

МОНИТОРИНГ ВРЕМЕННЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВЫПАДАЮЩИХ НА ЗЕМЛЮ ХОНДРИТАХ С РАЗНЫМИ ОРБИТАМИ

© 2020 г. Г. К. Устинова^а, *, **, В. А. Алексеев^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ustinova@dubna.net.ru

**e-mail: AVAL37@mail.ru

Поступила в редакцию 01.08.2019 г.

После доработки 14.10.2019 г.

Принята к публикации 20.10.2019 г.

Представлены результаты исследования скоростей образования космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада в 42 хондритах, выпавших в 1959–2016 гг. Разработан количественный метод использования космогенных радионуклидов в качестве естественных детекторов галактических космических лучей в разные периоды времени и на разных гелиоцентрических расстояниях. Составлен длинный ряд однородных данных по скоростям образования ^{54}Mn , ^{22}Na и ^{26}Al в области метеоритных орбит (2–4 а. е.) в 1959–2016 гг., корреляционный анализ которого с соответствующими рядами однородных данных по важнейшим параметрам магнитогидродинамических процессов в гелиосфере позволяет выявить основные закономерности временных и пространственных вариаций ГКЛ с энергией $E > 100$ МэВ в области внутренней гелиосферы (≤ 5 а. е.) на длительной временной шкале. Мониторинг такого анализа делает возможным как исследовать эти процессы в прошлом, так и прогнозировать их особенности в будущем, что пока недоступно непосредственным измерениям интенсивности ГКЛ в межпланетном пространстве. Выдвинут проект целесообразности международной патрульной службы по изучению закономерностей временных и пространственных вариаций ГКЛ в области внутренней гелиосферы путем измерения и анализа скоростей образования космогенных радионуклидов в выпадающих на Землю хондритах, которому в настоящее время нет альтернативы.

Ключевые слова: хондриты, космогенные радионуклиды, скорости образования, космические лучи, солнечная модуляция, внутренняя гелиосфера

DOI: 10.31857/S0016752520050131

КОСМОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ХОНДРИТАХ

К настоящему времени накопился огромный экспериментальный материал по самым разным вопросам всестороннего изучения метеоритов: их изотопного и химического состава, минералогии и петрологии, возрастов газодержания и радиационных возрастов, содержания радионуклидов с разными периодами полураспада, плотности треков тяжелых ядер и др. Естественно, что каждый метеорит изучается индивидуально, а полученная информация используется для разработки дальнейшей еще до завершения модели происхождения метеоритов и Солнечной системы в целом.

Космогенные радионуклиды с разными периодами полураспада $T_{1/2}$ измеряются в каждом свежесвыпавшем хондрите, причем считается большой удачей, если хондрит попадает в лабораторию практически сразу после падения, так что

удается измерить содержание даже таких короткоживущих радионуклидов, как ^{24}Na ($T_{1/2} = 15$ ч), ^{52}Mn (5.7 сут), ^{32}P (14.3 сут), ^{51}Cr (27.5 сут), ^{46}Sc (84.2 сут) и др. В таких случаях можно измерить до 25 радионуклидов, вплоть до самых долгоживущих ^{26}Al (0.717 млн лет), ^{10}Be (1.51 млн лет), ^{53}Mn (3.7 млн лет) и ^{40}K (1.248 млрд лет). Долгоживущие радионуклиды используются для определения экспозиционных возрастов хондритов и выявления их, возможно, сложной радиационной истории. Радионуклиды с более короткими периодами полураспада позволяют проследить эволюцию хондритов после выделения из родительских тел, фиксировать моменты их последующих фрагментаций и оценить доатмосферные размеры. Изучались, естественно, зависимости скоростей образования космогенных радионуклидов от состава хондритов. Можно сказать, что практически этим и ограничивается полезная информация

о происхождении самих хондритов, которую приносят измеряемые с большими затратами содержания большинства космогенных радионуклидов.

Однако, космогенные радионуклиды в хондритах образуются космическими лучами при их полете в межпланетном пространстве, и являются, таким образом, естественными детекторами галактических космических лучей (ГКЛ) на разных расстояниях от Солнца и в разные периоды времени, в зависимости от времени падения хондрита и протяженности его орбиты (Fireman, 1967; Lavrukhina et al., 1969; Lal, 1972; Lavrukhina, Ustinova, 1981; Evans et al., 1982; Alania et al., 1983; Reedy et al., 1983; Povinec, 1987; Ustinova, 1995 и др.). Это значит, что космогенные радионуклиды с разными периодами полураспада в свежес выпавших хондритах являются уникальным источником бесценной информации о временных и пространственных вариациях космических лучей в Солнечной системе на длительной временной шкале. Но именно эта бесценная информация не извлекается авторами измеренных содержаний космогенных радионуклидов в свежес выпавших хондритах. Самое большее, что делается, — это указывается на качественное соответствие уровня радиоактивности нуклидов с фазой солнечных циклов, модулирующих интенсивность ГКЛ (Evans et al., 1982; Povinec, 1987; Bhandari et al., 1994).

Между тем, начиная с 60-х гг. прошлого века нами стал развиваться принципиально иной, количественный подход к анализу и использованию космогенных радионуклидов в свежес выпавших хондритах для изучения временных и пространственных вариаций ГКЛ в трехмерной гелиосфере (Лаврухина, Устинова, 1990). Он основывается на аналитическом методе (каскадно-испарительной модели) расчета глубинных распределений космогенных изотопов в космических телах разных размеров и составов, характеризуется очень прозрачной структурой и насчитывает три стадии:

1. Измерение содержаний космогенных радионуклидов в хондритах с известной датой падения (т.е. скоростей образования (H_r) радионуклидов ГКЛ вдоль орбит хондритов в течение $\sim 1.5T_{1/2}$ радионуклидов до падения хондритов);

2. Расчет их скоростей образования (H_{\oplus}) в идентичных хондритах, используя интенсивность ГКЛ на 1 а. е. в те же периоды аккумуляции радионуклидов в реальных хондритах перед падением последних на Землю. Это возможно, так как с 1957 г. существуют стратосферные данные по ежемесячным баллонным измерениям интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) (Stozhkov et al., 2009) (из-за абляции хондритов при прохождении атмосферы именно содержания радионуклидов, образованных ГКЛ с $E > 100$ МэВ оказываются доступными измерениям);

3. Сравнение измеренных и рассчитанных данных позволяет выявить возможные пространственные вариации, т.е. градиент скоростей образования космогенных радионуклидов между средними гелиоцентрическими расстояниями хондритных орбит (2–4 а. е.) и 1 а. е. в разные периоды солнечной активности (путем изучения хондритов с разными орбитами и с разной датой падения).

Аналитический метод расчета глубинных распределений космогенных изотопов в космических телах разных размеров и составов был проверен в уникальном эксперименте по изотропному облучению вращающейся модели метеорита расширенным пучком протонов на синхротронной установке (Лаврухина и др., 1973). На этой основе за прошедшие полвека нами были разработаны важные для анализа скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах независимые методы определения доатмосферных размеров хондритов, уникальный подход к оценке протяженности метеоритных орбит, систематики сечений образования долгоживущих и других изотопов, по которым отсутствуют экспериментальные данные (Лаврухина, Устинова, 1990). Это обеспечило одинаковый подход к анализу содержаний космогенных радионуклидов в каждом последовательно выпадавшем хондрите, что позволило осуществить мониторинг и анализ скоростей образования радионуклидов вдоль метеоритных орбит на длительной временной шкале. Возможность такого мониторинга выявляет закономерности динамики процессов в гелиосфере и их прогнозирование, что до сих пор не имеет аналога, так как дорогостоящие эпизодические измерения при полетах аппаратов в межпланетном пространстве, подтверждая отдельные моменты (Устинова, 2016), не в состоянии обеспечить такой огромный объем непрерывной научной информации.

Скорости образования космогенных радионуклидов в хондритах разных размеров и составов

При полете в космическом пространстве хондрит изотропно облучается космическими лучами, что приводит к развитию в его веществе каскада вторичных частиц разных ступеней генерации, так что скорость образования i -радионуклида в хондрите радиусом R на расстоянии r от его центра можно аппроксимировать в общей аналитической форме (Устинова, 2016; Ustinova, Lavrukhina, 1990):

$$H_i(R, r) \sim \left[I_p(R, r) \sum_{j=1}^n \frac{N}{A_j} m_j \bar{\sigma}_{ij}^p + \sum_s I_s(R, r) \sum_{j=1}^n \frac{N}{A_j} m_j \bar{\sigma}_{ij}^s + \sum_t I_t(R, r) \sum_{j=1}^n \frac{N}{A_j} m_j \bar{\sigma}_{ij}^t + \dots \right], \quad (1)$$

где N – число Авогадро; m_j – содержание j -элемента мишени в хондрите; $I_{p,s,t}(R, r)$ – интегральные потоки первичных, вторичных и третичных частиц в хондрите радиусом R на глубине r от центра, $\bar{\sigma}_{ij}^{p,s,t}$ – средневзвешенные по спектрам сечения образования i -радионуклида из j -элемента мишени с массовым числом A_j , первичными, вторичными и третичными частицами, что можно выразить в форме (например, в случае первичных частиц):

$$\bar{\sigma}_{ij}^p = \int \frac{\sigma_{ij}^p(E) F^p(E)}{F^p(E)} dE, \quad (2)$$

где $F^p(E)$ – спектр первичных частиц. Исходный интегральный поток интенсивности ГКЛ $I_{p,s,t}(R, r)$ в формуле (1) можно вынести за скобки, так что скорость образования радионуклида $H_{\tilde{r}}$ на среднем гелиоцентрическом расстоянии \tilde{r} пропорциональна интегральной интенсивности ГКЛ $I_{\tilde{r}}(> E)$ на расстоянии \tilde{r}

$$H_{\tilde{r}} = I_{\tilde{r}}(> E) K_{\tilde{r}}(R, r, \sigma^{p,s,t}, m). \quad (3)$$

Скорость образования $H_{\tilde{r}}$ соответствует содержанию радионуклида в хондрите, накопленному на среднем гелиоцентрическом расстоянии \tilde{r} . Аналогично, скорость образования H_{\oplus} на 1 а. е.

$$H_{\oplus} = I_{\oplus}(> E) K_{\oplus}(R, r, \sigma^{p,s,t}, m) \quad (4)$$

соответствует содержанию радионуклида в том же хондрите, рассчитанному при использовании потока ГКЛ по данным стратосферных измерений (Stozkov et al., 2009; Vazilevskaya et al., 2014), что представляет скорость образования радионуклида вблизи Земли.

Из формулы (1) следует, что кроме прямой пропорциональности интенсивности ГКЛ, точность расчета скоростей образования космогенных радионуклидов в каждом хондрите зависит от использования его индивидуального химического состава, его доатмосферного размера (R) и глубины залегания (r) исследуемых образцов.

Доатмосферные размеры хондритов и экранировка образцов

Существует много методов оценок доатмосферных размеров и абляции метеоритов, использующих космогенные стабильные изотопы благородных газов, треки VH -ядер космических лучей, и космогенные радионуклиды (Eberhardt et al., 1963; Bhattacharya et al., 1973; Bhandari et al., 1980; Graf et al., 1990; Устинова и др., 1988, 1990; Лаврухина, Устинова, 1990; Алексеев, 2003; Alexeev et al., 2015 и др.). Все эти методы, а также их сочетания взаимно дополняют друг друга, рас-

ширяя доступную нам информацию о катастрофических событиях в истории метеоритов, выпадающих на Землю. Действительно, из-за столкновений в космическом пространстве и в результате эрозии размеры метеоритных тел постепенно меняются. Стабильные изотопы и треки накапливаются в течение всего периода облучения космическими лучами, т.е. свидетельствуют о средних размерах метеоритов в течение всего экспозиционного возраста, в то время как радионуклиды с разными периодами полураспада дают информацию о средних размерах метеоритов в течение $\sim 1.5 T_{1/2}$ до входа в атмосферу Земли. Таким образом, изучая метеориты с помощью треков, космогенных стабильных изотопов и радионуклидов с разными $T_{1/2}$, можно проследить эволюцию их доатмосферных размеров с момента выброса из родительского тела до входа в атмосферу Земли (Устинова и др., 1988, 1990). Например, средний радиус хондрита St. Severin $R \sim 30\text{--}40$ см сохранялся неизменным в течение всего экспозиционного возраста 11.2 млн лет, тогда как средний радиус хондрита Ehole в течение последних 8 лет перед падением на Землю был уже в 3–5 раз меньше, чем в среднем за последние 6 млн лет.

Размеры хондритов также сильно меняются из-за абляции и разрушений в атмосфере Земли, поэтому найденные образцы трудно сопоставить какому-либо первоначальному положению в хондритах, т.е. идентифицировать как размеры хондритов, так и глубину залегания образцов от их поверхности. Между тем, именно эти параметры определяют условия развития каскадного процесса при изотропном облучении хондритов космическими лучами, вызывающими образование космогенных радионуклидов. Естественно поэтому, что именно аналитический метод расчета глубинных распределений скоростей образования космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада в космических телах разных размеров и составов позволил выявить радионуклиды, чьи скорости образования наиболее чувствительны к размерам тел, и именно их использовать для идентификации глубины залегания исследуемых образцов в хондритах разных размеров. Было разработано около 10 методов оценки размеров хондритов с использованием глубинных распределений разных радионуклидов и их сочетаний (Устинова и др., 1988). Показано, что наиболее чувствительным и эффективным методом является сочетание глубинных распределений скоростей образования ^{60}Co (или отношений $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$) в изучаемом хондрите с фиксацией глубины залегания исследуемого образца по плотности треков ядер группы железа (VH -ядер; $23 < Z < 28$), которые образуются под действием космических лучей в силикатных минералах оливине и пироксене (Bhattacharya et al., 1973).

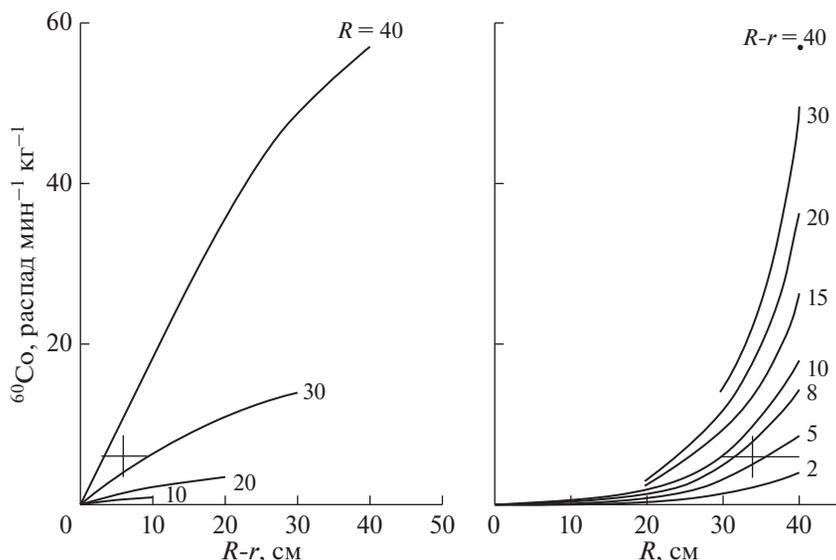


Рис. 1. Определение доатмосферного радиуса R хондрита Kilabo (левый график) и глубины залегания его образца от поверхности $R-r$ (правый график; см. текст).

В качестве примера это показано на рис. 1 для хондрита Kilabo (LL6), выпавшего в Нигерии 21 июля 2002 г. (Russell et al., 2003). Радионуклид ^{60}Co образуется в реакции $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ тепловыми и резонансными нейтронами, накопление которых в хондритах крайне чувствительно к их размерам (Eberhardt et al., 1963; Лаврухина, Устинова, 1990). Очевидно, что генерация ^{60}Co прямо пропорциональна содержанию Co, который варьирует в хондритах в достаточно широких пределах (Jarosewich, 1990). При моделировании глубинных распределений ^{60}Co в хондрите Kilabo использовалось среднее содержание Co 0.04 вес. % в LL6-хондритах (в частности, в хондрите St. Severin (LL6)).

Измеряемое на момент падения хондритов на Землю содержание ^{60}Co образовывалось при средней интенсивности I_0 ГКЛ в течение ~ 8 лет ($\sim 1.5 T_{1/2}^{60}\text{Co}$) перед падением Kilabo $I_0 \sim 0.2586 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ (Bazilevskaya, Svirzhevskaya, 1998; Stozhkov et al., 2009). Очевидно, что этот подход дает оценку его среднего доатмосферного размера в течение ~ 8 лет перед входом в атмосферу Земли.

Левый график на рис. 1 демонстрирует рассчитанное аналитическим методом распределение ^{60}Co в хондрите Kilabo радиусом R в зависимости от глубины $d = R - r$ залегания образцов от его поверхности. Крест — измеренное содержание ^{60}Co в хондрите Kilabo (6.0 ± 2.5 распад $\text{мин}^{-1} \text{ кг}^{-1}$) на фиксированной по трекам глубине 6 ± 3 см от поверхности (Алексеев и др., 2008), что соответствует его среднему доатмосферному радиусу $R = 34_{-4}^{+6}$ см. Это же подтверждает и правый график, описыва-

ющий распределение ^{60}Co на разной глубине $d = R - r$ от поверхности в зависимости от радиуса R .

Зная глубинные распределения любого космогенного изотопа в хондритах любого химического типа при облучении любым спектром космического излучения можно рассчитать его измеренное на момент падения хондрита содержание в любом выпавшем образце и идентифицировать, таким образом, и размер хондрита, и экранировку образца.

Скорости образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит

В космических телах космогенные радионуклиды образуются галактическими (ГКЛ) и солнечными (СКЛ) космическими лучами, но в метеоритах из-за их абляции при прохождении земной атмосферы сохраняются лишь эффекты облучения ГКЛ с энергией > 100 МэВ. Например, при абляции в метеоритах теряются эффекты СКЛ с энергией > 20 МэВ, которые проявляются в лунных образцах в слоях < 2 см от поверхности (Lavrukhina, Ustinova, 1971; Лаврухина, Устинова, 1990; Ustinova, 2018). Согласно наблюдениям в земной атмосфере (т.е. на 1 а. е.) (Usoskin et al., 2009), пренебрежимо малый глобальный эффект дают и солнечные протоны с $E > 100$ МэВ, которые генерируются в самых мощных (но локальных по времени) солнечных вспышках. Этот эффект уменьшается в метеоритах еще пропорционально их среднему гелиоцентрическому расстоянию $\sim \tilde{r}_o^2$.

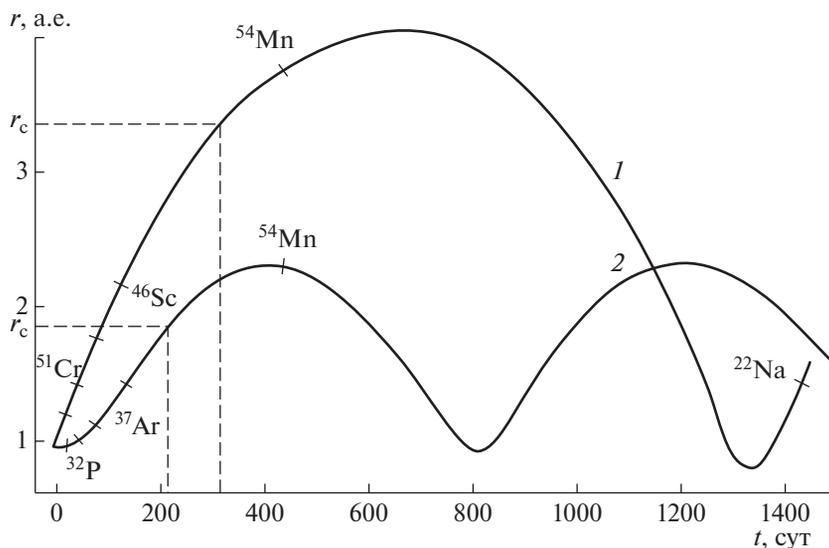


Рис. 2. Изменение гелиоцентрического расстояния r со временем t до встречи с Землей хондритов Pribram (1) и Lost City (2). Штрихи на кривых – начало накопления космогенных радионуклидов; r_c – средние гелиоцентрические расстояния орбит.

Движение метеоритов, как и других космических тел, подчиняется законам Кеплера, так что их орбиты в координатах $r(t)$ описываются уравнениями Кеплера (см. например, (Ландау, Лифшиц, 1988))

$$\begin{cases} r = a(1 - e \cos E) \\ t = \frac{T}{2\pi} (E - e \sin E) \end{cases} \quad (5)$$

(где a – большая полуось; e – эксцентриситет; E – эксцентрисическая аномалия; T – орбитальный период). При $t = 0$ $r = q$, т.е. перигелию, а при $t = 1/4T$ $r = \tilde{r}_0$, т.е. среднему гелиоцентрическому расстоянию \tilde{r}_0 метеоритной орбиты, на котором в нем накапливаются, например, долгоживущие космогенные радионуклиды с периодом полураспада $T_{1/2} \gg T$. В условиях изотропного облучения хондритов ГКЛ в межпланетном пространстве измеряемые на момент падения содержания радионуклидов с $T_{1/2} \leq T$ накапливаются на последнем участке орбиты хондритов перед их падением на Землю в течение $\sim 1.5T_{1/2}$ радионуклидов, что естественно сопоставлять средним гелиоцентрическим расстояниям \tilde{r}_0 хондритов в эти промежутки времени.

На рис. 2 в координатах зависимости гелиоцентрического расстояния от времени нахождения на орбите перед падением на Землю представлены известные орбиты хондритов Pribram и Lost City, выпавших в 1959 и 1970 гг. соответственно. Штрихами на кривых отмечены участки накопления радионуклидов ($\sim 1.5T_{1/2}$), измеряемые на момент падения хондритов. Видно, что короткоживущие радионуклиды ^{32}P и ^{37}Ar образу-

ются практически при интенсивности ГКЛ у Земли, тогда как радионуклиды с более продолжительными $T_{1/2}$ образуются на соответствующих средних гелиоцентрических расстояниях участков их накопления при соответствующей средней интенсивности ГКЛ в гелиосфере. Например, ^{54}Mn образуется при средней интенсивности ГКЛ в течение последних 450 дней перед падением хондрита, а ^{22}Na – при средней интенсивности ГКЛ в течение ~ 4 лет, т.е., практически при средней интенсивности ГКЛ за солнечный полуцикл. Долгоживущий ^{26}Al образуется при средней интенсивности ГКЛ за последний миллион лет на средних гелиоцентрических расстояниях r_c орбит хондритов (отмечены на ординатах).

Таким образом, измеряемые на момент падения хондритов содержания космогенных радионуклидов предоставляют нам их скорости образования $H_{\tilde{r}}$ (3) под действием средней интенсивности ГКЛ на соответствующих средних гелиоцентрических расстояниях в разные фазы солнечных циклов, фиксированных датой падения хондритов. Временные вариации интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) на ~ 1 а. е. известны из непрерывных баллонных измерений в стратосфере, которые ведутся с 1957 г. (Stozhkov et al., 2009). Используя эти стратосферные данные по интенсивности ГКЛ на 1 а. е. в соответствующие периоды времени, аналитический метод позволяет рассчитать скорость образования H_{\oplus} (4) любых радионуклидов в идентичных исследуемым хондритах на 1 а. е. Очевидно, что сравнение измеренных скоростей образования космогенных радионуклидов $H_{\tilde{r}}$ с рассчитанными H_{\oplus} при интенсивности ГКЛ на 1 а. е. позволяет опре-

делить радиальный градиент скоростей образования космогенных радионуклидов

$$G_{\tilde{r}} = \frac{H_{\tilde{r}}/H_{\oplus} - 1}{\tilde{r} - 1} \times 100\% \quad (6)$$

и, следовательно, выявить их пространственные вариации вдоль метеоритных орбит (на 2–4 а. е. от Солнца) на фоне временных вариаций в течение 11-летних солнечных циклов. Очевидна его прямая пропорциональность градиенту интегральной интенсивности ГКЛ между 1 а. е. и \tilde{r} :

$$G_{\tilde{r}}(> E) = \frac{I_{\tilde{r}}(> E)/I_{\oplus}(> E) - 1}{\tilde{r} - 1} \times 100\%. \quad (7)$$

Таким образом, исследование радионуклидов с разными $T_{1/2}$ в хондритах с разными датами падений, с разной протяженностью и наклоном орбит предоставляет нам уникальный ряд однородных данных по скоростям образования космогенных радионуклидов и их вариациям в трехмерной гелиосфере. Прямая пропорциональность скоростей образования космогенных радионуклидов интенсивности ГКЛ позволяет получать косвенную информацию о распределении и вариациях ГКЛ ($E > 100$ МэВ) в Солнечной системе на длительной временной шкале (от средних значений в современных солнечных циклах до ~1 млн лет), что недоступно прямым измерениям в межпланетном пространстве, тем более в тех объемах, которые могут предоставить постоянно выпадающие хондриты (описание метода см. в (Лаврухина, Устинова, 1990; Алексеев, Устинова, 2006) и ссылки там).

МОНИТОРИНГ СКОРОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ХОНДРИТАХ, ВЫПАВШИХ В 1957–2016 гг.

К настоящему времени нами исследованы скорости образования космогенных радионуклидов в 42 хондритах (в том числе в 10 хондритах с известными орбитами, падения которых сфотографированы и измерена скорость, что позволило точно рассчитать элементы орбит), выпавших в 1959–2016 гг., что предоставило длинный ряд однородных данных по их скоростям образования на гелиоцентрических расстояниях до ~5 а. е. в течение ~6 солнечных циклов и позволило анализировать их мониторинг (Устинова, Алексеев, 2019).

Мониторинг, т.е., составление и корреляционный анализ однородного ряда данных по изменению во времени факторов, наиболее характеризующих конкретный процесс, является, по сути, самым эффективным, и единственным методом исследования динамики процессов на длительной временной шкале. Наиболее ярким примером является однородный ряд солнечных пятен, благода-

ря которому была обнаружена цикличность солнечной активности (<http://sidc.oma.be/silso/>). В настоящее время существуют длинные ряды однородных данных по интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) на 1 а. е. в разных энергетических диапазонах (стратосферные баллонные измерения (Stozhkov et al., 2009), данные наземных и подземных нейтронных мониторов (Mogaal, Stoker, 2010) и др.), демонстрирующих солнечную модуляцию ГКЛ, т.е. антикорреляцию интенсивности ГКЛ с уровнем солнечной активности. Их корреляционный анализ с существующими базами однородных данных по солнечной активности и по таким важным параметрам, как мощность межпланетного магнитного поля (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/form/dx1.html>), угол наклона α гелиосферного токового слоя (<http://wso.stanford.edu/Tilts.html>), инверсия полярности общего магнитного поля Солнца (<http://wso.stanford.edu/Polar.html>) и др., позволил не только выявить наиболее общие и важные закономерности солнечной модуляции ГКЛ и связанных с ней процессов (например, климата) вблизи Земли, но и, как реконструировать эти процессы в прошлом, так и предсказывать их особенности в будущем (Устинова, 2016). Выполненный нами анализ экспериментальных данных по измеренному содержанию космогенных радионуклидов в 42 хондритах с разной протяженностью орбит, выпавших в период 1959–2016 гг., и его сравнение с рассчитанными скоростями образования космогенных радионуклидов на 1 а. е. в идентичных хондритах позволяет выявить градиенты скоростей образования радионуклидов вдоль хондритных орбит и их вариации в течение уже ~6 солнечных циклов.

На рис. 3 демонстрируется составленный нами длинный ряд однородных данных по вариациям градиентов скоростей образования ^{54}Mn и ^{22}Na в 19–24 солнечных циклах и средние значения скоростей образования ^{26}Al за последний миллион лет, по данным выпавших в этот период хондритов (полный список хондритов см. в (Ustinova, Alexeev, 2018)).

Особую ценность представляют радионуклиды в хондритах с известными орбитами, падения которых сфотографированы и измерена их скорость, что позволило точно рассчитать элементы орбит (Meier, 2016) (рис. 3а). Ясно видно, что данные по ^{22}Na в хондрите Lost City, по ^{22}Na и ^{54}Mn в Innisfree, по ^{22}Na в хондрите Mogaalka, так же как по ^{22}Na и ^{54}Mn в Kosice и по ^{22}Na в хондрите Челябинск, которые накапливались в периоды минимума или вблизи минимума солнечной активности, демонстрируют малые (0–20)%/а.е. градиенты их скоростей образования, поскольку интенсивность ГКЛ вдоль орбит хондритов в эти периоды была такой же высокой, как у Земли (кривая на рис. 3в). С другой стороны, ^{22}Na в хондрите Pribram, ^{54}Mn

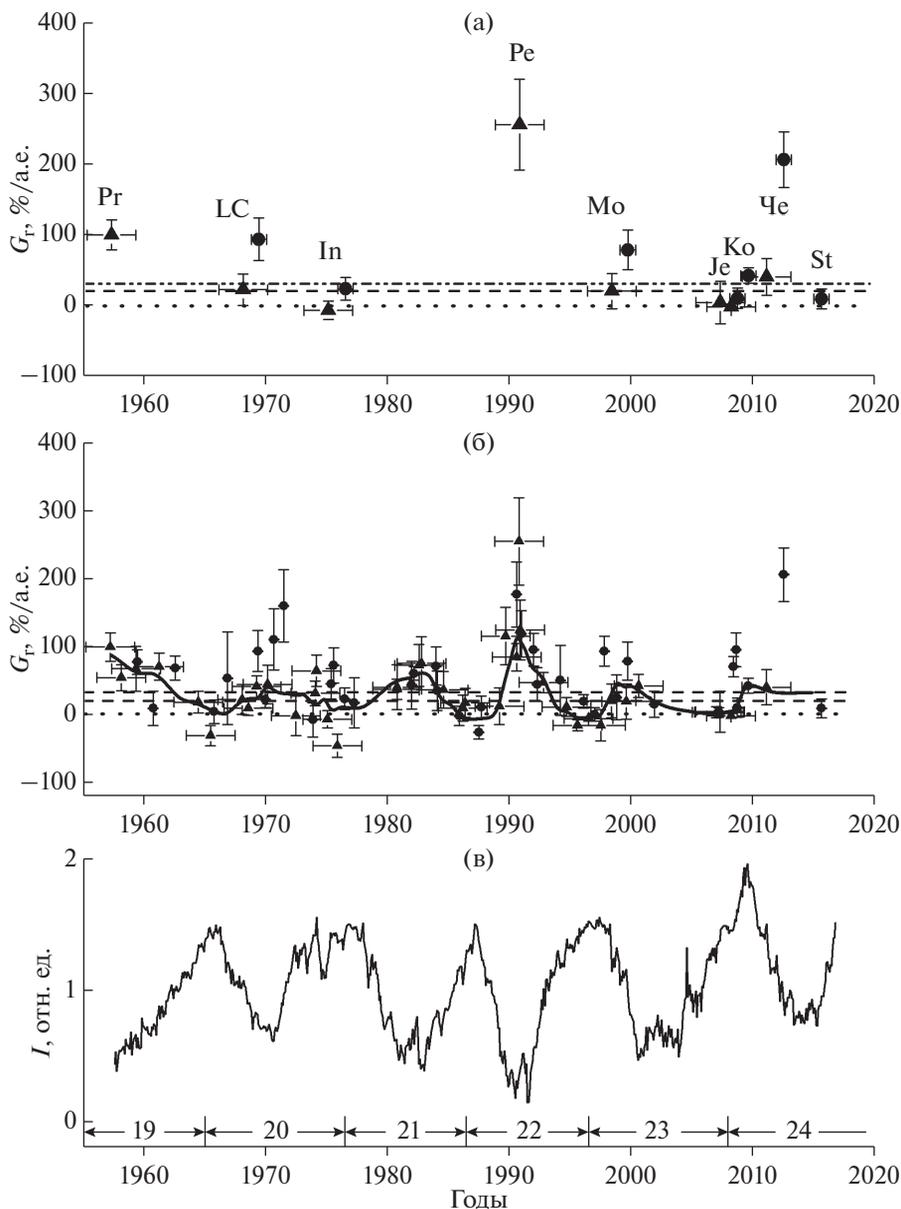


Рис. 3. (а) Вариации интегральных градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит (на 2–4 а. е. от Солнца) по данным о радиоактивности ^{54}Mn (кружки), ^{22}Na (треугольники) и ^{26}Al (штриховые горизонтальные на 20–30%/а. е.) в 10 хондритах с известными орбитами, выпавших в 1959–2016 гг.; (б) Вариации интегральных градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит в 42 хондритах, выпавших в 1959–2016 гг. (кривая – полиномиальное сглаживание экспериментальных данных по пяти точкам с учетом веса каждой точки; неизвестные орбиты хондритов рассчитаны феноменологическим методом (Lavrukina, Ustinova, 1972; Лаврухина, Устинова, 1990); обозначения как в (а)); (в) Вариации интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) у Земли по стратосферным данным (Stozhkov et al., 2009). Условные обозначения метеоритов: Pr – Pribram, LC – Lost City, In – Innisfree, Pe – Peekskill, Mo – Moravka, Je – Jesenice, Ko – Kosice, Чe – Челябинск, St – Stubenberg.

в Lost City, ^{22}Na в Peekskill, так же как ^{54}Mn в хондритах Моравка и Челябинск, которые накапливались в периоды максимума или вблизи максимума солнечной активности, демонстрируют значительно более высокие градиенты, что обусловлено сильным снижением интенсивности ГКЛ у Земли, как по данным стратосферных измерений (Stozhkov et al., 2009), так и по данным нейтронных мониторов (Moraal, Stocker, 2010). Наконец, средние

значения градиентов в современных солнечных циклах (~20–30%/а. е., по ^{22}Na) соответствуют средним градиентам за последний миллион лет (по ^{26}Al , рис. 3), что свидетельствует о постоянстве механизма солнечной модуляции, по крайней мере, в течение ~1 млн лет.

Эти закономерности подтверждаются и данными по скоростям образования радионуклидов

в остальных хондритах, орбиты которых рассчитаны феноменологическим методом (Lavruxhina, Ustinova, 1972; Лаврухина, Устинова, 1990) (см. средний график б). Статистическое сглаживание этого континуума однородных данных выявляет наиболее общие закономерности:

1) зависимость скоростей образования радионуклидов от фазы солнечного цикла, т.е. их временные вариации;

2) существование градиентов скоростей образования, т.е. их пространственные вариации вдоль метеоритных орбит (т.е. в области ≤ 5 а. е. внутренней гелиосферы).

3) различие вариаций градиентов скоростей образования радионуклидов в разных солнечных циклах, что возможно обусловлено особенностями магнитогидродинамических процессов во внутренней гелиосфере.

Прямая пропорциональность скоростей образования космогенных радионуклидов интенсивности продуцирующих их космических лучей позволяет ожидать наличие соответствующих закономерностей в изотропно облучающих Землю ГКЛ, как минимум, на их пути в области метеоритных орбит, т.е. на гелиоцентрических расстояниях ≤ 5 а. е. внутренней гелиосферы. Действительно, на рис. 3в показаны 11-летние вариации ГКЛ вблизи Земли, обусловленные их модуляцией солнечным ветром. Но что происходит на других гелиоцентрических расстояниях? Уже первые наши исследования космогенных радионуклидов в хондритах Pribram и Lost City, выпавших в фазах максимумов 19 и 20 солнечных циклов, выявили существенные пространственные вариации ГКЛ (градиенты скоростей образования радионуклидов до $\sim 100\%/а. е.$) и даже временные вариации их градиентов, поскольку градиенты скоростей образования радионуклидов в хондрите Innisfree, выпавшем в минимуме 20-го цикла, оказались $\sim 0-5\%/а. е.$ (Лаврухина, Устинова, 1990). Результаты исследования всех последующих хондритов подтвердили эти данные и выявили антикорреляцию градиентов скоростей образования радионуклидов с интенсивностью ГКЛ у Земли (рис. 3). Практически выявлена неизвестная ранее закономерность, что существующие градиенты ГКЛ во внутренней гелиосфере, по-видимому, антикоррелируют с их интенсивностью у Земли, т.е. зависят от фазы солнечной активности.

Между тем, имевшиеся измерения интенсивности ГКЛ в межпланетном пространстве при полете КК Маринер-4,-5 в 1964–1965 гг., Пионер-10, -11 в 1972–1976 гг. и Вояджер-1,-2 в 1984–1986 гг. (O’Gallagher, Simpson, 1967; McKibben et al., 1977; Venkatesan et al., 1987), свидетельствовали о малых ($\sim 2-4\%/а. е.$) интегральных градиентах ГКЛ, т.е. о непрерывном, равномерном росте интенсивности ГКЛ с удалением от Земли, вплоть до ее

выравнивания с интенсивностью ГКЛ в космическом пространстве на границе гелиосферы с межзвездным газом на далеких (≥ 100 а. е.) гелиоцентрических расстояниях. Дело в том, что указанные запуски КК производились в периоды минимумов солнечной активности 19, 20 и 21 солнечных циклов, когда отсутствовала модуляция во внутренней гелиосфере, и градиенты ГКЛ были малы. В годы же развития максимумов солнечных циклов КК были уже за пределами активной зоны модуляции внутренней гелиосферы, и снова регистрировали лишь малые градиенты ГКЛ при равномерном возрастании их интенсивности. Впервые сильная зависимость интегральных градиентов ГКЛ от фазы солнечного цикла в области внутренней гелиосферы была зарегистрирована лишь при полете КА *Ulysses* (в максимуме 22-го солнечного цикла: радиальные градиенты протонов с $E > 2$ ГэВ менялись на порядок величины от $0.5\%/а. е.$ в фазе минимума 1994–1996 до $5.3\%/а. е.$ в фазе максимума 1998–2001 (Belov et al., 2001; McKibben et al., 2003). Однако эти измерения ограничены отдельными временными и пространственными промежутками и не могут составить адекватную динамическую последовательность и взаимосвязь процессов в этой области гелиосферы. Для таких исследований требуются длинные ряды однородных данных на длительной временной шкале, которые позволяли бы как реконструировать изучаемые процессы в прошлом, так и прогнозировать их особенности в будущем. Именно такую закономерность предоставил мониторинг скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах, а результаты измерений при полете КА *Ulysses* явились экспериментальным основанием адекватности полученной закономерности для ГКЛ.

Ошибки в расчете градиентов скоростей образования радионуклидов обусловлены множеством факторов и, согласно их тщательному анализу в (Алексеев и др., 2019), составляют $\geq 20\%$, тогда как ошибки в измерениях интегральных градиентов ГКЛ порядка $\sim 10\%$. Например, в период 1972–1975 гг. градиент скоростей образования ^{22}Na под действием ГКЛ с $E > 100$ МэВ в хондрите Dhajala составлял $61 \pm 28\%/а. е.$ на 2–3 а. е. (Лаврухина, Устинова, 1990), а измеренный при полете КК Pioneer 10 и 11 в 1972–1974 гг. интегральный градиент протонов с $E > 70$ МэВ равнялся в среднем $3.4 \pm 0.4\%/а. е.$ на гелиоцентрических расстояниях < 5 а. е. (McKibben et al., 1977). Из этого следует, что градиенты скоростей образования радионуклидов не являются непосредственно градиентами ГКЛ и не равны им, а различаются, как минимум на порядок величины. Тем не менее, скорости образования космогенных радионуклидов обусловлены интенсивностью ГКЛ, так что выявленная для них закономерность временных и пространственных вариаций демон-

стрирует существующую закономерность временных и пространственных вариаций ГКЛ во внутренней гелиосфере на длительной временной шкале. Уже первое поверхностное рассмотрение этой закономерности позволяет увидеть различие пространственных и временных вариаций ГКЛ в разных солнечных циклах, что стимулирует дальнейшие исследования свойств и особенностей внутренней гелиосферы.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННЕЙ ГЕЛИОСФЕРЫ В СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

Навстречу ГКЛ Солнце излучает солнечный ветер и низкоэнергичные солнечные космические лучи (СКЛ), которые, ослабляясь пропорционально квадрату расстояния, распространяются вплоть до динамической границы равновесия с межзвездным газом на далеких (≥ 100 а. е.) расстояниях. Это приводит к постепенному уменьшению интенсивности поступающих в Солнечную систему ГКЛ, к их модуляции общим объемом солнечного ветра, для которой характерны малые $\sim 2\text{--}4\%$ /а. е. градиенты ГКЛ (Potgieter, 2013).

Однако такая постоянная равномерность не согласуется с динамическими процессами и конфигурациями магнитных полей в гелиосфере. Действительно, в соответствии с 11-летними вариациями солнечной активности, солнечный ветер и СКЛ периодически с разной интенсивностью и скоростью испускаются Солнцем навстречу ГКЛ. Сначала их движение радиально, но из-за вращения Солнца их пути постепенно искривляются, закручиваясь по спирали Архимеда, и примерно на ~ 5 а. е. становятся практически азимутальными (Parker, 1979). Вмороженные в плазму магнитные поля солнечного ветра, закручиваясь, создают труднопреодолимые барьеры для проникновения ГКЛ к Солнцу, т.е. практически выметают их из гелиосферы. Чем выше солнечная активность, тем ниже интенсивность ГКЛ у Земли. Таким образом, кроме модуляции ГКЛ, обусловленной полным объемом солнечного ветра, в годы высокой солнечной активности, ввиду худших условий диффузии ГКЛ в азимутальных полях, чем в радиальных (ослаблением на порядок коэффициента диффузии (Parker, 1969, 1979)), на 2–5 а. е. от Солнца периодически возникает более эффективная модуляция ГКЛ, в частности, с более высокими градиентами ГКЛ в этой области. По-видимому, эта область является зоной взаимодействия прямых и обратных ударных волн, высокоскоростных потоков солнечного ветра и коротящихся потоков низкоэнергичных частиц, что характеризуется повышенной турбулентностью магнитных полей и повышенной плотностью магнитных неоднородностей (Burla-

ga, 1983; Burlaga, Ness, 1998), эффективно рассеивающих ГКЛ, создающих дополнительный градиент их интенсивности к малому градиенту при спокойном солнечном ветре (Лаврухина, Устинова, 1990; Алексеев, Устинова, 2006). На более далеких расстояниях влияние этих факторов постепенно ослабевает из-за адиабатического охлаждения, т.е. замедления скорости солнечного ветра и распределения его во все увеличивающемся объеме с неуклонным уменьшением плотности магнитных неоднородностей. При спаде солнечной активности нестационарные процессы ослабевают, и такой эффективный модулирующий слой постепенно истончается и рассасывается, продвигаясь к динамической границе с межзвездным газом, так что остаточная модуляция снова определяется лишь полным объемом солнечного ветра (Лаврухина, Устинова, 1990).

Наличие масштабов мощности флуктуаций межпланетного магнитного поля (Burlaga, Ness, 1998) приводит к необходимости разделять стохастические эффекты и эффекты, вызванные солнечной активностью в модуляции ГКЛ. В этой связи важнейшее значение приобретает корреляционный анализ распределения и вариаций ГКЛ с различными индексами солнечной активности, мощностью межпланетного магнитного поля и углом наклона гелиосферного токового слоя в трехмерной гелиосфере. Полученный ряд однородных данных по скоростям образования космогенных радионуклидов, продуцированных ГКЛ, позволяет выполнить его корреляционный анализ с рядами однородных данных по важнейшим параметрам, определяющим магнитогидродинамическую обстановку в гелиосфере в те же периоды времени. На рис. 4 представлены вариации градиентов скоростей образования радионуклидов (G) в сравнении с вариациями солнечной активности (числа Вольфа R_s), мощности B межпланетного магнитного поля и вариациями угла наклона α гелиосферного токового слоя в 1957–2016 гг.

В качестве общего результата следует отметить положительную корреляцию всех действующих факторов, что указывает на определяющую роль солнечной активности в области внутренней гелиосферы (Витинский, 1983; Miroshnichenko, 2015). Однако на рис. 4 хорошо видно различие корреляций для разных солнечных циклов, в частности, различие корреляций на фазах роста и спада солнечных циклов, что обусловлено стохастической природой развития солнечной активности. В основе свободного вращения солнечного динамо лежит турбулентная конвекция солнечной плазмы и ее дифференциальное вращение (Зельдович, Рузмайкин, 1987). Когда определенные условия генерации конвекции нарушены или нарушено взаимодействие конвекции с дифференциальным вращением (например, из-за динамической вязкости (внутреннего трения)), возника-

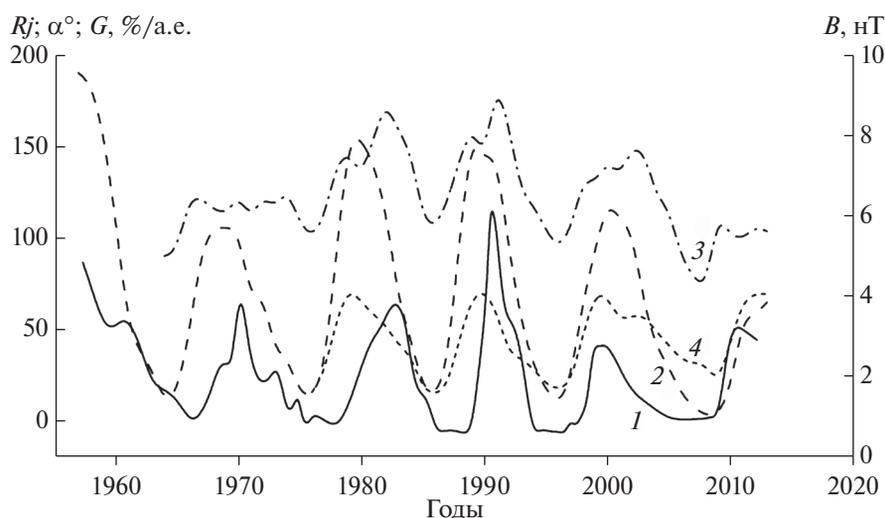


Рис. 4. Корреляционный анализ вариаций скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах с разными орбитами, выпавших в 1959–2016 гг. (кривая 1) с вариациями солнечной активности (числа Вольфа R_j , кривая 2) (<http://sidc.oma.be/silso/>), мощности межпланетного магнитного поля B (кривая 3) (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omni-web/form/dx1.html>) и угла наклона α гелиосферного токового слоя (кривая 4) (<http://wso.stanford.edu/Tilts.html>) в тот же период.

ют состояния нестабильности, неоднозначность выхода из которых ведет к нарушению работы солнечного динамо, вплоть до длительных минимумов солнечной активности, типа минимума Маундера.

Наиболее очевидные стохастические процессы происходят в моменты перестройки полярности общего магнитного поля Солнца в каждом максимуме солнечной активности, что приводит к сменам 22-летних магнитных циклов. Перестройка может начинаться и заканчиваться в разное время и по-разному в N- и S-полушариях Солнца, что иногда приводит к периодам, когда оба полюса оказываются одной полярности (<http://wso.stanford.edu/Polar.html>). Так в 20 солнечном цикле полярность обоих солнечных полюсов с августа 1970 г. примерно год оставалась отрицательной, т.е. гелиосфера оказалась открытой для положительно заряженных частиц (Устинова, 1983). Это привело к дополнительному дрейфу протонов ГКЛ в Солнечную систему и, в целом, как к более высокому уровню ГКЛ у Земли (Stozhkov et al., 2009), так и к малым градиентам скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах, выпавших в 20 солнечном цикле, по сравнению с 19-м (Лаврухина, Устинова, 1990; Алексеев, Устинова, 2006) (рис. 3).

Совершенно противоположная ситуация наблюдалась в максимумах 22 и 24 солнечных циклов, когда полярность магнитных полей у обоих полюсов была положительной, так что гелиосфера была закрыта для положительно заряженных частиц, что привело к глубочайшему минимуму интенсивности ГКЛ в стратосфере в 1990–1991 гг.

и к самым высоким градиентам скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах этого периода (Stozhkov et al., 2009; Алексеев, Устинова, 2006) (рис. 3). Ситуация в максимуме 24 солнечного цикла особенно интересна (Ishkov, 2010). Наблюдавшаяся слабость магнитных полей и необычная длительность спада солнечной активности перед 24 солнечным циклом привели к более высокой, в среднем, интенсивности ГКЛ у Земли и малым градиентам скоростей образования радионуклидов в нескольких выпавших в это время хондритах. Период, когда оба полюса были положительными продолжался всего 14 мес. (с июня 2012 г. по июль 2013 г.), но это практически совпало с периодом накопления ^{54}Mn (с декабря 2011 по февраль 2013) перед падением хондрита Челябинск и привело к высокому градиенту скорости его образования в этом хондрите (рис. 3) (Алексеев и др., 2015, 2019; Ustinova, Alexeev, 2018). Полученный результат демонстрирует высочайшую чувствительность скоростей образования радионуклидов в хондритах к малейшим изменениям магнитогидродинамических условий в гелиосфере и предоставляет нам высокопрецизионный метод для изучения процессов солнечной модуляции ГКЛ на любых гелиоцентрических расстояниях внутренней гелиосферы (Устинова, 2016; Ustinova, Alexeev, 2018).

Как проявляются эти процессы на длительной временной шкале? Такие фундаментальные закономерности позволяют выявить вторую особенность космогенных радионуклидов, а именно, существование долгоживущих радионуклидов, в частности, ^{26}Al с $T_{1/2} = 0.717$ млн лет. Для оценки

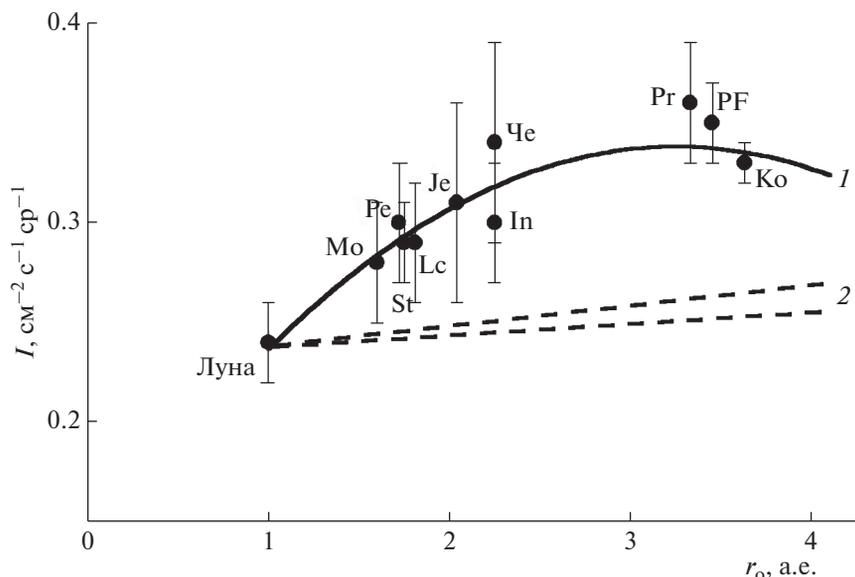


Рис. 5. Рост с гелиоцентрическим расстоянием средней за миллион лет интенсивности ГКЛ ($E > 100\text{МэВ}$) по данным о содержании ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами (кривая 1 (Устинова, Алексеев, 2019) в сравнении с ожидаемым ростом интенсивности ГКЛ при их модуляции только общим объемом солнечного ветра (градиент 2–4%/а. е., пунктирные прямые 2).

средней за миллион лет интенсивности ГКЛ на 1 а. е. были проанализированы глубинные профили ^{26}Al в колонках лунного грунта Луны-24 (L-24) и Apollo-15 (Ap-15) (Лаврухина и др., 1984; Povines et al., 1983; Rancitelli и др., 1975). Показано, что они количественно воспроизводятся расчетом при использовании средней интенсивности ГКЛ ($E > 100\text{МэВ}$) $I = 0.24 \pm 0.02 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, соответствующей средней интенсивности за современные солнечные циклы (Stozhkov et al., 2009), что свидетельствует о постоянстве процессов солнечной модуляции вблизи Земли в течение последнего ~1 млн лет. Использование найденных в диапазоне 15–36%/а. е. градиентов скоростей образования ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами (Устинова, Алексеев, 2019) позволяет увидеть, что происходит на других гелиоцентрических расстояниях. На рис. 5 представлен полученный профиль средней за миллион лет интенсивности ГКЛ в гелиосфере, если градиенты ГКЛ равны градиентам скоростей образования ^{26}Al .

Видно, что полиномиальная кривая через отдельные точки демонстрирует не непрерывный рост, а тенденцию к выполаживанию, что свидетельствует о локальности участка гелиосферы с динамическими процессами проявления солнечной модуляции, т.е. о перманентном существовании эффективного модулирующего слоя магнитных неоднородностей на 2–4 а. е. внутренней гелиосферы в течение последнего ~1 млн лет (Лаврухина, Устинова, 1990). Однако, как отмечалось выше, градиенты интенсивности ГКЛ не

равны градиентам скоростей образования радионуклидов, будучи, как минимум, на порядок ниже, т.е. ~2–4%/а. е., что сводит закономерность кривой 1 к диапазону прямых 2. Это значит, что периодические 11-летние вариации средней интенсивности ГКЛ во внутренней гелиосфере при усреднении за миллион лет в пределах ошибок отсутствуют. Демонстрируется ее непрерывный рост со средним градиентом ~2–4%/а. е., ожидаемый, в основном, при современной модуляции лишь общим объемом солнечного ветра (Potgieter, 2013), что подтверждает постоянство механизма солнечной модуляции в течение последнего миллиона лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В преддверии предстоящего освоения ближайшего межпланетного пространства знание динамики радиационной обстановки в области внутренней гелиосферы приобретает первостепенное значение. Имеющаяся экспериментальная и теоретическая информация о сложности и многообразии магнитогидродинамических процессов вблизи Земли настоятельно требует соответствующих знаний о том, что происходит с удалением от Земли. Эпизодические дорогостоящие запуски КА и КК нацелены на изучение планет и других тел Солнечной системы, что приносит бесценную информацию. При наиболее продолжительных полетах некоторых из них оказывается возможным даже исследовать отдаленные районы гелиосферы, в частности, изучать поведение ГКЛ

в гелиопаузе. Однако время их пролета внутренней гелиосферы слишком кратковременно и на данном этапе не может быть достаточно частым, чтобы обеспечить непрерывную информацию. Возможно в отдаленном будущем будет создана идеальная патрульная служба с размещением идентичных счетчиков интенсивности ГКЛ на искусственном спутнике Земли и на каком-нибудь астероиде на 4–5 а. е., чтобы непрерывно фиксировать все моменты изменения радиационной обстановки на протяжении нескольких солнечных циклов на разных гелиоцентрических расстояниях.

В настоящее время единственную непрерывную информацию по распределению и вариациям интенсивности ГКЛ в области внутренней гелиосферы предоставляет составленный нами однородный ряд данных по скоростям образования космогенных радионуклидов в последовательно выпадающих хондритах с разными орбитами. Фактически, это уникальный пространственно-временной континуум интенсивности и вариаций ГКЛ во внутренней гелиосфере, создание которого недоступно прямым измерениям при эпизодических полетах КК в межпланетном пространстве. Следует отметить, что даже при возможном развитии в будущем постоянной патрульной службы по измерению интенсивности ГКЛ на разных расстояниях от Солнца, составленный уникальный ряд однородных данных по распределению и вариациям скоростей образования космогенных радионуклидов в области внутренней гелиосферы сохранит свое непреходящее значение для выявления особенностей магнитогидродинамических процессов в этой области в прошлом и их прогнозирования в будущем.

Метеориты предоставляют сравнительно дешевый метод извлечения уникальной информации об особенностях солнечной модуляции и других динамических процессов в гелиосфере. Однако эти исследования базируются на работе многих специалистов в смежных областях. Достигнутый в последние полвека прогресс в разработке высокопрецизионных методов низкофоновой спектрометрии, в совершенствовании теоретических подходов к количественному анализу измеренных содержаний космогенных радионуклидов, в расширении болидной сети фотографирования метеоритных падений ведет к повышению точности результатов, а использование специалистами разных подходов и методов увеличивает количество независимых данных и улучшает статистику результатов.

В настоящее время нет альтернативы постоянному непрерывному изучению магнитогидродинамической обстановки в ближней гелиосфере с помощью космогенных радионуклидов в выпадающих на Землю метеоритах. Представляется целесообразным выдвинуть проект метеоритной

патрульной службы для непрерывного изучения и предсказания особенностей магнитогидродинамических процессов в этой части космического пространства (Ustinova, Alexeev, 2018).

Выражаем глубокую благодарность проф. Г.А. Базилевской и ее коллегам из Лаборатории физики Солнца и космических лучей Физического института РАН за предоставление ежемесячных результатов баллонных экспериментов по измерению интенсивности ГКЛ в стратосфере.

Работа частично поддержана программой № 12 фундаментальных исследований Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Лаубенштейн М., Повинец П.П., Устинова Г.К. (2015) Космогенные радионуклиды в хондритах Челябинск и Kosice и особенности 23 и 24 солнечных циклов *Известия РАН. Серия физическая* 79(5), 650–653.
- Алексеев В.А., Лаубенштейн М., Повинец П.П., Устинова Г.К. (2019) Космогенные радионуклиды в метеоритах и солнечная модуляция галактических космических лучей во внутренней гелиосфере. *Астрономический Вестник* 53(2), 106–124.
- Алексеев В.А., Устинова Г.К. (2006) Солнечная модуляция галактических космических лучей в трехмерной гелиосфере по метеоритным данным. *Геохимия* (5), 467–482.
- Alexeev V.A., Ustinova, G.K. (2006) Solar modulation of galactic cosmic rays in the three-dimensional heliosphere according to meteorite data. *Geochem. Int.* 44(5), 423–438.
- Алексеев В.А., Горин В.Д., Ивлиев В.А., Кашкаров Л.Л., Устинова Г.К. (2008) Свежевыпавшие хондриты Бухара (CV3) и Kilabo (LL6): Параллельное изучение термoluminesценции, треков и космогенных радионуклидов. *Геохимия* (9), 915–933.
- Alexeev V.A., Gorin V.D., Ivliev A.I., Kashkarov L.L., Ustinova G. K. (2008) Recently Fallen Bukhara (CV3) and Kilabo (LL6) Chondrites: A Parallel Study of Luminescence, Tracks, and Cosmogenic Radionuclides. *Geochem. Int.* 46(9), 849–866.
- Алексеев В.А. (2003) Аблиция метеоритов по данным о распределении космогенных изотопов неона. *Астрономический Вестник* 37(3), 229–239.
- Витинский Ю.И. (1983) *Солнечная активность*. М.: Наука, 192с.
- Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. (1987) Гидромагнитное динамо как источник планетарного, солнечного и галактического магнетизма *УФН* 152(2), 263–284.
- Лаврухина А.К., Устинова Г.К. (1990) *Метеориты – зонды вариаций космических лучей*. М.: Наука, 262с.
- Лаврухина А.К., Устинова Г.К., Малышев В.В., Сатарова Л.М. (1973) Моделирование ядерных реакций в изотропно облучаемой толстой мишени. *Атомная Энергия* 34(1), 23–28.
- Лаврухина А.К., Повинец П., Устинова Г.К. (1984) Космогенные ^{22}Na и ^{26}Al в образцах лунного грунта из буровой колонки “Луны-24” *Космические исследования* 22(1), 110–119.

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. (1988) *Механика*. М.: Наука, 51–57.
- Устинова Г.К. (2016) Закономерности скоростей образования космогенных радионуклидов в гелиосфере и проблемы солнечной модуляции на длительной временной шкале. *ДАН* **471**(3), 289–293.
- Устинова Г.К., Алексеев В.А., Лаврухина А.К. (1988) Методы определения доатмосферных размеров метеоритов. *Геохимия* (10), 1379–1395.
- Ustinova G.K., Alexeev V.A., Lavrukina A.K. (1989) Methods of determining sizes of meteorites before atmospheric entry. *Geochem. Int.* **26**(5), 1–16.
- Устинова Г.К., Алексеев В.А., Лаврухина А.К. (1990) Эволюция метеоритных тел в космическом пространстве. *Сборник по космохимии*. Киев: Наукова думка, 123–130.
- Устинова Г.К., Алексеев В.А. (2019) Вариации скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах с известными орбитами. *ДАН* **485**(1), 33–37.
- Alania M.V., Dorman L.I., Lavrukina A.K., Ustinova G.K. (1983) GCR variations in the heliosphere according to Radioactivity of Meteorites. *Proc. 18th Intern. Cosmic-Ray Conf., Bangalore* **10**, 42–45.
- Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K. (2015) Variations of cosmogenic radionuclide production rates along the meteorite orbits. *Adv. Space Res.* **56**, 766–771.
- Bazilevskaya, G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B., Makhmutov, V.S., Svirzhevskaya, A.K., Svirzhevsky, N.S. (2014) Temporal and energy behavior of cosmic ray fluxes in the periods of low solar activity. *Proc. 33rd Intern. Cosm. Ray Conf, Rio de Janeiro. 2013. The Astroparticle Phys. Conf. arXiv: 1411.7534. 2014.* **1**.
- Bazilevskaya G.A., Svirzhevskaya A.K. (1998) On the stratospheric measurements of cosmic rays. *Space Sci. Rev.* **85**, 431–521.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Heber B., Yanke V.G., Raviart A., Mueller-Mellin R., Kunow H., Roehrs K., Wibberenz G., Paizis C. (2001) Latitudinal and radial variation of >2 GeV/n protons and α -particles in the southern heliosphere at solar maximum: ULYSSES COSPIN/KET and neutron monitor network observations. *Proc. 27th Intern. Cosmic-Ray Conf., Hamburg* **10**, 3996–3999.
- Bhandari N., Lal D., Rajan R.S., Arnold J.R., Marti K., Moore C.B. (1980) Atmospheric ablation in meteorites: A study based on cosmic ray tracks and neon isotopes. *Nucl. Tracks* **4**(4), 213–262.
- Bhandari N., Bonino G., Cini Castagnoli G., Taricco C. (1994) The 11-year solar cycle variation of cosmogenic isotope production rates in chondrites. *Meteoritics* **29**, 443–444.
- Bhattacharya S.K., Goswami J.N., Lal D. (1973) Semiempirical rates of formation of cosmic ray tracks in spherical objects exposed in space: pre' and post' atmospheric depth profiles. *J. Geophys. Res.* **78**(34), 8356–8363.
- Burlaga L.F. (1983) Understanding the heliosphere and its energetic particles. *Proc. 18th Intern. Cosmic-Ray Conf. Bangalore* **12**, 21–60.
- Burlaga L.F., Ness N.F. (1998) Magnetic field strength distributions and spectra in the heliosphere and their significance for cosmic ray modulation: Voyager 1, 1980–1994. *J. Geophys. Res.* **103**, 29719–29732.
- Eberhardt P., Geiss J., Lutz H. (1963) *Neutrons in meteorites. Earth Science and Meteoritics*. Amsterdam: North-Holland, 143–168.
- Evans I.C., Reeves I.H., Rancitelli L.A., Bogard D.D. (1982) Cosmogenic nuclides in recently fallen meteorites: Evidence for galactic cosmic ray variations during the period 1967–1978. *J. Geophys. Res.* **87**, 5577–5591.
- Fireman E.L. (1967) Radioactivities in meteorites and cosmic-ray variations. *Geochim. Cosmochim. Acta* **31**, 1691–1700.
- Graf Th., Baur H., Signer P. (1990) A model for the production of cosmogenic nuclides in chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**(9), 2521–2534.
- Ishkov V.N. (2010) Properties and Surprises of Solar Activity XXIII Cycle. *Sun and Geosphere* **5**(2), 43–46.
- Jarosewich E. (1990) Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses. *Meteoritics* **25**, 323–337.
- Lal D. (1972) Hard rock cosmic-ray archaeology. *Space Sci. Rev.* **14**, 3–102.
- Lavrukina A.K., Ustinova G.K. (1971) Solar proton medium flux constancy over a million years. *Nature* **232**, 462–463.
- Lavrukina A.K., Ustinova G.K. (1972) Cosmogenic radionuclides in stones and meteorite orbits. *Earth and Planet. Sci. Letts* **15**(4) 347–360.
- Lavrukina A.K., Ustinova G.K. (1981) Galactic cosmic-ray gradients in the ecliptic plane and at high latitudes during two solar cycles (meteorite data). *Adv. Space Res.* **1**, 143–146.
- Lavrukina A.K., Ustinova G.K., Ibraev T.A., Kuznetsova R.I. (1969) *Cosmic-radiation-induced radioactivity of the Moon and meteorites, and origin of meteorites. Meteorite Research*. Dordrecht: D. Reidel, 227–245.
- Moraal H., Stoker P.H. (2010) Long-term neutron monitor observations and the 2009 cosmic ray maximum. *J. Geophys. Res.* **115**, A12109.
<https://doi.org/10.1029/2010JAO15413>
- McKibben R.B., O'Gallagher J.J., Pyle K.R., Simpson J.A. (1977) Cosmic ray intensity gradients in the outer solar system measured by Pioneer 10 and 11. *Proc. 15th ICRC, Plovdiv* **3**, 240–245.
- McKibben R.B., Connell J.J., Lopate C., Zhang M., Anglin J.D., Balogh A., Dalla S., Sanderson T.R., Marsden R.G., Hofer M.Y., Kunow H., Posner A., Heber B. (2003) Ulysses COSPIN observations of cosmic rays and solar energetic particles from the South Pole to the North Pole of the Sun during solar maximum. *Ann. Geophys.* **21**, 1217–1228.
- Meier M.M.M. (2016) Meteorites with photographic orbits <http://www.meteoriteorbits.info>
- Miroshnichenko, Leonty (2015) *Solar Cosmic Rays. Fundamentals and Applications*. Springer, 456 p.
- O'Gallagher J.J., Simpson J.A. (1967) The heliocentric intensity gradient of cosmic ray protons and helium during minimum solar modulation *Astrophys. J.* **147**(2), 819–827.
- Parker E.N. (1969) Theoretical studies of the solar wind phenomenon. *Space Sci. Rev.* **9**, 325–360.
- Parker E.N. (1979) *Cosmic magnetic fields*. Oxford: Clarendon press. 841p.
- Potgieter M.S. (2013) Solar modulation of cosmic rays. *Living Rev. Solar Phys.* **10**, 3–66.

- Povinec P., Lavrukina A.K., Ustinova G.K. (1983) ^{22}Na and ^{26}Al in Luna-24 samples. *Proc. 18th Intern. Cosmic-Ray Conf., Bangalore* **2**, 385–388.
- Povinec P.P. (1987) History of cosmic rays by cosmogenic radionuclides. *Proc. 20th Intern. Cosmic-Ray Conf. Moscow: IUPAP*. **7**, 115–137.
- Rancitelli L.A., Fruchter J.S., Felix W.D., Perkins R.W., Wogman N.A. (1975) Cosmogenic isotope production in Apollo deep-core samples. *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th*. **2**, 1891–1899.
- Reedy R.C., Arnold J.R., Lal D. (1983) Cosmic-ray record in solar system matter. *Science* **219**, 127–135.
- Russell S., Zipfel J., Folco L., Jones R., Grady M.M., McCoy T., Grossman J. N. (2003) The Meteoritical Bulletin, № 87, 2003 July. *Meteoritics & Planetary Science* **38**(7), Supplement, A189–A248.
- Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A.K. (2009) Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere. *Adv. Space Res.* **44**(10), 1124–1137.
- Ustinova G.K. (1995) Cosmic rays in the heliosphere and cosmogenic nuclides. *Nucl. Geophys.* **9**, 273–281.
- Ustinova G.K. (1983) Quasistationary asymmetry of the galactic cosmic ray density distribution in the heliosphere. *Proc. 18th Intern. Cosmic-Ray Conf., Bangalore* **10**, 42–45.
- Ustinova G.K., Lavrukina A.K. (1990) Analytical expressions for distribution of cosmic radiation and radionuclides in meteorites. *Proc. 21st Intern. Cosmic-Ray Conf., Adelaide* **7**, 141–144.
- Ustinova G.K. (2018) Solar proton effects in chondrites of low level ablation. *Experiment in Geosciences* **24**(1), 51–55.
- Ustinova G.K. Alexeev V.A. (2018) Meteorite patrol service for studying temporal and spatial variations of galactic cosmic rays in the internal heliosphere. *MAPS* **53**(S1) 6056. (Presentation at The 81st Annual meeting of The Meteoritic Society. Moscow, 2018; <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29814.70726>)
- Usoskin I. G., Desorgher L., Velinov P., Storini M., Flückiger E.O., Büttikofer R., Kovaltsov G.A. (2009) Ionization of the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays. *Acta Geophys.* **57**(1), 88–101.
- Venkatesan D., Decker R.B., Krimigis S.M. (1987) Cosmic ray intensity gradients during 1984–1986. *Proc. 20th Intern. Cosmic-Ray Conf., Moscow* **3**, 385–388.