на шкале времени сотни и тысячи лет.

В данной работе мы обсудим результаты исследований на шкале времени, охватывающей Маундеровский минимум солнечной активности. Экстремальные состояния солнечной активности представляют особый интерес. Во-первых, потому что такие состояния могут быть проявлением одного или нескольких ярко выраженных процессов, характеристики которого (которых) можно установить. С другой стороны, переход в экстремальное состояние и выход из него может сопровождаться изменением уже известных глобальных свойств. Как и следовало ожидать, в поле зрения, прежде всего, попал общеизвестный одиннадцатилетний цикл солнечной активности. Возникла необходимость выяснения вопросов: была ли 11-летняя цикличность до минимума и, если была, то отличались ли её характеристики от характеристик в современную эпоху; была ли цикличность во время минимума вообще и т.д. Изучение комплекса таких и подобных вопросов является составной частью общесозданной проблемы "Астрофизические явления и радиоуглерод", сформулированной в 1965-1967 гг. [1].

Возможности изучения солнечной активности по космогенным изотопам ^{10}Be и ^{14}C

Космогенные изотопы образуются при взаимодействии частиц космических лучей с атмосферой Земли. Источником радиоуглерода является реакция захвата тепловых нейтронов вторичной компоненты космических лучей ядрами атомов азота - $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. Бериллий-10 образуется в реакциях $^{14}\text{N}(n, x)^{10}\text{Be}$, $^{10}\text{O}(n, x)^{10}\text{Be}$ (здесь N - нуклон, x - некий набор продуктов реакции). Эти изотопы быстро окисляются до CO_2 и BeO и включаются в геофизические и геохимические процессы. Окись углерода распределяется в глобальной

углеродообменной системе, окись бериллия захватывается атмосферными аэрозолями и выпадает на поверхность Земли вместе с ними. Соответственно различны и образцы, в которых изучают эти изотопы: для исследований радиоуглеродным методом применяются в основном кольца деревьев, содержание же бериллия-10 измеряется в полярных льдах и донных отложениях океанов.

Изучение каждого из рассматриваемых изотопов имеет свои преимущества и недостатки. Высокая скорость образования ^{14}C ($2,2 \text{ атом/см}^2 \text{ с}$) и сравнительно малый период полураспада (5730 лет) позволяют использовать хорошо разработанные радиометрические методы измерений. Применение этих методов для измерения концентрации ^{10}Be в образцах связано с большими трудностями вследствие малой скорости образования ($2 \cdot 10^{-2} \text{ атом/см}^2 \text{ с}$) и большого периода полураспада ($1,5 \cdot 10^6 \text{ лет}$). Поэтому применяется более сложный и дорогостоящий метод ускорительной масс-спектрометрии. С другой стороны, изучение радиоуглерода требует учёта сложных процессов переноса в углеродообменной системе. Углеродообменная система действует как высокочастотный фильтр, что приводит к уменьшению быстрых процессов и сдвигу фазы. Такое действие углеродной системы затрудняет изучение высокочастотной компоненты вариации скорости генерации радиоуглерода и, соответственно, интенсивности космических лучей. С другой стороны, облегчаются условия выделения вариации с характерными временами больше 11 лет, поскольку 11-летняя волна является наиболее мощной в интенсивности космических лучей. В то же время скорость образования ^{10}Be линейно связана с его концентрацией в образце. Большой период полураспада ^{10}Be позволяет с его помощью исследовать процессы на более длительной временной шкале. Сопоставление данных ^{14}C и ^{10}Be открывает новые уникальные возможности как в изучении интенсивности космических лучей и солнечной активности, так и свойств углеродного резервуара.

Основными образцами, в которых изучается радиоуглерод, являются годовые кольца деревьев. Разработаны методы построения дендрохронологии, позволяющие точно датировать образцы возрастом до нескольких тысяч лет (см. работу Т.Т. Битвинского в настоящем сборнике). Надежны методики химической обработки образцов: синтеза бен-

зола из древесины и его очистки. Образцы льда, в которых изучается содержание ^{10}Be , берутся из ледников Гренландии и Антарктиды. Датировка льдов производится по сезонным вариациям отношения изотопов кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

Для измерений содержания радиоуглерода в образцах используется в основном жидкостной сцинтилляционный метод. В качестве сцинтиллятора используется бензол, синтезированный из древесины образца, со сцинтилляционными добавками (PPO или паратерфенил и сместитель спектра POFOP). Схемы установок весьма многообразны: одно-, двух- и многоканальные; со стабилизацией световым импульсом и без неё; на транзисторах и интегральных микросхемах. В рамках всесоюзной комплексной проблемы "Астрофизические явления и радиоуглерод" измерения проводятся в нескольких лабораториях: в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе АН СССР, Ленинградском отделении Института археологии АН СССР, в Тбилиском и Ленинградском госуниверситетах, в Уральском педагогическом институте. Установки для измерения активности радиоуглерода сцинтилляционным методом постоянно совершенствуются. Одноканальным установкам (см., напр., [2]) пришли на смену двухканальные с принудительной стабилизацией и без неё (напр., [3, 4, 5]) и многоканальные [6]. Повышение уровня автоматизации измерений, переход на интегральные микросхемы позволили повысить точность и надежность результатов. В настоящее время относительная погрешность измерений не превышает 0,3%. Разработаны методы математической обработки результатов измерений, позволяющие повысить надежность и достоверность результатов [7, 8].

Развитие в последние годы метода ускорительной масс-спектрометрии позволило добиться чувствительности $\leq 10^7$ атомов ^{10}Be при погрешности $\leq 10\%$. Наибольший интерес для получения астрофизической информации представляют измерения содержания ^{10}Be во льдах. Эти исследования проводят в основном две группы: в Швейцарии [9] и Франции [10]. Однако, из-за сложности и трудоёмкости эксперимента число полученных результатов еще невелико.

Задача восстановления интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечной активности по измерениям концентрации ^{14}C ($\Delta^{14}\text{C}$) в датированных образцах решается в два этапа:

1) нахождение скорости образования Q ; 2) вычисление интенсивности ГКЛ и параметров солнечной активности. Для решения первой части задачи необходимо было разработать модели углеродообменной системы, позволяющие восстанавливать скорость образования ^{14}C . Такие модели были созданы, исследованы их характеристики [11, 12, 13, 14]. Вторая часть задачи решается на основе расчётов скорости образования ^{14}C частицами космических лучей. На основе этих расчётов были получены простые формулы, аппроксимирующие зависимость от скорости образования ^{14}C интенсивности ГКЛ, числа Вольфа и других характеристик пятнообразовательной активности Солнца [14, 15]:

$$I = 385 \cdot Q^{2.45}, \quad (1)$$

$$W = 366 - 143 \cdot Q, \quad (2)$$

$$2^{\alpha} 4^{\beta} = 0.003 (38 - \Delta Q)^{4.2}, \quad \text{где} \quad (3)$$

I - интенсивность ГКЛ в интервале энергий 0,2-50 ГэВ ($\text{м}^{-2} \text{с}^{-1} \text{отер}^{-1}$),
 W - числа Вольфа, α и β - число групп солнечных пятен и их средняя гелиоширота.

По полученным формулам были восстановлены параметры солнечной активности по $\Delta^{14}\text{C}$ в те периоды времени, когда проводились прямые измерения этих параметров. Хорошее согласие результатов может служить подтверждением правильности полученных формул [14]. Для интервалов времени, в которых известны параметры солнечной активности, можно разделить вариации интенсивности ГКЛ, связанные с пятнообразовательной деятельностью Солнца и вызванные другими причинами, в частности, влиянием общего магнитного поля Солнца [14, 15]. Таким образом, разработана методика восстановления интенсивности ГКЛ и параметров солнечной активности. С помощью этой методики получены конкретные физические результаты: интенсивность ГКЛ за 8000 лет [13], а также интенсивность ГКЛ и числа Вольфа на более коротких временных шкалах [14, 16].

Скорость образования бериллия-10 Q и его концентрация в образце льда n связаны соотношением:

$$Q = A \cdot n \cdot v,$$

где A - коэффициент, учитывающий широтную зависимость скорости

выпадения аэрозолей; v - скорость аккумуляции льда. Величины A и v могут изменяться во времени, но эти изменения определяются независимыми методами. Связь скорости образования бериллия-10 с параметрами солнечной активности и потоком ГКЛ устанавливается путем применения диаграммного метода расчёта адронного каскада в атмосфере Земли [17, 18]. Таким образом, можно восстановить интенсивность ГКЛ и параметры солнечной активности по содержанию космогенного бериллия-10 в датированных образцах [19, 20].

На основе приведённых выше методик восстановления интенсивности ГКЛ по содержанию космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в земных образцах был разработан метод совместного анализа данных по двум изотопам [21, 22]. При этом открывается ряд новых возможностей: в частности, можно обнаружить мощные солнечные вспышки (типа вспышки 23.02.1956 г.) и другие процессы вспышечного типа, калибровать модели углеродообменной системы (в частности, была получена величина коэффициента ослабления [23]) и исследовать состояние этой системы в прошлом.

Экспериментальные данные и их интерпретация

1. 11-летний цикл

В рамках всесоюзной комплексной программы "Астрофизические явления и радиоуглерод" к настоящему времени получен обширный экспериментальный материал по определению содержания радиоуглерода в годовичных кольцах деревьев за последние ~400 лет. В настоящей работе для нас представляют интерес вариации $\Delta^{14}\text{C}$, связанные с циклической деятельностью солнечной активности, и возможность восстановления по радиоуглеродным данным интенсивности космических лучей и параметров солнечной активности в прошлом.

Рассмотрим сначала наиболее известный - 11-летний цикл солнечной активности. Первые указания на то, что в радиоуглеродном ряду проявляются колебания, связанные с этим циклом, были получены в 1971-1973 гг. [24-26], а наиболее подробные измерения проведены к 1976-1978 гг. [27-29]. Анализ этих результатов пока-

зал, что за последние 200 лет в данных по $\Delta^{14}\text{C}$ имеются колебания с периодом ~ 11 лет и амплитудой 1,0–1,5%, которые проявляют хорошую антикорреляцию с солнечной активностью при запаздывании 4–5 лет. На основе описанной выше методики по этим данным были восстановлены интенсивность космических лучей и параметры солнечной активности [12, 14, 16, 30]. Отметим, что полученный ход чисел солнечных пятен в XIX в. [14] хорошо согласуется по фазе и амплитуде с данными прямых наблюдений.

В связи с обсуждавшейся в последнее время проблемой о природе Маундеровского минимума солнечной активности (1645–1715 гг.) наибольший интерес приобретает вопрос о сохранении цикличности в радиоуглеродных данных непосредственно до этого периода и в течение самого минимума. Первые экспериментальные результаты, указывающие на наличие изменений в концентрации ^{14}C с характерным временем ~ 11 лет до начала Маундеровского минимума (1564–1583 и 1593–1615 гг.) и в конце минимума (1688–1712 гг.) получены в 1973 году [25, 26]. В последнее время получены результаты о колебаниях в данных о $\Delta^{14}\text{C}$, близких к 11-летнему циклу и за период 1660–1679 гг. [16]. Однако эти данные получены за относительно короткие интервалы времени и могут быть объяснены как действием модуляции, так и вспышками на Солнце или сверхновой звезды. Подробные исследования вариаций в концентрации радиоуглерода и связанных с ними изменений солнечной активности за период 1600–1730 гг. проведены в работе [14]. Измерения концентрации, проведенные с шагом 2 года, показали наличие 11-летней цикличности в данных по $\Delta^{14}\text{C}$ за 1600–1645 гг. и после окончания Маундеровского минимума. В течение же самого минимума характерное время изменений данных по $\Delta^{14}\text{C}$ составляет ~ 20 лет, а более мелкомасштабных колебаний выявлено не было. По этим экспериментальным данным был впервые восстановлен погодичный ход чисел Вольфа за 1600–1710 гг., который показал хорошее согласие с эпохами максимумов солнечных циклов, предсказанных по пятнам, видимых невооруженным глазом.

Таким образом, можно считать установленным наличие 11-летней цикличности в радиоуглеродных данных и в солнечной активности как до начала Маундеровского минимума, так и после его окончания

вплоть до наших дней. Вопрос о характере изменений данных по $\Delta^{14}\text{C}$ и солнечной активности в течение Маундеровского минимума до последнего времени остается дискуссионным и его подробному изучению посвящены следующие разделы настоящей работы.

2. 22-летний цикл

В последние годы наряду с 11-летним циклом в изменении параметров солнечной активности и интенсивности космических лучей усиленно изучаются и 22-летние колебания. Как показывают теоретические исследования, в интенсивности космических лучей 22-летний цикл связан с изменением знака общего магнитного поля Солнца. Появились и первые экспериментальные подтверждения наличия таких колебаний в интенсивности космических лучей. Обзор этих работ дан в [14].

Естественно возникает вопрос, не могли бы радиоуглеродные исследования помочь в изучении этого вопроса, ведь им доступна значительно большая шкала времени, чем непосредственно прямым наблюдениям. В 1978 году [31] было впервые обращено внимание на то, что подробные данные о концентрации ^{14}C могут отражать ход изменения общего магнитного поля Солнца в прошлом. Однако, как показывают теоретические и экспериментальные исследования, амплитуда 22-летних колебаний в интенсивности космических лучей в современную эпоху при среднем уровне солнечной активности невелика и составляет для области энергий 0,2–50 ГэВ $\sim 10\%$ от амплитуды 11-летнего цикла. И хотя углеродообменная система, действующая как высокочастотный фильтр, 22-летний цикл, как более длительный, будет ослаблять меньше, чем 11-летний, в данных по $\Delta^{14}\text{C}$ трудно ожидать 22-летних колебаний с амплитудой больше 0,3%. Анализ экспериментальных данных по $\Delta^{14}\text{C}$ за период 1700–1900 гг., проведенный в работе [32], позволил выявить, хотя и на пределе точности измерений, колебания примерно с такой амплитудой, которые могут быть связаны с изменением общего магнитного поля Солнца.

Наиболее удобным для изучения этого эффекта, как отмечалось нами еще в [33] является период глубокого и продолжительного

минимума солнечной активности (1645-1715 гг.). Амплитуда 22-летних колебаний в это время могла быть существенно выше из-за того, что на Солнце было мало активных областей, и регулярность межпланетного магнитного поля практически не нарушалась. Действительно, как отмечалось выше, анализ измерений концентрации ^{14}C за 1600-1730 гг. показал [14], что в период Маундеровского минимума в данных по $\Delta^{14}\text{C}$ наблюдаются вариации с характерным временем ~ 20 лет и амплитудой 1,2-1,5%. Восстановленный из этих данных ход интенсивности космических лучей по амплитуде и фазе показал хорошее согласие с предсказаниями теории о поведении интенсивности космических лучей при изменении общего магнитного поля Солнца.

3. Вариации $\Delta^{14}\text{C}$ в Маундеровском минимуме

Характер и величина изменения концентрации радиоуглерода в период практически полного отсутствия солнечных пятен имеют принципиальное значение для понимания фундаментальных вопросов цикличности солнечной активности. Два наиболее подробных исследования, посвящённых изучению этого вопроса [14, 16], показали, что концентрация радиоуглерода в течение Маундеровского минимума претерпевает существенные изменения. В обеих работах отмечена значительная модуляция интенсивности космических лучей в это время, однако выводы относительно характера и причин этих изменений неоднозначны. Учитывая это, в рамках Всесоюзной комплексной программы "Астрофизические явления и радиоуглерод" проведены более подробные исследования по измерению годичной концентрации радиоуглерода за период 1650-1690 гг. с привлечением четырёх радиоуглеродных лабораторий страны: в Физико-техническом институте АН СССР, институте Археологии АН СССР, Уральском педагогическом институте, Тбилиском государственном университете.

Измерения концентрации ^{14}C в различных лабораториях проводились в одних и тех же образцах годичных колец, и можно считать, что полученные результаты дополняют друг друга. Количество измерений в лабораториях было не одинаково, однако общий ход концентрации в разных измерениях примерно одинаков. Поэтому, несмотря на отдельные различия можно считать, что полученные результаты

являются однородными, и представляется целесообразным в дальнейшем рассматривать обобщенный ряд, который получен вычислением среднего значения концентрации за те годы, когда имеется несколько измерений.

Рассмотрим теперь подробно поведение концентрации ^{14}C за период 1650-1690 гг. на основе обобщенного ряда (рис. I).

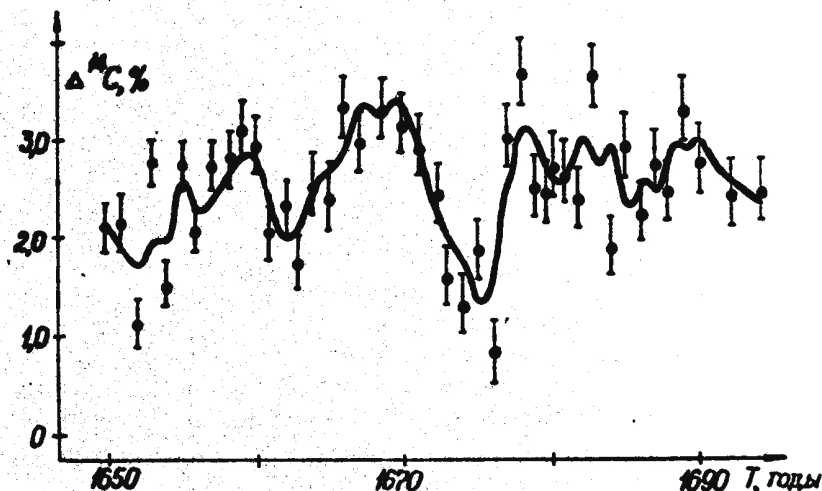


Рис. I. Концентрация радиоуглерода за 1650-1690 гг. (— — кривая сглаженная скользящим средним по трём точкам).

Во-первых следует отметить, что средняя величина $\Delta^{14}\text{C}$ за исследуемый интервал выше, чем в периоды нормального поведения Солнца (XIII-XIX вв. и в период до начала Маундеровского минимума), что согласуется с результатами предыдущих исследований [14]. Кроме этого, видны и существенные колебания в величине концентрации, достигающие 2%, что при точности измерений 0,3% является вполне значимым. Чтобы выяснить характер колебаний, выделим сначала вариации с характерной длительностью больше 11 лет. Для этого проведём сглаживание исходных данных методом скользящего среднего по 11 точкам. При этом в ряду $\Delta^{14}\text{C}$ подавляются все

колебания с периодами ≤ 11 лет. Результаты этой обработки представлены на рис.2.

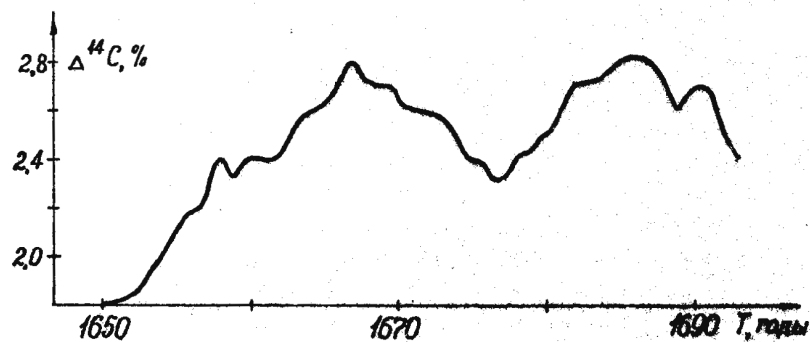


Рис.2. Крупномасштабные вариации в $\Delta^{14}\text{C}$.

Обращает на себя внимание наличие вариаций с характерным временем ~ 20 лет. Что касается амплитуды этих колебаний, то, учитывая, что при усреднении по половине периода амплитуда уменьшается примерно вдвое, можно из рис.2 оценить амплитуду ~ 20 -летних колебаний величиной 1,2–1,4%.

Для исследования более кратковременных колебаний в $\Delta^{14}\text{C}$ из экспериментальных данных (рис.1) вычтем долговременный тренд (рис.2). Результаты этой обработки представлены на рис.3, причём полученные данные при этом сглажены скользящим средним по трём точкам.

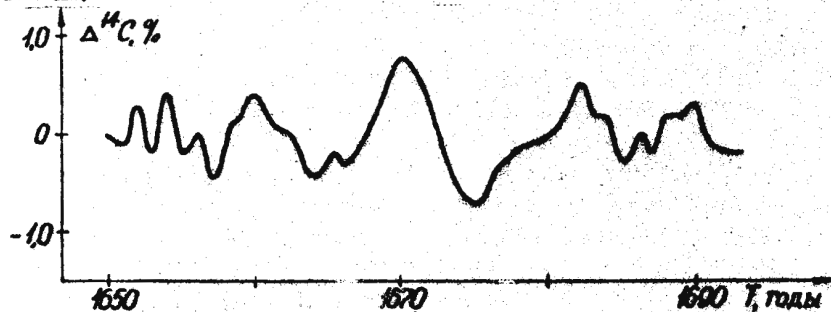


Рис.3. Кратковременные флуктуации в $\Delta^{14}\text{C}$.

При такой обработке сглаживаются возможные неточности отдельных измерений, а также естественные флуктуации в $\Delta^{14}\text{C}$ длительностью 1–2 года.

Исследуя поведение концентрации ^{14}C , представленной на рис.3, отметим, что наряду с долговременными колебаниями (~ 20 – ~ 22 года) в данных по $\Delta^{14}\text{C}$ присутствуют и менее длительные флуктуации с периодом, близким к 11-летнему циклу солнечной активности. Так, в приведённых результатах отчётливо проявляются максимумы в 1660 г., 1670 г. и в 1678–1680 годах. Два крайние цикла – в 1650 и 1690 годах выражены менее отчётливо, однако, если принять во внимание результаты работы [9], в которой отмечается резкое понижение концентрации от 50-х годов к 40-м и от 1690 к 1700 году, можно ожидать, что при рассмотрении более длинного ряда максимумы в районе 1650 и 1690 годов также проявятся. С другой стороны, возможно, что 11-летняя цикличность при существующей точности измерений 0,3% обнаружима не на всём протяжении Маундеровского минимума, т.к. средняя амплитуда её согласно данным, приведённым на рис.3, составляет величину 0,8–0,9%.

В заключение подведём итоги проделанной работы.

1. Подробные измерения концентрации радиоуглерода в годичных кольцах деревьев за период 1650–1690 гг., проведённые в различных радиоуглеродных лабораториях, подтвердили выводы, полученные в предыдущих работах [14,16], о наличии существенных флуктуаций в концентрации ^{14}C в период Маундеровского минимума.

2. В данных по $\Delta^{14}\text{C}$ обнаружены колебания с характерным временем ~ 22 года и амплитудой 1,2–1,4%, причём амплитуда и фаза этих колебаний хорошо согласуются с аналогичными вариациями, выявленными в работе [14] для всего периода Маундеровского минимума.

3. Так же, как и в работе [16], в настоящих исследованиях наблюдаются вариации с характерным временем ~ 11 лет. Однако их амплитуда меньше, чем амплитуда аналогичных колебаний в период нормального поведения солнечной активности [27–29] и составляет 0,8–0,9%. Фаза обнаруженных колебаний примерно совпадает с данными работы [16], но амплитуда в наших измерениях существенно

меньше. Это, возможно, объясняется тем, что исследований в работе [16] ряд был слишком короток, и это не позволило выявить и учесть более длительные колебания, на которые накладывается 11-летняя волна.

Таким образом, экспериментальные исследования по определению содержания радиоуглерода в образцах за последние 400 лет, проведённые в рамках программы "Астрофизические явления и радиоуглерод", показали наличие кратковременных флуктуаций. 11-летний цикл в данных по $\Delta^{14}\text{C}$ прослеживается на всей шкале времени, хотя в период Маундеровского минимума солнечной активности его амплитуда подавлена примерно вдвое. Обнаружены и колебания с характерным временем ~ 22 года, причём наиболее отчётливо они проявляются в Маундеровском минимуме, когда амплитуда этих колебаний превосходит амплитуду 11-летнего цикла. Проведённые исследования показали, что, возможно, 22-летние вариации в $\Delta^{14}\text{C}$ наблюдались и в последние два столетия, хотя амплитуда их невелика и находится на уровне ошибок измерений.

Представляется интересным сравнить результаты, полученные в рамках программы "Астрофизические явления и радиоуглерод" по кратковременным вариациям ^{14}C , с данными других исследователей. Наиболее подробные измерения, позволяющие обнаружить интересные нас флуктуации, проведены для другого космогенного изотопа - ^{10}Be . В 1983 году опубликованы данные о концентрации ^{10}Be во льдах с шагом два года за наше столетие [34]. В этих результатах выявляются колебания, связанные с 11-летним циклом солнечной активности. Как показал анализ [21], амплитуда и фаза этих колебаний хорошо согласуются с радиоуглеродными данными.

В 1983 году появились также подробные данные о концентрации ^{10}Be за промежуток времени 1100-1800 гг., охватывающий Маундеровский минимум солнечной активности [9]. Несмотря на то, что экспериментальные точки получены не равномерно на шкале времени и с усреднением по 3-7 лет, подробный спектральный анализ [35] позволил выявить кратковременные флуктуации в этом ряду. Показано, что в наиболее интересном для нас интервале 1505-1710 гг. чётко проявляется период 10,75 года, к тому же сохраняется фаза этого цикла. Проявляется также период ~ 20 лет, но меньшей ам-

плитуды. Рассмотрение данных по концентрации ^{10}Be за это время показывает следующие основные особенности (рис.4):

1. До ~ 1620 года в концентрации ^{10}Be прослеживается цикличность с периодом ~ 11 лет.
2. За период 1620-1720 гг. ярко выражены 4 "горба" длительностью ~ 20 лет и большой амплитуды.
3. В этот же период имеются колебания с характерным временем ~ 11 лет, но значительно меньшей амплитуды.

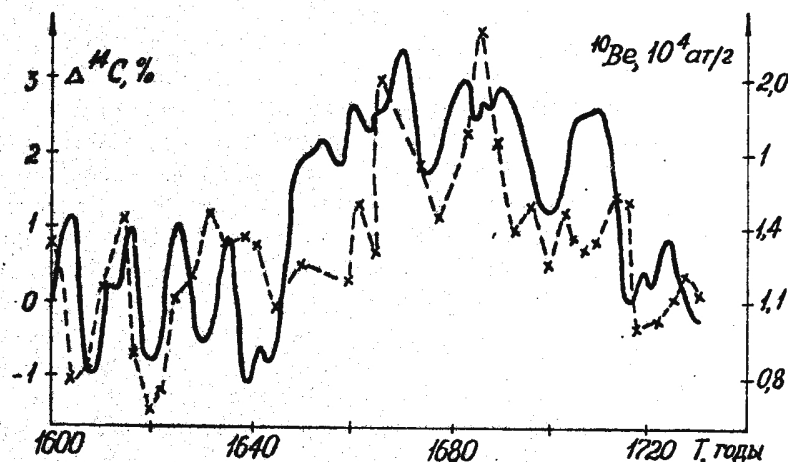


Рис.4. Концентрации космогенных изотопов ^{14}C (сглаженные по экспериментальным данным) и ^{10}Be (x---x) за 1600-1730 гг.

Совместный анализ данных по концентрации космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в XVII-XVIII вв. показывает удовлетворительное согласие временного хода концентраций. Что касается амплитуд колебаний двух космогенных изотопов, то их можно сравнить при восстановлении скорости их образования или интенсивности космических

* Результаты по $\Delta^{14}\text{C}$ взяты из работы [14] и дополнены результатами настоящих исследований.

лучей. Методика такого восстановления для двух изотопов приведена нами выше, и при применении её к полученным экспериментальным данным интенсивность космических лучей получается примерно одинаковой. Это видно и при анализе данных, приведённых на рис.5.

Исследование временных вариаций радиоуглерода зарубежными авторами проводится, в основном, на больших временных шкалах с использованием целых блоков древесных колец за 10-30 лет. Кратковременные флуктуации изучались только за последние ~150 лет и, при этом, на отдельных временных интервалах были обнаружены ~11-летние колебания с амплитудой 0,6-3% [36-39]. За период же, охватывающий Маундеровский минимум, имеются лишь усреднённые данные с шагом 10 лет. На рис.5 приведены наши данные, усреднённые по 10 лет, а также два ряда наиболее подробных и точных измерений других авторов [40,41]. Из сравнения видно, что в пределах экспериментальных ошибок данные разных измерений хорошо совпадают между собой. Они показывают среднее увеличение концентрации радиоуглерода в атмосфере Земли на 2,2-2,4% в период Маундеровского минимума, что связано с общим понижением солнечной активности.

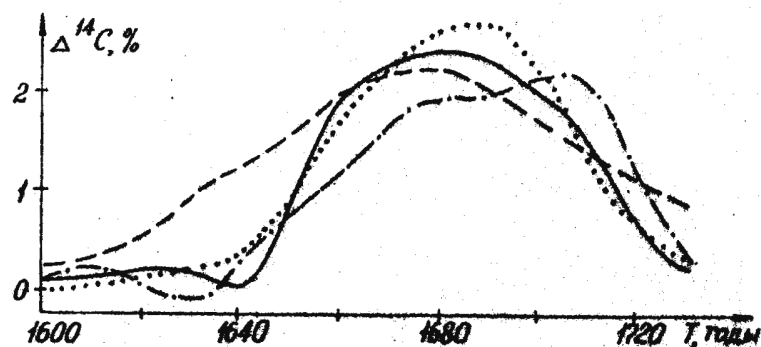


Рис.5. Данные по концентрации ^{14}C , усредненные по 10 лет.
(— — — результаты настоящей работы; - - - - - работы [40]; - · - · - работы [41]; - по ^{10}Be).

На этом же рисунке приведены данные о концентрации радиоуглерода, рассчитанные из результатов измерения концентрации другого космогенного изотопа ^{10}Be (при этом данные по ^{10}Be также усреднялись). Методика такого расчёта описана в [21], при этом по концентрации ^{10}Be определяется скорость его образования и интенсивность космических лучей. Зная последнюю, можно рассчитать скорость образования ^{14}C (эффективные диапазоны энергий космических лучей для этих изотопов примерно одинаковые) и, используя модель углеродообменной системы, определить величину $\Delta^{14}\text{C}$.

Выводы

1. Временной ход концентрации в годичных кольцах радиоуглерода в эпоху Маундеровского минимума измерен в ряде лабораторий различных стран с использованием различных радиометрических установок и древесных образцов. Количественное согласие данных разных лабораторий означает, что в интервале времени 1645-1715 гг. имело место глобальное увеличение содержания радиоуглерода в земной атмосфере.

2. Сопоставление данных по ^{14}C с результатами измерений содержания ^{10}Be в кернах льда позволяет сделать вывод о том, что в эпоху Маундеровского минимума имело место увеличение интенсивности первичных космических лучей, что естественно объяснить ослаблением модулирующего действия солнечной активности.

3. На общем фоне повышения концентрации космогенных изотопов в атмосфере Земли в период Маундеровского минимума обнаружены 22-х и 11-летние флуктуации. Факт флуктуаций установлен уверенно, а для точных амплитудно-временных характеристик требуются новые эксперименты по погодиному измерению содержания космогенных изотопов.

4. Анализ полученных результатов свидетельствует в пользу того, что механизм солнечного динамо не прекращает свою работу в эпоху глубоких минимумов солнечной активности.

5. II-летняя цикличность была характерной для солнечной активности и до Маундеровского минимума. Важно подчеркнуть, что её характеристики подобны характеристикам в период после минимума. Это означает, что переход в состояние минимума активности не приводит к фатальным изменениям в динамике солнечной активности.

Л и т е р а т у р а

1. Константинов Б.П., Кочаров Г.Е., Доклады АН СССР, 1965, т.165, с.63; Препринт ФТИ АН СССР, 1967, № 064, Л., 43 с.
2. Семенцов А.А. В сб.: Труды Всес.совещ.по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1970, с.76.
3. Марков Ю.Н., Мецхваришвили Р.Я. В сб.: Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.253.
4. Чернов С.Б., Арсланов Х.А., Рывкин А.С. В сб.: Труды VI Всесоюзного совещ.по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.289.
5. Шахов Б.П., Перепёлкин В.В. В сб.: Труды XIII Ленинградского семинара по космофизике, Л., 1983, с.173.
6. Васильев В.А. Препринт ФТИ АН СССР, № 723, Л., 1981, 59 с.
7. Б.П.Шахов. В сб.: Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.317.
8. Васильев В.А. Изв.АН СССР, сер.физ., 1981, т.45, с.1305.
9. Beer J. et al. XVIII ICRC, India, 1983, p.067-2.
10. Raisbeck G.M. et al. Preprint Laboratoire Rene Bernas LRB-81-03, Orsay, France, 1981, 8 p.
11. Дорман Л.И. В сб.: Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.49.
12. Кочаров Г.Е., Остриков В.М., Чернов С.Б. Препринт ФТИ АН СССР, № 739, 1981, 25 с.
13. Кочаров Г.Е., Васильев В.А., Дергачев В.А., Остриков В.М. Письма в АЖ, 1983, т.9, с.206.

14. Васильев В.А., Кочаров Г.Е. В сб.: Труды XIII Ленинградского семинара по космофизике, Л., 1983, с.75.
15. Акатова Н.И., Кочаров Г.Е. Препринт ФТИ АН СССР, № 802, Л., 1983, 21 с.
16. Кочаров Г.Е., Марков Ю.Н., Мецхваришвили Р.Я., Церетели С.Л. В сб.: Труды XIII Ленинградского семинара по космофизике, Л., 1983, с.101.
17. Мхотек В.И. Изв.АН СССР, сер.физ., 1981, т.45, с.1215.
18. Блинов А.В., Левченко В.А. Наст.сборник, стр.61.
19. Константинов А.Н., Кочаров Г.Е. Письма в АЖ, 1984, т.10, № 2, с.94.
20. Константинов А.Н., Кочаров Г.Е. Геомагнетизм и аэрономия, 1984, т.24, № 3, с.381.
21. Константинов А.Н., Кочаров Г.Е. Препринт ФТИ АН СССР, № 801, 1982, 15 с.
22. Kocharov G.E., Konstantinov A.N. - In: Proc. XVIII ICRC, India, 1983, v.2, p.333.
23. Акатова Н.И., Кочаров Г.Е. Геомагнетизм и аэрономия, 1984, т.24, с.571.
24. Алексеев В.А., Лаврухина А.К., Мильникова З.К., Смирнов И.В., Сулержицкий Л.Д. - В сб.: Радиоуглерод, Вильнюс, 1971, с.45.
25. Dergachev V.A., Kocharov G.E. In: Proc. XIII ICRC, Denver, USA, 1973, v.2, p.1122.
26. Кочаров Г.Е., Дергачев В.А., Семенцов А.А., Румянцев С.А., Романова Е.И., Маланова Н.С., Свеженцев Ю.С. В сб.: Труды Пятого Всесоюз.совещ.по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1974, с.47.
27. Алексеев В.Б., Васильев В.А., Дергачев В.А., Насыров Р.Х., Семенцов А.А. В сб.: Труды VI Всесоюз.совещ.по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.223.
28. Мецхваришвили Р.Я., Жоржолани И.В., Имедадзе Т.Ш., Цинамдзгваришвили Т.Ш. В сб.: Труды VI Всесоюз.совещания по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.239.

29. Дергачев В.А., Повинец П. В сб.: Труды УИ Всесоюз. совещ. по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод", Тбилиси, 1978, с.37.
30. Дергачев В.А., Кочаров Г.Е., Тлеугалиев С.Х. Препринт ФТИ АН СССР, № 620, 1979, 12 с.
31. Кочаров Г.Е. и др. - Изв.АН СССР, сер.физ., 1978, т.42, с.939.
32. Кочаров Г.Е., Чернов С.Б. Изв.АН СССР, сер.физ., 1980, т.44, с.2537.
33. Kocharov G.E., Vasiliev V.A., Dergachev V.A., Mikhailchenko A.G. - In Proc. XVI, ICRC, Kyoto, Japan, 1979, v.2, p.256.
34. Beer J. et al. - Radiocarbon, 1983, v.25, p.269.
35. Cini Castagnoli G. et al. - Nuovo Cimento, 1984.
36. Baxter M.S., Walton A. - Proc.R.Soc.London, Ser.A., 321, 1971, p.105.
37. Baxter M.S., Farmer I.G., Walton A. - Earth and Planet. Sci. Lett., 1973, v.20, p.307.
38. Damon P.E., Long A., Wallick B.I. - Earth and Planet Sci. Lett., 1973, v.20, p.300.
39. Fan C.Y., Tie-Mei C., Yun Si-Xun, Dai Kai-Mei. - Radiocarbon, 1983, v.25, p.203.
40. Damon P.E., Lerman J.C., Long A. - Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1978, v.6, p.457.
41. Stuiver M., Quay P.D. - Science, 1980, v.207, p.11.

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ИЗОТОПОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
(Тематический сборник)

Печатается по решению ученого совета ФТИ от
21/1-1983г.

Лит. редакторы: Н.С.Морозова, И.А.Слободян

РТИ ЛИИФ, зак. 1023, тир. 500, уч.-изд. л. 7; 12/ХП-1984г., М-11654
Формат 60x84 1/16
Цена 1 руб.