

УДК 523.165

КОСМОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В МЕТЕОРИТАХ И СОЛНЕЧНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВНУТРЕННЕЙ ГЕЛИОСФЕРЕ

© 2019 г. В. А. Алексеев^а, * М. Лаубенштейн^б, П. П. Повинец^с, Г. К. Устинова^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

^бNational Laboratory of Gran Sasso, INFN, Assergi, Italy

^сDepartment of Nuclear Physics and Biophysics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Bratislava, Slovakia

*e-mail: aval37@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2017 г.

После доработки 05.07.2018 г.

Принята к публикации 05.07.2018 г.

Космогенные радионуклиды с периодами полураспада $T_{1/2}$ от нескольких дней до миллиона лет, образованные в ядерных реакциях галактических космических лучей (ГКЛ) с веществом метеоритов, предоставляют ценную информацию о вариациях интенсивности ГКЛ на длительной временной шкале (~1 млн лет) в пределах протяженности метеоритных орбит (2–4 а. е. от Солнца). Информация о вариациях градиентов потоков ГКЛ во внутренней гелиосфере была получена при сравнении измеренных содержаний ^{54}Mn и ^{22}Na в каменных метеоритах (хондритах) с известными орбитами на момент их падения на Землю с рассчитанными скоростями образования в них этих радионуклидов при использовании данных баллонных измерений интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) в стратосфере в соответствующие периоды времени. Хотя индивидуальные значения градиентов демонстрируют значительные неопределенности, важной информацией является то, что космогенные радионуклиды в хондритах предсказывают низкие градиенты (0–10% на 1 а. е.) для всех периодов минимума солнечной активности в 1957–2013 гг., в соответствии с прямыми измерениями в межпланетном пространстве. Высокие градиенты (50–100%/на 1 а. е.) предсказываются для периодов максимума солнечной активности, особенно в 1992 и 2012 гг. (до ~200%/на 1 а. е.). Средние значения градиентов (20 ± 10)/на 1 а. е. за современные солнечные циклы (согласно скорости образования ^{22}Na), подобны средним значениям за последний ~1 млн лет (согласно скорости образования ^{26}Al), что свидетельствует о постоянстве механизма солнечной модуляции ГКЛ, по крайней мере, в течение последнего миллиона лет.

Ключевые слова: космические лучи, метеориты, космогенные радионуклиды, солнечная модуляция

DOI: 10.1134/S0320930X19010018

ВВЕДЕНИЕ

В течение уже многих лет метеориты рассматриваются в качестве детекторов космических лучей вдоль их орбит (примерно до 4 а. е. от Солнца), благодаря образованию в их телах космогенных радионуклидов при взаимодействии (в основном) ГКЛ с веществом. Метеориты являются объектами примерно сферической формы, изотропно облучаемыми космическими лучами в 4π -геометрии, тогда как астероиды или поверхность Луны облучаются в 2π -геометрии. Образующиеся в таких взаимодействиях космогенные радионуклиды с периодами полураспада от нескольких дней до ~миллиарда лет позволяют, таким образом, изучать пространственные и временные вариации интенсивности ГКЛ на разной временной шкале

(Lavrukhina и др., 1969; Lal, 1972; Nishiizumi и др., 1979; Evans и др., 1982; Honda и др., 1982; Alania и др., 1983; Reedy и др., 1983; Povinesc, 1987; Лаврухина, Устинова, 1990; Ustinova, 1995; Алексеев, Устинова, 2006; Leya и др., 2009).

Особую группу метеоритов составляют метеориты, чье падение удалось сфотографировать а скорость зарегистрировать, что позволило рассчитать параметры орбит (Vogovička и др., 2015). Недавно нам посчастливилось исследовать два таких метеорита с известными орбитами, а именно, хондриты Košice (падение 28 февраля 2010 г. в Словакии) (Vogovička и др., 2013a; Povinesc и др., 2015a) и Челябинск (падение 15 февраля 2013 г. в России) (Vogovička и др., 2013b; Brown и др., 2013; Poroва и др., 2013; Povinesc и др., 2015b). С учетом

этих хондритов число метеоритов с известными орбитами достигло 26 (Vogovička и др., 2015; Meier, 2016). Орбита Челябинска оказалась намного меньше, чем орбита Košice: их афелии лежали на 2.78 а. е. (Vogovička и др., 2013b) и 4.5 а. е. (Vogovička и др., 2013a), соответственно. Средние гелиоцентрические расстояния орбит Челябинска и Košice равнялись $\bar{r}_c = 2.25$ а. е. и $\bar{r}_k = 3.63$ а. е., соответственно.

Доступными для изучения оказываются следующие космогенные радионуклиды с разными периодами полураспада

- Относительно короткоживущие радионуклиды (например, ^{48}V ($T_{1/2} = 16$ сут), ^{46}Sc ($T_{1/2} = 84$ сут) и ^{54}Mn ($T_{1/2} = 312$ сут)), интегрирующие космические лучи в течение последних месяцев перед падением метеоритов;
- Радионуклиды со средними периодами полураспада (например, ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6$ г.) и ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.27$ г.)), интегрирующие космические лучи в течение последних лет перед падением метеоритов;
- Долгоживущие радионуклиды (например, ^{41}Ca ($T_{1/2} = 99.4$ тыс. лет), ^{36}Cl ($T_{1/2} = 0.301$ млн лет), ^{26}Al ($T_{1/2} = 0.717$ млн лет), ^{10}Be ($T_{1/2} = 1.39$ млн лет), ^{53}Mn ($T_{1/2} = 3.7$ млн лет), ^{40}K ($T_{1/2} = 1.248$ млрд лет)), интегрирующие космические лучи в течение последних миллионов и миллиарда лет перед падением метеоритов.

Благодаря успешному развитию ускорительной масс-спектрометрии (см., например, Jull, 2006; Burr, Jull, 2009; Welten и др., 2011; Meier и др., 2012; Jull, Burr, 2013) и высокочувствительной (часто подземной) гамма-спектрометрии с германиевыми детекторами (HPGe) (Laubenstein и др., 2004; Povines и др., 2005; Naack и др., 2012; Kováčik и др., 2012) стала доступной высокочувствительная техника анализа коротко- и долгоживущих космогенных радионуклидов в очень малых концентрациях (даже в миллиграммовых образцах).

Измеряемые на момент падения метеоритов на Землю содержания космогенных радионуклидов (около 80%) накапливаются в них в течение $\sim 1.5T_{1/2}$ радионуклидов перед падением. Решая систему уравнений Кеплера для движения метеорита на орбите, можно выделить часть орбиты, на которой накапливается среднее содержание каждого радионуклида перед падением метеорита. Например, долгоживущий ^{26}Al образуется в течение многих обращений метеорита вокруг Солнца под действием ГКЛ средней интенсивности за ~ 1 млн лет на среднем гелиоцентрическом расстоянии метеоритной орбиты. С другой стороны, короткоживущие ^{48}V и ^{46}Sc образуются под действием ГКЛ средней интенсивности вбли-

зи Земли примерно за 30 и 150 сут соответственно, до падения метеорита.

Интенсивность ГКЛ вблизи Земли (для частиц с энергией > 100 МэВ) можно оценить благодаря стратосферным баллонным измерениям (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014) или из данных IMP (McKibben и др., 1977). Естественно соотносить среднюю интенсивность ГКЛ среднему гелиоцентрическому расстоянию (соответствующему моменту $\sim 0.75T_{1/2}$), на котором находился метеорит в течение последних $\sim 1.5T_{1/2}$ перед падением на Землю. Вблизи поверхности метеоритов (~ 1 см) могли находиться и космогенные радионуклиды, образованные ГКЛ низких энергий (≤ 100 МэВ), также как и солнечными космическими лучами, но близповерхностные слои обычно теряются при абляции метеоритов в атмосфере. Таким образом, измеряемые в выпавших метеоритах содержания космогенных радионуклидов образованы в основном ГКЛ с энергией > 100 МэВ.

Космогенные радионуклиды в метеоритах используются для расчета важных параметров метеоритов, таких как их экспозиционный (CRE) возраст, земной возраст и доатмосферные размеры (Lavrukina и др., 1969; Lal, 1972; Устинова и др., 1989; Лаврухина, Устинова, 1990; Marti, Graf 1992; Herzog, 2005; Eugster и др., 2006; Welten и др., 2011; Povines и др., 2015a; 2015b).

Интегральные потоки первичной компоненты ГКЛ рассчитываются из измеряемой в баллонных экспериментах на высоте 15–23 км земной атмосферы интенсивности космического излучения в переходном максимуме (Pforzger maximum) путем вычета вторичных частиц. Эти измерения на станциях Мурманск и Мирный ведутся непрерывно с 1957 г., так что к настоящему времени доступны уже длинные ряды однородных ежемесячных данных по интенсивности ГКЛ (> 100 МэВ) на 1 а. е. от Солнца (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014). Сравнительная интенсивность ГКЛ на средних гелиоцентрических расстояниях свежесвыпавших метеоритов (по результатам измерений содержания космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада) с данными стратосферных измерений на 1 а. е. за тот же период времени, можно оценить градиенты потоков ГКЛ ($E > 100$ МэВ) для разных временных интервалов и в разных частях гелиосферы (Lavrukina, Ustinova, 1981; Ustinova, Lavrukina, 1987; Лаврухина, Устинова, 1990). Благодаря таким исследованиям можно извлечь информацию не только о природе механизма солнечной модуляции, но и о структуре трехмерной гелиосферы (Ustinova, 1995; Алексеев, Устинова, 2006; Potgieter, 2013). Изучение космических лучей необходимо для лучшего понимания их происхождения, распространения в космическом пространстве и модуляции их интенсивности в гелиосфере.

Целью работы является использование измеренных в метеоритах содержаний космогенных радионуклидов для изучения временных и пространственных вариаций потоков космических лучей (в частности, градиентов ГКЛ) в Солнечной системе на разных стадиях солнечной активности. Выбраны три космогенных радионуклида (^{54}Mn , ^{22}Na и ^{26}Al), продуктов взаимодействия ГКЛ с веществом метеоритов для детального изучения их скоростей образования в недавно выпавших каменных метеоритах, хондритах Košice (Vogovička и др., 2013a; Tóth и др., 2015; Povines и др., 2015a) и Челябинск (Vogovička и др., 2013b; Brown и др., 2013; Ророва и др., 2013; Povines и др., 2015b). Существуют также оценки градиентов ГКЛ для ряда предшествующих лет, полученные тем же методом и при использовании тех же радионуклидов еще в пяти хондритах с известными орбитами, выпавшими в 1959–2000 гг. (Lavruckhina, Ustinova, 1981; Алексеев, Устинова, 2006), что позволяет нам анализировать ряд однородных данных по градиентам потоков ГКЛ и их вариациям за последние пять солнечных циклов (1957–2013 гг.). Таким образом, целью работы является, с одной стороны, возможность продемонстрировать исследователям космического излучения и процессов в гелиосфере какую ценную космофизическую информацию несут в себе космогенные радионуклиды в метеоритах (подчас недоступную в настоящее время прямым измерениям в межпланетном пространстве), а с другой стороны, показать исследователям метеоритов наиболее эффективный подход к извлечению количественной информации о временных и пространственных вариациях потоков ГКЛ из данных по содержанию космогенных радионуклидов в свежес выпавших хондритах с известными орбитами.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Образцы хондритов Košice и Челябинск

Мы представляем результаты изучения 19 фрагментов метеорита Košice (обыкновенный хондрит химической группы H5) массой от 27 до 2370 г (Povines и др., 2015a). Плотность образцов варьирует между 3.22 и 3.88 г/см³; при средней плотности 3.51 г/см³. Для метеорита Челябинск (обыкновенный хондрит химической группы LL5) представляем результаты изучения 17 образцов массой от 2 до 387 г (Алексеев и др., 2015; Povines и др., 2015b). Их плотность варьирует между 2.91 и 3.53 г/см³; при средней плотности 3.20 г/см³. Неправильная форма обоих хондритов свидетельствует о сложных процессах фрагментации, которым хондриты подверглись при прохождении атмосферы. На некоторых образцах видны следы абляции из-за взаимодействия их вещества с атмосферой, что указывает или на их близкую к до-

атмосферной поверхности хондритов локализацию, или что они еще достаточно долго находились в атмосфере в виде фрагментов после взрывов метеороида. На некоторых образцах эффекты абляции незначительны, что свидетельствует об их происхождении или из внутренних частей метеороида, или из акта фрагментации в атмосфере уже на низких высотах.

Анализ космогенных радионуклидов в хондритах Košice и Челябинск

Гамма-спектрометрия 17 образцов хондрита Košice была выполнена без разрушения образцов с помощью широкообъемных германиевых детекторов (HPGe) в Низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории Отдела ядерной физики и биофизики Университета им. Комениуса в Братиславе (наземная лаборатория), а два маленьких образца были проанализированы в национальной лаборатории Национального института ядерной физики в Гран-Сассо (на глубине 1400 м). Образцы хондрита Челябинск были также проанализированы без разрушения в Братиславе (5 образцов), в Гран-Сассо (7 образцов) (Povines и др., 2015b), и пяти образцов в ГЕОХИ (Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, Москва) (Алексеев и др., 2015).

Поскольку содержания образованных радионуклидов зависят от их локализации в метеоритных телах (Leya, Masarik, 2009; Povines и др., 2015a; 2015b), результаты анализа сгруппированы в табл. 1 для разных глубин хондритов Košice и Челябинск: близповерхностные (<10 см), с глубин 10–50 см, и глубоко залегавшие фрагменты (с глубин >50 см).

Соответствующие глубины изучаемых образцов оценивались по плотности треков VН-ядер и по соотношению содержаний $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$. Полученные экспериментальные данные сравнивались затем с теоретическими скоростями образования космогенных радионуклидов в обоих хондритах.

Скорости образования космогенных радионуклидов в хондритах

Содержания космогенных радионуклидов в метеоритах (т.е. скорости их образования в условиях насыщения) зависят от многих факторов, включая интенсивность и спектр первичного космического излучения и вторичных ядерно-активных частиц, сечения образования радионуклидов, длительность облучения метеоритов (экспозиционный возраст CRE), химический состав и доатмосферные размеры метеоритов. Скорости образования космогенных радионуклидов зависят также от глубины в метеоритном теле из-за развития каскада ядерно-активных частиц разных поколений при изотропном облучении ме-

Таблица 1. Средние содержания космогенных радионуклидов (в распад $\text{м}^{-1} \text{кг}^{-1}$), измеренные в образцах хондритов Кошце и Челябинск, сгруппированные по глубине в соответствии с ожидаемой локализацией фрагментов (неопределенности ~ 1 сигма (Povines и др., 2015a; 2015b; Alexeev и др., 2015))

Хондрит	Глубина, см	^{54}Mn	^{22}Na	^{60}Co	^{26}Al	$^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$	$^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$
Кошце	<10	133 ± 6	90 ± 4	30 ± 4	62 ± 5	0.48 ± 0.13	1.45 ± 0.20
	10–50	181 ± 8	99 ± 10	120 ± 13	65 ± 5	1.85 ± 0.15	1.52 ± 0.21
Челябинск	<10	73 ± 6	72 ± 2	41 ± 5	29 ± 1	1.41 ± 0.12	2.48 ± 0.14
	10–50	75 ± 7	80 ± 9	69 ± 7	33 ± 4	2.09 ± 0.25	2.42 ± 0.17
	50–100	54 ± 6	38 ± 6	80 ± 8	15 ± 3	5.33 ± 0.43	2.53 ± 0.24
	>100	5 ± 4	7 ± 6	13 ± 10	5 ± 4	2.6 ± 2.3	1.4 ± 1.2

Таблица 2. Некоторые ядерные реакции, ведущие к образованию ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{60}Co и ^{26}Al в хондритах Кошце и Челябинск

Радионуклид	Ядерные реакции
^{54}Mn ($T_{1/2} = 312.13$ сут)	$^{56}\text{Fe} (n, p2n) ^{54}\text{Mn}$; $^{56}\text{Fe} (p, 2p1n) ^{54}\text{Mn}$
^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6029$ года)	$^{23}\text{Na} (n, 2n) ^{22}\text{Na}$; $^{23}\text{Na} (p, pn) ^{22}\text{Na}$ $^{24}\text{Mg} (n, p2n) ^{22}\text{Na}$; $^{24}\text{Mg} (n, 3n) ^{22}\text{Mg}^* \rightarrow ^{22}\text{Na}$ $^{24}\text{Mg} (p, 2p1n) ^{22}\text{Na}$ $^{27}\text{Al} (n, 2p4n) ^{22}\text{Na}$; $^{27}\text{Al} (p, 3p3n) ^{22}\text{Na}$ $^{28}\text{Si} (p, 2p1n) ^{22}\text{Na}$ ест.S(p, xpyn) ^{22}Na ест.S(n, xpyn) ^{22}Na
^{60}Co ($T_{1/2} = 5.2711$ года)	$^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$
^{26}Al ($T_{1/2} = 7.17 \times 10^5$ года)	$^{28}\text{Si} (n, p2n) ^{26}\text{Al}$; $^{28}\text{Si} (p, 2p1n) ^{26}\text{Al}$ $^{27}\text{Al} (n, 2n) ^{26}\text{Al}$; $^{27}\text{Al} (p, pn) ^{26}\text{Al}$ $^{56}\text{Fe} (N^*, xpyn) ^{26}\text{Al}$ ест.S(p, xpyn) ^{26}Al ест.S(n, xpyn) ^{26}Al

* N – ядро, p – протон, n – нейтрон.

теоритов ГКЛ (Lavrukhina и др., 1969; Reedy и др., 1983; Лаврухина, Устинова, 1990; Leya, Masarik 2009; Povines и др., 2015a; 2015b).

В данной статье рассматриваются космогенные радионуклиды со средними периодами полураспада (^{54}Mn , ^{22}Na , ^{60}Co) и долгоживущие (^{26}Al), которые могут использоваться для изучения временных и пространственных вариаций потоков космических лучей и которые были измерены высокоточной спектрометрией в образцах хондритов Кошце и Челябинск. Они были образованы в разных ядерных реакциях первичных и вторичных ядерно-активных частиц с основными элементами-мишенями химических составов Кошце и Челябинск (табл. 2). Тогда как ^{60}Co образуется в основном только нейтронами в реакции $^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$, радионуклиды ^{54}Mn , ^{22}Na и ^{26}Al образуются и протонами, и нейтронами.

Сильная зависимость нейтронных потоков от глубины и размеров метеоритов (Eberhardt и др., 1963) позволяет использовать образованный ими ^{60}Co (или отношение $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$) в качестве хороших индикаторов глубины залегания образцов в метеоритах (Alexeev и др., 2015; Povines и др., 2015a).

Важными параметрами расчета скоростей образования космогенных радионуклидов космическими лучами являются сечения ядерных реакций. Для построения функций возбуждения радионуклидов использовались данные сечений образования, полученные в экспериментах с тонкими мишенями на ускорителях и результаты разработанных систематизаций ядерных реакций. Для расчета скоростей образования радионуклидов их функции возбуждения взвешивались по энергетическим спектрам первичных и вторичных ядерно-активных частиц (Lavrukhina, Ustinova, 1971;

Таблица 3. Ряд основных элементов химических составов хондритов Košice (Ozdín и др., 2015) и Челябинск (Галимов и др., 2013), которые использовались в расчетах скоростей образования космогенных радионуклидов. Представленные результаты близки средним составам H и LL хондритов по данным (Wasson, Kallemeyn, 1988)

Хондрит	Na, вес. %	Mg, вес. %	Al, вес. %	Si, вес. %	Fe, вес. %	Co, ppm
Košice	0.60	13.80	1.07	16.51	28.85	868
Челябинск	0.76	15.50	1.18	18.30	20.30	460

Лаврухина, Устинова, 1990; Povines и др., 2015a; 2015b). Использовались также базы данных сечений новейших экспериментов (Koning и др., 2008; EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data), <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>, так же как ENDF (Evaluated Nuclear Data File), <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl.htm>).

Наконец, необходимой информацией для расчета скоростей образования космогенных радионуклидов является набор ядер-мишеней, т.е. элементный химический состав метеоритов. Некоторые основные элементы химических составов хондритов Košice (Ozdín и др., 2015) и Челябинск (Галимов и др., 2013) представлены в табл. 3.

Доатмосферные размеры хондритов Košice и Челябинск

Существенной проблемой в использовании космогенных радионуклидов в метеоритах в качестве детекторов космических лучей является оценка доатмосферных размеров метеоритов и глубины залегания в них исследуемых образцов. Наиболее чувствительные методы базируются или на содержании продукта нейтронного захвата ^{60}Co (Eberhardt и др., 1963; Устинова и др., 1989; Povines и др., 2015a), или на отношении $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$ (Алексеев и др., 2015) в сочетании с измерением плотности треков VH-ядер ($23 < Z < 29$) в кристаллах оливина и пироксена хондритов, если известен экспозиционный возраст хондритов (Bhattacharya и др., 1973; Bhandari и др., 1980).

Плотность треков VH-ядер была детально изучена в 24 и 59 зернах оливина хондритов Košice и Челябинск, соответственно (Алексеев и др., 2014). В хондрите Košice (образец № 57) плотность треков VH-ядер составляет 10^4 – 10^6 на 1 см^2 при среднем значении 2×10^5 на 1 см^2 (рис. 1). При экспозиционном возрасте хондрита Košice 6 млн лет (Povines и др., 2015a), измеренная средняя плотность треков соответствует глубине залегания образца $d = 11 \pm 1\text{ см}$.

Измеренная средняя плотность треков VH-ядер в двух фрагментах хондрита Челябинск лежит в пределах 5×10^4 – 10^7 на 1 см^2 , при среднем значении 6×10^5 на 1 см^2 (рис. 1), что при экспозиционном возрасте этого хондрита ~ 1.2 млн лет (Nishizumi и др., 2013; Наба и др., 2014; Povines и др., 2015b) соответствует $d \sim 3\text{ см}$.

Это указывает на то, что эти фрагменты или располагались на поверхности хондрита и пережили процесс абляции в атмосфере, или облучались на ранних стадиях формирования родительского тела хондрита и позднее были погребены в его глубине (Галимов и др., 2013; Povines и др., 2015b). Плотность треков VH-ядер в образцах с глубин более 20 см лежит ниже 10^2 на 1 см^2 .

Разброс плотности треков VH-ядер в хондрите Košice больше, чем в хондрите Челябинск, что может быть обусловлено разной глубиной залегания исследуемых образцов в этих хондритах (11 и 3 см соответственно), что подтверждается и средними значениями плотности треков: 2×10^5 на 1 см^2 и 6×10^5 на 1 см^2 , соответственно.

Значение отношений $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$ в хондрите Košice лежит в пределах 0.5–1.8 (табл. 1), что ясно указывает на разное расположение фрагментов. Доатмосферный радиус хондрита Košice оцени-

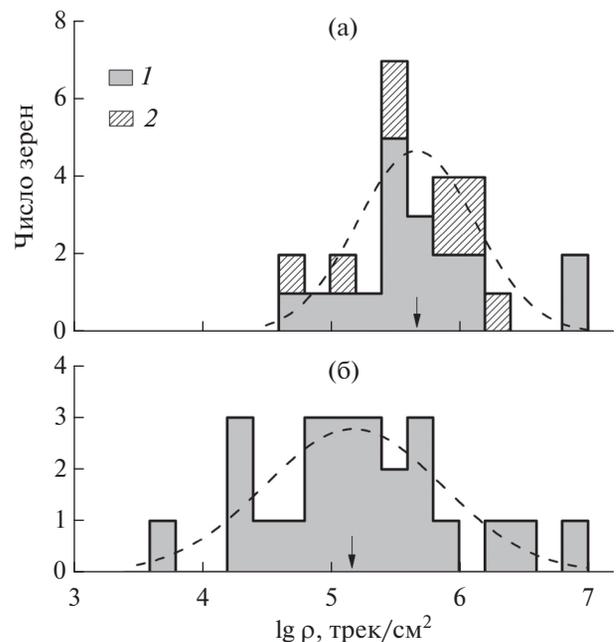


Рис. 1. Плотность треков VH-ядер (а) в 59 оливинных зернах из двух фрагментов хондрита Челябинск (1 – № 10–65; 2 – № 10–64) и (б) в 24 зернах фрагмента № 57 хондрита Košice. Распределения аппроксимированы гауссовыми кривыми; положения максимумов отмечены стрелками: (а) – 4.7×10^5 и (б) – 1.5×10^5 треков/ см^2 .

вается в ~ 50 см (Povines и др., 2015a; Alexeev и др., 2015), что при средней плотности хондрита 3.51 г/см³ соответствует метеороиду массой 1840 кг. По динамическим оценкам (Vogovička и др., 2013a) исходная масса метеороида составляла 3500 кг, что соответствовало радиусу 62.5 см при использовании значения валовой плотности 3.43 г/см³. Однако из-за неточностей фотометрии и абсолютной светимости эта массовая оценка может быть завышена почти в три раза.

Наблюдаемые содержания космогенных радионуклидов в хондрите Челябинск и моделирование Монте-Карло (Povines и др., 2015b), предсказывают гораздо больший размер, радиус порядка девяти метров. Значение отношения $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$ лежит в пределах $1.4\text{--}5.3$ (табл. 1), что также фиксирует разное расположение исследуемых образцов в хондрите Челябинск. Динамические оценки входа хондрита Челябинск в атмосферу соответствуют объекту радиусом 9.5 м (Vogovička и др., 2013b; Poroва и др., 2013; Brown и др., 2013).

Расчеты скоростей образования космогенных радионуклидов в метеоритах

Моделирование ядерных реакций под действием космических лучей в космических телах разных размеров и составов было выполнено с помощью каскадно-испарительной модели (СЕМ). Этот подход базируется на экспериментальном облучении мишеней в 4π -геометрии на ускорителе и последующем анализе образованных радионуклидов аналитическим методом, что детально разработано в работах (Lavrukhhina и др., 1969; Лаврухина и др., 1973; Lavrukhhina, Ustinova, 1978; Ustinova, 1995; Лаврухина, Устинова, 1990; Ustinova, Lavrukhhina, 1990; 1993). Аналитический метод позволяет рассчитывать скорости образования радионуклидов для конкретного спектра и заданной интенсивности космических лучей на любой глубине космических тел любого размера и состава. Особенно ценно, что в СЕМ модели при расчете скоростей образования космогенных радионуклидов в течение солнечных циклов используются непосредственно измеренные потоки ГКЛ на 1 а. е. в баллонных экспериментах в стратосфере (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014), что позволяет соотносить расчеты на 1 а. е. с содержаниями радионуклидов в метеоритах, накопленными на определенных расстояниях от Солнца в разные периоды солнечных циклов.

Скорость образования i -радионуклида в каменном метеорите может быть записана в следующей общей форме

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

где N – число Авогадро, $I_{p,s,t}(R, r)$ – интегральные потоки первичных, вторичных и третичных частиц в космическом теле 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 m_j – содержание j -элемента мишени в метеорите; $F^p(E)$ – 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 метеорите, измеренному на среднем гелиоцентрическом расстоянии \tilde{r} . Аналогично, H_{\oplus} (рассчитанное содержание радионуклида) соответствует содержанию радионуклида в том же метеорите, рассчитанному при использовании потока ГКЛ по данным стратосферных измерений (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014), что представляет скорость образования радионуклида вблизи Земли.

Средние гелиоцентрические расстояния хондритов Челябинск и Košice ($\tilde{r}_c = 2.25$ а. е. и $\tilde{r}_k = 3.63$ а. е., соответственно) естественно коррелируют с положениями их афелия на 2.78 а. е. (Vogovička и др., 2013a) и 4.50 а. е. (Brown и др., 2013), соответственно. Они рассчитываются путем решения уравнений Кеплера $r(t)$ движения метеорита на орбите (Ландау, Лифшиц, 1988):

$$\begin{cases} r = a(1 - e \cos E) \\ t = \frac{T}{2\pi} (E - e \sin E) \end{cases}, \quad (4)$$

(где a – большая полуось; e – эксцентриситет; E – эксцентрическая аномалия; T – орбитальный пе-

риод). Орбиты хондритов Кошце и Челябинск в координатах $r(t)$ представлены на рис. 2, где r – гелиоцентрические расстояния хондритов в моменты t их движения по орбите.

При $t = 0$, $r = q$, т.е. хондриты в перигелии. Примерно 80% измеренных на момент падения хондритов содержаний радионуклидов накапливается на последнем участке орбиты в течение $\sim 1.5T_{1/2}$ их периода полураспада. Например, ^{26}Al ($T_{1/2} = 0.7 \times 10^6$ г.) накапливается при облучении хондритов средней интенсивностью ГКЛ в течение ~ 1 млн лет на средних гелиоцентрических расстояниях их орбит.

Измеренное на момент падения метеорита содержание ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6$ г.) накапливается за последние ~ 4 года до его падения. При этом хондрит Кошце облучался средним за это время потоком ГКЛ на среднем гелиоцентрическом расстоянии 4.41 а. е. (соответствующем точке $0.75T_{1/2}$, т.е. 3/2008 г.) с апреля 2006 г. по февраль 2010 г., тогда как хондрит Челябинск облучался средним за 4 года до своего падения потоком ГКЛ на среднем гелиоцентрическом расстоянии 1.63 а. е. (соответствующим 3/2011 г.) с апреля 2009 г. по февраль 2013 г. (рис. 2). Аналогично, содержание ^{54}Mn ($T_{1/2} = 312$ сут) накапливается за последние 460 сут до падения метеорита. При этом хондрит Кошце облучался средним за это время потоком ГКЛ на среднем гелиоцентрическом расстоянии 2.67 а. е. (соответствующем 24/7/2009 г.) с декабря 2008 г. по февраль 2010 г., тогда как хондрит Челябинск облучался средним за 460 сут до своего падения потоком ГКЛ на среднем гелиоцентрическом расстоянии 2.35 а. е. (соответствующим 26/6/2012 г.) с декабря 2011 г. по февраль 2013 г. (рис. 2).

Очевидно, что наибольшую вероятность выпсть на Землю имеют космические тела ближе всего приближающиеся к 1 а. е. Естественно поэтому, что перигелий выпавших на Землю метеоритов близок к 1 а. е., что подтверждается, например, многочисленными результатами изучения их термолюминесценции (Melcher, 1981). Естественно, что и столкновения метеоритов с Землей происходят, в основном, вблизи перигелия: несколько до или после его прохождения. Зная аргумент перигелия, можно установить точку столкновения метеорита с Земле на орбите и уже от нее отсчитывать средние гелиоцентрические расстояния накопления измеряемых на момент падения метеоритов космогенных радионуклидов (при $t = 0$, r – точка падения метеорита на его орбите). В данной работе это не учитывалось, но вносимая неопределенность гораздо меньше ошибок расчета скоростей образования радионуклидов и поэтому не сказывается на конечных результатах.

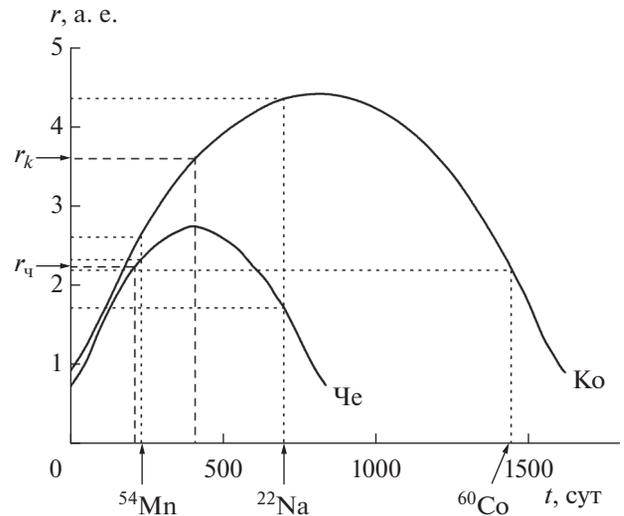


Рис. 2. Орбиты хондритов Кошце и Челябинск в зависимости гелиоцентрического расстояния r от времени t . Моменты среднего эффективного накопления содержаний ^{54}Mn и ^{22}Na ($\sim 0.75T_{1/2}$) отмечены на оси x , а соответствующие им средние гелиоцентрические расстояния указаны на оси y .

Моделирование ядерных реакций в космических телах разных размеров и составов можно выполнить и методом Монте-Карло (МС) (Armstrong, Alsmiller, 1970; Masarik и др., 1986; Masarik, Reedy, 1994; Leya, Masarik, 2009; Povines и др., 2015a; 2015b). Например, разумное соответствие (в пределах 10%) между скоростями образования космогенных радионуклидов в хондритах Кошце и Челябинск при расчете методами СЕМ (Alexeev и др., 2015) и МС (Povines и др., 2015a; 2015b) демонстрируется в случае хондрита Кошце на рис. 3.

Рассчитанный обоими методами глубинный профиль отношения $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$ показывает, что доатмосферный радиус хондрита Кошце $R \sim 50$ см, а глубина залегания образцов $d \sim 16$ см (рис. 3). Глубинный профиль ^{22}Na в хондрите Кошце, рассчитанный двумя методами для его накопления перед падением хондрита (4/2006 г.–2/2010 г.), при использовании средней интенсивности ГКЛ на 1 а. е. ($I_p = 0.3646 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ при $E > 100$ МэВ по стратосферным данным) представлен на рис. 3. Рассчитанная скорость его образования $H_{\oplus} = 102 \pm 10$ распад мин $^{-1}$ кг $^{-1}$ на глубине $d \sim 16$ см отмечена квадратом. Измеренная скорость образования ^{22}Na в хондрите Кошце на среднем гелиоцентрическом расстоянии $\bar{r} \sim 4.41$ а. е. за тот же период времени (в среднем, 3/2008 г., см. рис. 2) составляет $H_{\bar{r}} = 95 \pm 10$ распад мин $^{-1}$ кг $^{-1}$ отмечена кружком. Совпадение обеих точек свидетельствует о постоянстве средней интенсивности ГКЛ в гелиосфере (до ~ 4.5 а. е.) в течение самого глу-

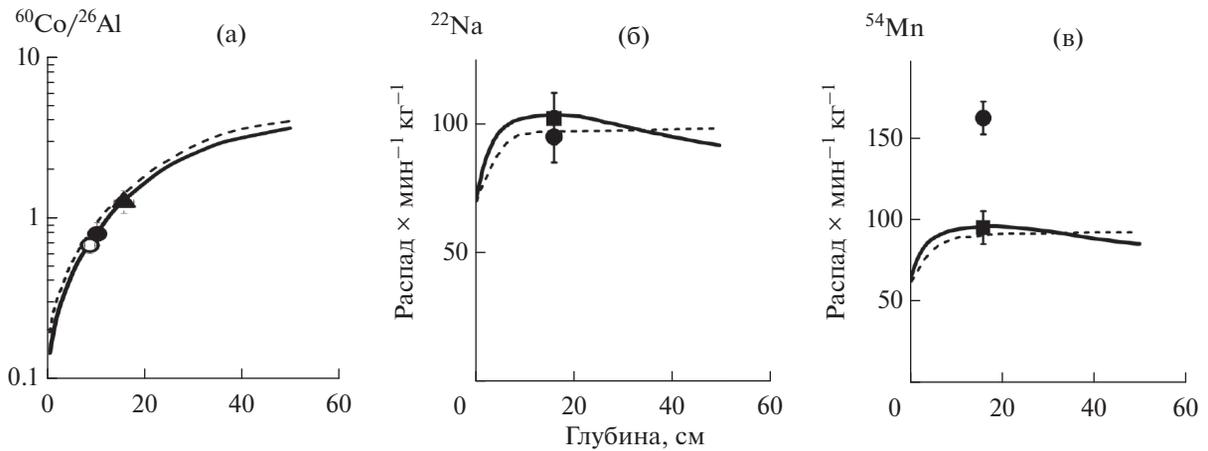


Рис. 3. Глубинные распределения отношения $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$ и скоростей образования ^{22}Na и ^{54}Mn в хондрите Коšце, рассчитанные методами СЕМ (сплошные кривые) (Alexeev и др., 2015) и МС (штриховые кривые) (Povinesc и др., 2015a). Светлый кружок представляет отношение $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$ в образце на глубине 9 см, установленной по плотности треков VН-ядер, а темные кружок и треугольник – это средние взвешенные (0.79 ± 0.12) и средние (1.25 ± 0.19) значения этого отношения в 19 образцах, соответствующих (при $R = 50$ см) средним глубинам (10.5 ± 1.5) и (16 ± 2) см соответственно. Рассчитанные H_{\oplus} и измеренные $H_{\tilde{r}}$ скорости образования ^{22}Na и ^{54}Mn отмечены квадратами и кружками, соответственно.

бокого минимума солнечной активности, наблюдавшегося в 23 солнечном цикле.

Глубинный профиль ^{54}Mn в хондрите Коšце, рассчитанный двумя методами для его накопления перед падением хондрита (12/2008 г.–2/2010 г.), при использовании средней интенсивности ГКЛ на 1 а. е. ($I_p = 0.4279 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ при $E > 100$ МэВ по стратосферным данным) представлен на рис. 3. Рассчитанная скорость его образования $H_{\oplus} = 95 \pm 10$ распад $\text{мин}^{-1} \text{ кг}^{-1}$ на глубине $d \sim 16$ см отмечена квадратом. Измеренная скорость образования ^{54}Mn в хондрите Коšце на среднем гелиоцентрическом расстоянии $\tilde{r} \sim 2.67$ а. е. за тот же период времени (в среднем, 7–8/2009 г., см. рис. 2) составляет $H_{\tilde{r}} = 162 \pm 16$ распад $\text{мин}^{-1} \text{ кг}^{-1}$ отмечена кружком. Хорошо видно, что рассчитанная скорость образования ^{54}Mn , H_{\oplus} , гораздо ниже, чем его измеренная скорость образования, $H_{\tilde{r}}$, на $\tilde{r} \sim 2.67$ а. е. Это обусловлено тем, что в течение максимума солнечной активности 24-го цикла солнечный ветер выметал частицы ГКЛ, так что их интенсивность вблизи Земли становилась ниже.

Расчеты градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов

Зная необходимые параметры метеоритов (состав, доатмосферные размеры, экспозиционный возраст), измеренные содержания космогенных радионуклидов на момент падения метеорита и средние гелиоцентрические расстояния, на которых радионуклиды образовывались перед паде-

нием метеорита, можно сравнить измеренные содержания радионуклидов с их рассчитанными скоростями образования на гелиоцентрическом расстоянии 1 а. е. при использовании стратосферных данных (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014) по интенсивности ГКЛ на 1 а. е. в течение соответствующих временных интервалов накопления их измеренных содержаний. Сравнение измеренных и рассчитанных скоростей образования может выявить их различие на разных гелиоцентрических расстояниях, т.е. пространственные вариации скоростей образования в гелиосфере в разные периоды времени.

Градиент скоростей образования радионуклида в гелиосфере можно выразить в форме

$$G_{\tilde{r}}^H = \frac{H_{\tilde{r}}/H_{\oplus} - 1}{\tilde{r} - 1} \times 100\%, \quad (5)$$

где $H_{\tilde{r}}$ – измеренное содержание радионуклида в метеорите (накопленное на среднем гелиоцентрическом расстоянии \tilde{r}), которое пропорционально средней интегральной интенсивности ГКЛ $I_{\tilde{r}}(>E)$ на \tilde{r} (см. (3)), а H_{\oplus} – его содержание в том же метеорите, рассчитанное при использовании интенсивности ГКЛ, полученной из стратосферных данных (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014) и представляющей его скорость образования вблизи Земли, которая пропорциональна интегральной интенсивности ГКЛ $I_{\oplus}(>E)$ на 1 а. е. Таким образом, рассчитывая скорости образования ^{22}Na и ^{54}Mn в исследуемом метеорите при средней интенсивности ГКЛ на

1 а. е. за периоды их накопления перед его падением (H_{\oplus}) и сравнивая с измеренными на момент падения метеорита содержаниями этих радионуклидов ($H_{\tilde{r}}$), накопленными на соответствующих ($0.75T_{1/2}$) для каждого радионуклида средних гелиоцентрических расстояниях \tilde{r} , можно, согласно (5), рассчитать градиенты скоростей образования $G_{\tilde{r}}^H$ каждого радионуклида (в % на 1 а. е.).

Для расчета градиентов $G_{\tilde{r}}^H$ из данных по содержанию космогенных радионуклидов, измеренных в метеоритах, необходимо иметь:

- Измеренные на момент падения метеорита содержания радионуклидов, например, данные по ^{54}Mn и ^{22}Na для последних солнечных циклов; содержание ^{60}Co для оценки доатмосферных размеров метеорита и глубины залегания образцов; и содержание ^{26}Al для расчета средних градиентов скоростей образования на длительной временной шкале (~1 млн лет);

- Химический состав (элементы-мишени) исследуемого метеорита;

- Средние гелиоцентрические расстояния (решение уравнений Кеплера), на которых при облучении ГКЛ в основном образуются радионуклиды перед падением метеорита;

- Доатмосферные размеры метеорита (в соответствии с имеющимися содержаниями космогенных радионуклидов);

- Экспозиционный возраст (CRE), рассчитываемый по изотопному составу благородных газов и/или по содержанию в метеорите ^{26}Al и ^{10}Be (необходимо только для расчета скоростей образования ^{26}Al);

- Локализация исследуемых образцов в метеоритном теле (оценивается по плотности треков VН-ядер и/или по отношению $^{60}\text{Co}/^{26}\text{Al}$).

Ошибки в расчетах $G_{\tilde{r}}^H$, согласно (5), складываются из ошибок измерения содержаний радионуклидов, из ошибок расчета их скоростей образования на 1 а. е. и из неопределенности оценок средних гелиоцентрических расстояний накопленных радионуклидов перед падением метеорита. Типичные относительные ошибки измеренных содержаний космогенных радионуклидов в метеоритах составляют ~10%. Расчеты их скоростей образования на 1 а.е. зависят от ошибок измерения потоков ГКЛ и ошибок в сечениях ядерных реакций. Сравнение рассчитанных и измеренных скоростей образования радионуклидов позволяет ожидать, что полная ошибка как в расчетах по СЕМ-модели (Alexeev и др., 2015), так и по методу МС (Leya, Masarik, 2009; Rovines и др., 2015a; 2015b) составляет порядка 10%. Величина градиента $G_{\tilde{r}}^H$ зависит также от абсолютного значения гелиоцентрического расстояния \tilde{r} , которое рас-

считывается по закону Кеплера движения метеорита по орбите и от периодов полураспада изучаемых радионуклидов. Поскольку здесь рассматриваются только метеориты с известными орбитами, параметры которых хорошо установлены (Vogovička и др., 2015), неопределенности рассчитанных гелиоцентрических расстояний заведомо ниже 10%. Поскольку предполагается интегрирование скоростей образования радионуклидов при движении метеорита по орбите (например, в течение 460 дней для ^{54}Mn , т.е. около 10% 11-летнего солнечного цикла), полная ошибка градиентов $G_{\tilde{r}}^H$ достаточно высока (порядка 20%). Она включает в себя все рассмотренные выше неопределенности, а также неопределенности из-за вариаций орбит и потоков ГКЛ.

По аналогии с уравнениями (3) и (5), для интегрального градиента интенсивности ГКЛ можно записать

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

где $I_{\tilde{r}}(>E)$ и $I_{\oplus}(>E)$ представляют интенсивности ГКЛ на средних гелиоцентрических расстояниях \tilde{r} и 1 а. е., соответственно. Эти интенсивности непосредственно связаны со скоростями образования радионуклидов $H_{\tilde{r}}$ и H_{\oplus} , соответственно, а градиенты скоростей образования в форме (5) полностью адекватны градиентам ГКЛ в форме (6), если жесткости спектров ГКЛ на расстоянии \tilde{r} и на 1 а. е. сравнимы, т.е. по крайней мере в пределах метеоритных орбит, и $H_{\tilde{r}}$ и H_{\oplus} рассчитываются по формуле (3). Однако жесткости энергетических спектров ГКЛ на разных гелиоцентрических расстояниях неизвестны и их неопределенность можно записать в виде отношения

$$K_{\tilde{r}}(R, r, \sigma^{p,s,t}, m) / K_{\oplus}(R, r, \sigma^{p,s,t}, m) \quad (7)$$

например, для скоростей образования радионуклидов в хондритах на разных стадиях солнечной модуляции вблизи Земли. Тогда различие между градиентами скоростей образования радионуклидов при среднем спектре (av – average) ГКЛ за солнечный цикл (примерно средний спектр в 1962 г.) и при практически немодулированном спектре (un – unmodulated) (средний спектр в апреле–мае 1965 г.), записанное в виде

$$k_{\text{av,un}} = \frac{|K_{\text{un}} - K_{\text{av}}|}{K_{\text{av}}}, \quad (8)$$

составляет около 11% для скоростей образования ^{26}Al , ^{22}Na и ^{54}Mn в Н5-хондритах (т.е., типа хондрита Košice).

Таким образом, с учетом всех рассмотренных аргументов можно считать, что градиенты скоростей образования радионуклидов в форме (5) адекватны градиентам ГКЛ в форме (6), и могут

Таблица 4. Градиенты $G_{\tilde{r}}^H$ скоростей образования ^{54}Mn и ^{22}Na в 2008–2012 гг. (по экспериментальным данным хондритов Košice и Челябинск)

Момент средней аккумуляции	Афелий, Q (а. е.)	Большая полуось, a (а. е.)	Среднее гелиоцентрическое расстояние, \tilde{r} (а. е.)	$G_{\tilde{r}}^H$ -градиент (% на 1 а. е.)
Košice	4.50 ^{&}	2.71 ^{&}		
3/2008*			4.41	-2.1 ± 3.8
24/7/2009 [§]			2.67	42 ± 11
Челябинск	2.78 [#]	1.76 [#]		
3/2011*			1.63	40 ± 26
26/6/2012 [§]			2.35	200 ± 40

* По ^{22}Na . [§] По ^{54}Mn . [#] Popova и др., 2013. [&] Borovička и др., 2013a.

демонстрировать реальные временные и пространственные вариации ГКЛ в гелиосфере (для частиц с энергией >100 МэВ). Это предоставляет уникальную информацию как об особенностях солнечной модуляции и других динамических процессах в гелиосфере, так и о структуре самой гелиосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Градиенты потоков ГКЛ по данным хондритов Košice и Челябинск

Градиенты скоростей образования радионуклидов $G_{\tilde{r}}^H$ в хондритах Košice и Челябинск были рассчитаны по формуле (5), используя экспериментальные данные по радионуклидам (табл. 1) и теоретические расчеты их скоростей образования на 1 а. е. с помощью СЕМ модели, при использовании стратосферных данных по интенсивности ГКЛ (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaia и др., 2014). Полученные результаты для периода 2008–2012 гг. (табл. 4) показывают, что в 2008 г. (год минимума солнечной активности) не было различий в интенсивности ГКЛ на 1 и 4.41 а. е. ($G_{\tilde{r}}^H = -2.1 \pm \pm 3.8\%$ на 1 а. е.), т.е. ^{22}Na в хондрите Košice образовывался на 4.41 а. е. при той же интенсивности ГКЛ, которая наблюдалась в 2008 г. у Земли (отсутствие солнечной модуляции ГКЛ).

Однако на восходящей ветви солнечной активности в 2009–2011 гг., данные по ^{54}Mn в хондрите Košice, так же как и данные по ^{22}Na в хондрите Челябинск указывают на градиент $G_{\tilde{r}}^H$ порядка $\sim 40\%$ на 1 а. е. между 2.7 и 1 а. е. Это значит, что интенсивность ГКЛ вблизи Земли была снижена солнечной модуляцией в сравнении с интенсивностью ГКЛ на 2.7 а. е. Позднее в течение 2012 г., согласно данным по ^{54}Mn в хондрите Челябинск, градиент $G_{\tilde{r}}^H$ увеличился до $200 \pm 40\%$ на

1 а. е. в связи с высокой солнечной активностью и сильной модуляцией ГКЛ, приведшей к сильному снижению интенсивности ГКЛ у Земли (Potgieter, 2013).

Космогенный радионуклид ^{22}Na образуется потоком со средней интенсивностью ГКЛ за последние ~ 4 года перед падением метеорита, т.е. примерно за один его оборот на орбите, что составляет примерно половину 11-летнего солнечного цикла. В то же время ^{26}Al образуется средней интенсивностью ГКЛ за последние ~ 1.4 млн лет, т.е. в течение многократных оборотов метеорита на орбите. Оба радионуклида, и ^{22}Na , и ^{26}Al , образуются в аналогичных реакциях (табл. 2), и их глубинные распределения тоже подобны (Лаврухина, Устинова, 1990; Povines и др., 2015a; 2015b). Из этого следует, что отношение $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ не зависит от глубинных эффектов в метеорите, но может зависеть от солнечной модуляции интенсивности ГКЛ (Evans и др., 1982; Bhandari и др., 1994; 2002) при условии, что экспозиционный возраст (CRE) метеорита не меньше ~ 1.4 млн лет, так что активность ^{26}Al в метеорите достигла насыщения.

Наблюдаемые отношения радионуклидов $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ во фрагментах хондрита Košice варьируют в пределах 1.2 и 1.9, что в пределах статистических погрешностей соответствует его различию во внутренних и внешних фрагментах (Povines и др., 2015a). Рассчитанное среднее значение 1.48 ± 0.19 (табл. 1) является близким к среднему значению 1.5 в хондритах, выпавших в течение нескольких солнечных циклов (Bhandari и др., 2002). Среднее значение отношения $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al} = 2.48 \pm 0.20$ в хондрите Челябинск гораздо выше, чем предсказанное 1.35 для LL-хондритов (Bhandari и др., 2002), что может быть обусловлено его коротким экспозиционным возрастом CRE ~ 1.2 млн лет (Nishizumi и др., 2013; Povines и др., 2015b). По причине короткого экспозиционного возраста (поскольку

Таблица 5. Данные хондритов с известными орбитами, использованные для расчета градиентов G_F^H в гелиосфере в 1957–2013 гг.

Хондрит	Тип	Дата падения	Q , а. е.	a , а. е.	R , см	d , см	$^{54}\text{Mn} \ ^{22}\text{Na} \ ^{26}\text{Al}$ распад мин ⁻¹ кг ⁻¹			Литература
Říbram (Pr)	H5	07/04/1959	4.012	2.401	~100	8–17	–	99 ± 11	53 ± 5	[1, 8, 9, 21–23]
Lost City (LC)	H5	03/01/1970	2.35	1.66	30	5–11	88 ± 9	75 ± 8	58 ± 6	[2, 9, 10–13, 21–23]
Innisfree (In)	L5	05/02/1977	2.758	1.872	20–30	6–20	92 ± 9	97 ± 10	64 ± 6	[3, 13–15, 21–23]
Peekskill (Pe)	H6	09/10/1992	2.10	1.49	~50	16 ± 2	–	116 ± 15	71 ± 6	[4, 16, 24]
Morávka (Mo)	H5	06/05/2000	2.71	1.85	25–30	10–15	112 ± 11	92 ± 9	57 ± 6	[5, 17, 24]
Košice (Ko)	H5	28/02/2010	4.50	2.71	50	16 ± 2	162 ± 16	95 ± 10	60 ± 2	[6, 18, 19, 25]
Челябинск (Че)	LL5	15/02/2013	2.70	1.72	>500	~46	45 ± 5	30 ± 3	28 ± 4	[7, 19, 20, 25]

Ссылки на параметры метеоритов: [1] Cepelca, 1977; [2] McCrosky и др., 1971; [3] Halliday и др., 1978; [4] Brown и др., 1994; 2013; [5] Borovička и др., 2003; [6] Borovička и др., 2013a; 2015; [7] Popova и др., 2013. Ссылки на содержания радионуклидов: [8] Fireman, 1967; [9] Lavrukhina, Ustinova, 1979; [10] Cressy, 1971; [11] Wrigley, 1971; [12] Bogard и др., 1971; [13] Rancitelli, Laul, 1977; [14] Evans и др., 1982; [15] Лаврухина, Устинова, 1990; [16] Graf и др., 1997; [17] Neder и др., 2001; [18] Povines и др., 2015a; [19] Алексеев и др., 2015; [20] Povines и др., 2015b. Ссылки на размеры хондритов и экранировку образцов: [17] Neder и др., 2001; [18] Povines и др., 2015a; [19] Алексеев и др., 2015; [20] Povines и др., 2015b; [21] Устинова и др., 1989; [22] Лаврухина, Устинова, 1990; [23] Bhandari и др., 1980; [24] Алексеев, Устинова, 2006; [25] Алексеев и др., 2014.

^{26}Al не достиг насыщения) наблюдаемые в хондрите Челябинск отношения $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$ нельзя использовать для оценки вариаций интенсивности ГКЛ в течение 24-го солнечного цикла.

По данным широкоформатного мюонного телескопа GRAPES-3 (Kojima и др., 2015) радиальный градиент потока ГКЛ с жесткостью 77 ГВ в 2000–2005 гг. составлял 0.65% на 1 а. е. Естественно, эти результаты нельзя сравнивать с метеоритными данными, которые относятся к частицам ГКЛ с энергией >100 МэВ. Действительно, солнечная модуляция ГКЛ зависит от их энергии, например, интенсивность частиц с $E > 100$ МэВ может меняться за 11-летний цикл в пять раз, тогда как для частиц с $E > 2$ ГэВ только в два раза (с быстрым снижением к нулю при более высоких энергиях) (Potgetier, 2013). Это позволяет ожидать, что в течение солнечных максимумов могут наблюдаться большие градиенты потоков ГКЛ, что обсуждается в следующем разделе.

Градиенты потоков ГКЛ по данным хондритов с известными орбитами (1957–2013 гг.)

Аналогично подробно описанному выше подходу на примере хондритов Košice и Челябинск были рассчитаны градиенты G_F^H для внутренней гелиосферы в течение пяти солнечных циклов по данным еще пяти хондритов с известными орбитами (Lavrukhina, Ustinova, 1981; Алексеев, Устинова, 2006) (табл. 5).

Первым хондритом с известной орбитой был выпавший в 1959 г. хондрит Říbram, а последним из включенных в этот список стал выпавший в 2013 г. хондрит Челябинск. Первые результаты по основанным на метеоритных данных градиентам

потоков ГКЛ были получены в (Lavrukhina, Ustinova, 1981; Алексеев, Устинова, 2006) и в других работах этих авторов. Рассчитанные градиенты G_F^H соответствуют гелиоцентрическим расстояниям от 2.1 а. е. (Peekskill) до 4.5 а. е. (Košice), т.е. наиболее динамичному району накопления неоднородностей солнечного ветра из-за закручивания магнитных полей по спирали Архимеда (Parker, 1969; 1979) на пути проникновения ГКЛ в Солнечную систему и очень разным стадиям солнечной активности в течение нескольких солнечных и магнитных циклов в 1957–2013 гг. Полученные оценки градиентов G_F^H (табл. 6) входят в диапазон от 0 (по данным хондритов Košice и Innisfree) до ~200% на 1 а. е. (по данным хондритов Peekskill и Челябинск).

Основанные на измеренных и рассчитанных содержаниях ^{54}Mn и ^{22}Na в семи хондритах с известными орбитами градиенты G_F^H демонстрируются на рис. 4 в сопоставлении с вариациями интенсивности ГКЛ на 1 а. е. по стратосферным данным (нижний график).

Поскольку интенсивность ГКЛ антикоррелирует с солнечной активностью (максимумы интенсивности ГКЛ вблизи Земли соответствуют периодам минимума солнечной активности), естественно видеть, что данные по радионуклидам, например, ^{22}Na в хондрите Lost City, ^{22}Na и ^{54}Mn в хондрите Innisfree, ^{22}Na в хондрите Morávka, ^{22}Na и ^{54}Mn в хондрите Košice и ^{22}Na в хондрите Челябинск, которые аккумулировались в течение периодов минимума или вблизи минимума солнечной активности демонстрируют малые (0–10% на 1 а. е.) градиенты G_F^H , т.е. интенсивность ГКЛ

Таблица 6. Оценки градиентов $G_{\tilde{r}}^H$ в 1957–2013 гг. по данным о содержании космогенных радионуклидов ^{54}Mn и ^{22}Na в хондритах с известными орбитами (см. табл. 5)

№	Хондрит, радионуклид	Период (месяц/год)	Средн. момент времени (месяц/год)	Средн. гелиоц. расстояние, \tilde{r} (а. е.)	$G_{\tilde{r}}^H$ -градиент (%/а. е.)*
1	Příbram, ^{22}Na	6/1955–4/1959	5/1957	3.33	100 ± 20
2	^{54}Mn	—	—	—	—
3	Lost City, ^{22}Na	3/1965–1/1970	2/1968	1.81	22 ± 22
4	^{54}Mn	10/1968–1/1970	5/1969	1.82	90 ± 30
5	Innisfree, ^{22}Na	4/1973–2/1977	3/1975	2.25	7 ± 13
6	^{54}Mn	11/1975–2/1977	6/1976	2.13	23 ± 16
7	Peekskill, ^{22}Na	12/1988–0/1992	11/1990	1.72	250 ± 60
8	^{54}Mn	—	—	—	—
9	Morávka, ^{22}Na	6/1956–5/2000	5/1998	1.6	20 ± 25
10	^{54}Mn	1/1999–5/2000	9/1999	1.83	80 ± 30
11	Košice, ^{22}Na	4/2006–2/2010	3/2008	4.41	-2.1 ± 3.8
12	^{54}Mn	12/2008–2/2010	8/2009	2.67	42 ± 11
13	Челябинск, ^{22}Na	6/2009–2/2013	3/2011	1.63	40 ± 26
14	^{54}Mn	11/2011–2/2013	7/2012	2.35	200 ± 40

* Данные в строчках 1–6 из (Lavrukina, Ustinova, 1981), в строчках 7–10 из (Алексеев, Устинова, 2006), в строчках 11–14 эта работа.

вдоль орбит этих хондритов была такой же, как у Земли. С другой стороны, содержание ^{22}Na в хондрите Příbram, ^{54}Mn в Lost City, ^{22}Na в Peekskill и ^{54}Mn в хондритах Morávka и Челябинск, которые накапливались в периоды максимумов или вблизи максимумов солнечной активности, демонстрируют гораздо более высокие градиенты. Например, рассчитанный по данным хондрита Peekskill градиент $G_{\tilde{r}}^H$ составляет $250 \pm 60\%$ на 1 а. е. Это значит, что интенсивность ГКЛ вблизи Земли была гораздо ниже, чем вдоль орбит этих хондритов в соответствующие периоды времени (см. рис. 4). Самый глубокий минимум интенсивности ГКЛ наблюдался в стратосфере в максимуме 22-го солнечного цикла (Bazilevskaya и др., 2014), что поддерживается и данными нейтронных мониторов (Moraal, Stoker, 2010) для частиц гораздо более высоких энергий, чем в баллонных экспериментах.

Рис. 4 демонстрирует различие градиентов $G_{\tilde{r}}^H$ в течение солнечных циклов, в соответствии с зарегистрированными в них минимумами и максимумами интенсивности ГКЛ (нижняя кривая). Согласно формуле (5), большие градиенты $G_{\tilde{r}}^H$ обусловлены тем, что рассчитанные градиенты скоростей образования радионуклидов на 1 а. е. оказались значительно ниже экспериментально измеренных в метеоритах скоростей образования

этих радионуклидов на средних гелиоцентрических расстояниях метеоритных орбит. Максимумы градиентов $G_{\tilde{r}}^H$ на шкале 11-летних солнечных циклов антикоррелируют с минимумами интенсивности ГКЛ как по стратосферным данным (см. рис. 4), так и по данным нейтронных мониторов (<http://cosmicrays.oulu.fi>). Например, относительное снижение интенсивности нуклонной компоненты на 20, 15, 10, 10 и 5% наблюдалось в 1969, 1982, 1991, 2000 и 2012 гг., соответственно.

Максимумы градиентов $G_{\tilde{r}}^H$ зафиксированы в эти же годы именно потому, что для их расчета использовались низкие скорости образования радионуклидов на 1 а. е., а вдоль метеоритных орбит измеренные скорости образования радионуклидов оказались высокими (см., например, на рис. 4: пик $G_{\tilde{r}}^H$ для ^{22}Na в хондрите Peekskill и пик для ^{54}Mn в хондрите Челябинск).

Средние градиенты $G_{\tilde{r}}^H$ в гелиосфере в течение последнего миллиона лет, согласно измеренным содержаниям ^{26}Al в хондритах с известными орбитами, составляют $26 \pm 18\%$ на 1 а. е. на 2–4.5 а. е. (табл. 7).

Следует подчеркнуть, что градиенты $G_{\tilde{r}}^H$ относятся к разным гелиоцентрическим расстояниям. Они плавно уменьшаются с уменьшением солнечной модуляции интенсивности ГКЛ на дале-

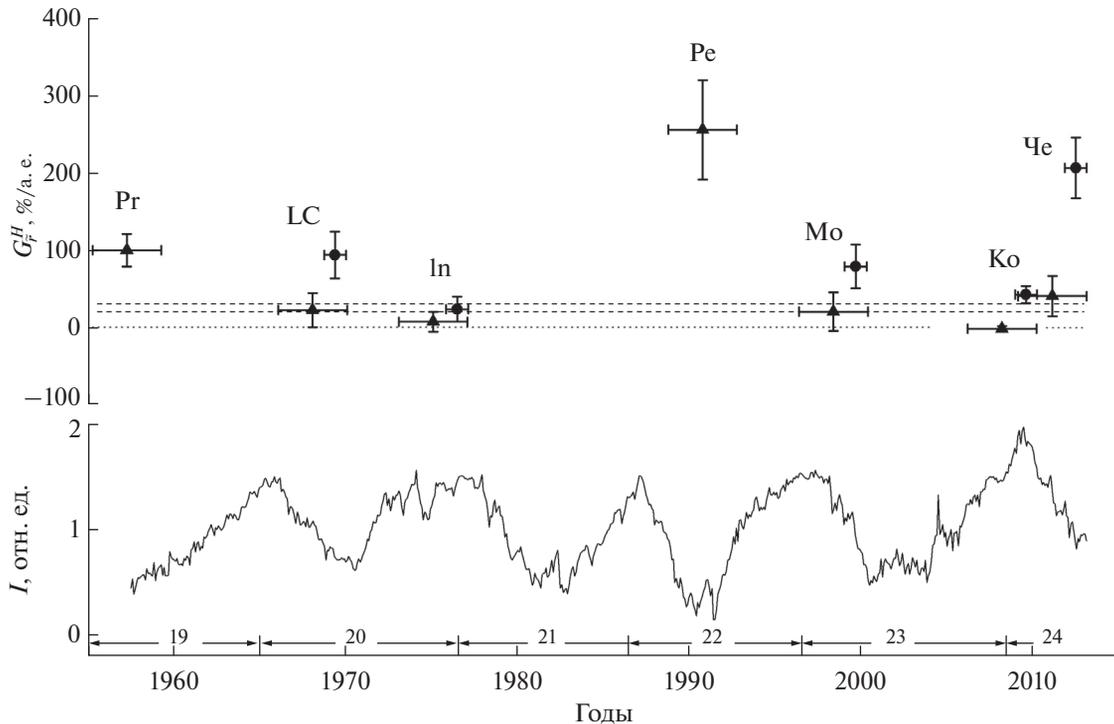


Рис. 4. Вариации градиентов G_r^H для частиц с энергией $E > 100$ МэВ в 1957–2013 гг. по данным о содержании космических радионуклидов в семи хондритах с известными орбитами; внизу вариации интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) у Земли по стратосферным данным (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaia и др., 2014). Точки и треугольники представляют градиенты скоростей образования ^{54}Mn и ^{22}Na , соответственно. Штриховые горизонтальные линии на 20–30% на 1 а. е. соответствуют средним градиентам G_r^H за ~ 1 млн лет (по скоростям образования ^{26}Al).

ких гелиоцентрических расстояниях (McKibben и др., 2003; Potgieter, 2013). Средние градиенты G_r^H за типичный солнечный цикл ($20 \pm 10\%$ на 1 а. е., согласно данным по содержанию ^{22}Na , аналогичны средним градиентам за последний миллион лет (20–30% на 1 а. е., см. табл. 7 и рис. 4), что свиде-

тельствует о постоянстве механизма солнечной модуляции ГКЛ, по крайней мере, в течение последнего миллиона лет.

Для оценки средней за миллион лет интенсивности ГКЛ на 1 а. е. были проанализированы глубинные профили ^{26}Al в колонках лунного грунта

Таблица 7. Средние за последний ~ 1 млн лет градиенты G_r^H скоростей образования ^{26}Al по его содержанию в хондритах с известными орбитами (табл. 5)

№	Хондрит*	Q , а. е.	q , а. е.	Среднее гелиоцентр. расстояние [#] , \tilde{r}_0 а. е.	Градиент [#] G_r^H % на 1 а. е.
1	Příbram (Pr)	4.05	0.78951	3.33	22 ± 9
2	Lost City (LC)	2.35	0.967	1.81	26 ± 22
3	Innisfree (In)	2.76	0.986	2.25	22 ± 14
4	Peekskill (Pe)	2.10	0.886	1.72	36 ± 24
5	Morávka (Mo)	2.71	0.9823	1.6	31 ± 21
6	Košice (Ko)	4.5	0.957	3.63	15 ± 7
7	Челябинск (Чe)	2.78	0.738	2.25	33 ± 27
8	Average			2.37	26 ± 18

* Метеоритные данные из (Вогови́чка и др., 2015). [#] Данные по \tilde{r}_0 и G_r^H в строчках 1–3 из (Lavrukina, Ustinova, 1981), в строчках 4 и 5 из (Алексеев, Устинова, 2006) и в строчках 6–8 — эта работа.

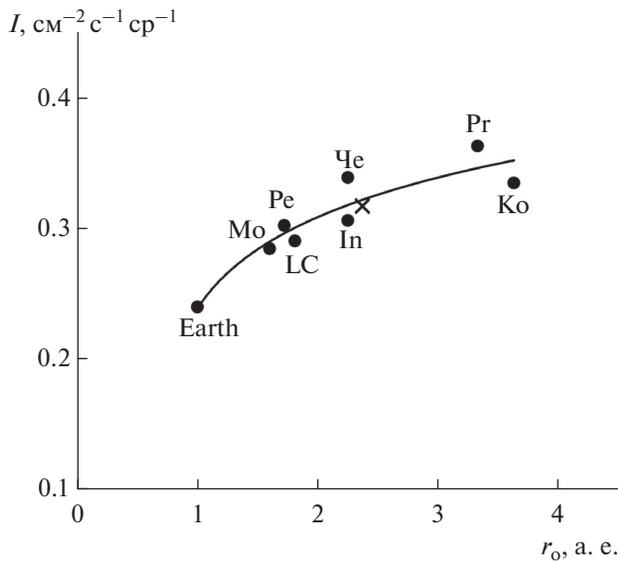


Рис. 5. Пространственное распределение средней за миллион лет интенсивности ГКЛ (>100 МэВ) в гелиосфере по данным о содержании ^{26}Al в хондритах с известными орбитами. Значение для Земли по глубинным профилям ^{26}Al в колонках лунного грунта Луна-24 и Apollo-15 (Лаврухина, Устинова, 1990; Rancitelli и др., 1975).

Луны-24 (L-24) и Apollo-15 (Ar-15) (Лаврухина, Устинова, 1990; Rancitelli и др., 1975). Показано, что они количественно воспроизводятся расчетом при использовании средней интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) $I = 0.24 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, соответствующей средней интенсивности за современные солнечные циклы, что свидетельствует о постоянстве процессов солнечной модуляции вблизи Земли в течение последнего ~ 1 млн лет. Использование найденных по метеоритным данным градиентов G_F^H скоростей образования ^{26}Al позволяет увидеть, что происходит на других гелиоцентрических расстояниях. На рис. 5 представлен полученный профиль средней за миллион лет интенсивности ГКЛ в гелиосфере.

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).

Действительно, полученные по метеоритным данным высокие значения градиентов характеризуют не всю гелиосферу, а свидетельствуют о том, что в годы высокой солнечной активности в пределах 2–4 а. е. от Солнца формируется модулиру-

ющий слой магнитных неоднородностей солнечного ветра эффективно рассеивающий ГКЛ. Этот эффективный модулирующий слой развивается, по-видимому, в зоне взаимодействия прямых и обратных ударных волн, высокоскоростного солнечного ветра и медленно циркулирующих потоков частиц космических лучей низких энергий (Burlaga, 1983; Лаврухина, Устинова, 1990; Алексеев, Устинова, 2006).

В период минимума солнечной активности остаточная модуляция вблизи Земли определяется, главным образом, солнечным ветром в объеме всей гелиосферы и проявляется в виде малых градиентов потоков ГКЛ. Действительно, измерения интенсивности ГКЛ с $E_p > 70$ МэВ в 1984–1986 гг. во время полетов Voyager-1 и Voyager-2 между 2 и 28 а. е. (Venkatesan и др., 1987) обнаружили ступенчатый характер снижения и возрастания интенсивности ГКЛ, как если бы ГКЛ преодолевали барьеры, т.е. области с другими условиями распространения (низкими коэффициентами диффузии и высокими градиентами). Ступеньки на кривой интенсивности ГКЛ, измеренной на космических аппаратах (КА), можно было скоррелировать со ступеньками на кривой интенсивности ГКЛ вблизи Земли, если учесть время запаздывания процессов в гелиосфере относительно активных процессов на Солнце из-за конечной скорости солнечного ветра. Это значит, что барьеры из магнитных неоднородностей солнечного ветра на пути ГКЛ продвигаются от Солнца к границе гелиосферы со скоростью солнечного ветра, модулируя прибывающие из Галактики потоки частиц (Лаврухина, Устинова, 1990; Lavrukina, Ustionva, 1979; 1981; Potgieter, Le Roux, 1987; Burlaga, Ness, 1998).

В противоположность интенсивности ГКЛ, которая антикоррелирует с солнечной активностью (см. нижнюю кривую на рис. 4), градиенты потока

ГКЛ и градиенты G_F^H коррелируют и с индексами солнечной активности (<http://www.sidc.be/silco/DATA/yearssn.dat>), и с мощностью межпланетных магнитных полей (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/form/dx1.html>), и с углом наклона гелиосферного токового слоя (<http://wso.stanford.edu/Tilts.html>) в трехмерной гелиосфере. Найденная положительная корреляция между градиентами G_F^H и параметрами гелиосферы различна для разных солнечных циклов, для N- и S-полусфер и для фаз роста и спада солнечного цикла (Алексеев, Устинова, 2006). Обнаружена высокая чувствительность градиентов G_F^H к изменениям магнитогидродинамических условий в трехмерной гелиосфере (Устинова, 2016), что особенно сильно проявилось в высоких значениях градиентов G_F^H скоростей образования ^{54}Mn в хондрите Челябинск (табл. 5, рис. 4). В течение периода накопле-

ния ^{54}Mn в хондрите Челябинск (дек. 2011 г. – фев. 2013 г.), обе полярные области гелиосферы были положительными (<http://wso.stanford.edu>), т.е. гелиосфера была закрыта для проникновения положительно заряженных частиц ГКЛ, так что интенсивность ГКЛ вблизи Земли была гораздо ниже, чем на среднем гелиоцентрическом расстоянии $r_c = 2.35$ а. е. накопления ^{54}Mn в хондрите Челябинск, что и привело к высокому градиенту G_r^H скорости его накопления. Согласно данным по содержанию ^{22}Na в хондрите Peakskill, аналогичная ситуация наблюдалась и в максимуме 22-го солнечного цикла (рис. 4). Эти результаты демонстрируют чрезвычайно тонкую чувствительность метеоритного метода к малейшим изменениям в структуре гелиосферы.

*Сравнение градиентов потоков ГКЛ
по метеоритным данным с прямыми измерениями
в межпланетном пространстве*

Значения градиентов G_r^H скоростей образования радионуклидов в метеоритах (рис. 4) можно сравнить с прямыми измерениями на космических аппаратах (КА). В то время как измерения на КА проводятся в определенный момент времени на заданном расстоянии от Солнца, градиенты G_r^H характеризуют значения градиентов потоков ГКЛ на средних гелиоцентрических расстояниях метеоритов в течение эффективного накопления ^{54}Mn и ^{22}Na в теле метеоритов. Поскольку, согласно формуле (5), градиенты G_r^H рассчитываются как отношения скоростей образования радионуклидов на средних гелиоцентрических расстояниях \tilde{r} и на 1 а. е., их значения пропорциональны средним значениям градиентов потоков ГКЛ между \tilde{r} метеоритов (вплоть до 4.5 а. е.) и Землей (при среднем значении интенсивности ГКЛ по стратосферным данным) в течение заданного временного интервала (согласно формуле (6)). Следовательно, сравнивая градиенты G_r^H с измерениями ГКЛ-градиентов потоков ГКЛ на (КА), следует помнить возможное временное и пространственное различие результатов обоих методов (т.е. обсуждавшееся выше возможное различие наклонов энергетических спектров ГКЛ).

Впервые вариации градиентов потоков ГКЛ в зависимости от солнечной активности в пределах 5 а. е. от Солнца были зарегистрированы при полете КА Ulysses (Belov и др., 2001; McKibben и др., 2003). Радиальные градиенты протонов с $E > 2$ ГэВ менялись от 0.5% на 1 а. е. в период минимума солнечной активности (1994–1996 гг.) до 5.3% на 1 а. е. в период максимума солнечной активности (1998–2001 гг.), т.е. градиенты увеличились примерно в 10 раз в течение 11-летнего солнечного

цикла. Следует, однако, отметить, что на КА Ulysses измерялись градиенты потока протонов с $E > 2$ ГэВ, тогда как метеоритные данные относятся к протонам с энергией выше 100 МэВ. Как уже упоминалось, для энергий выше ~ 100 МэВ возможны гораздо более высокие градиенты (примерно в 5 раз) (Potgieter, 2013), так что в период максимума солнечной активности в 1998–2001 гг. возможны градиенты порядка 25% на 1 а. е., что согласуется с градиентом G_r^H $20 \pm 15\%$ на 1 а. е. для этого периода по содержанию ^{22}Na в хондрите Morávka (см. рис. 4).

Измерения, выполненные при полете КА Pioneer-10 и Pioneer-11 в пределах 5 а. е. от Солнца в 1972–1976 гг. (при минимуме солнечной активности в 1976 г.) зафиксировали для протонов с $E > 70$ МэВ градиенты потоков ГКЛ до $\sim 5\%$ на 1 а. е. (McKibben и др., 1977). Сравнимые градиенты G_r^H следуют из данных по радионуклидам в хондрите Innisfree (рис. 4). Данные по ^{22}Na (для 1973–1976 гг.) и ^{54}Mn (для 1976 г.) предсказывают градиенты G_r^H порядка $7 \pm 13\%$ на 1 а. е. (на 2.25 а. е.) и $23 \pm 16\%$ на 1 а. е. (на 2.13 а. е.), соответственно. Данные по ^{22}Na в хондрите Lost City предсказывают градиент G_r^H $22 \pm 22\%$ на 1 а. е. на 1.81 а. е. (для 1966–1969 гг.), однако данные по ^{54}Mn для максимума солнечной активности в 1969 г. предсказывают на 1.82 а. е. градиент G_r^H $90 \pm 30\%$ на 1 а. е. (Lavrukhina, Ustinova, 1981). Для периодов минимума солнечной активности зарегистрированы низкие градиенты ГКЛ в гелиосфере и во время полетов КА Mariner-4 и -5 в 1964–1965 гг., и Voyager-1 и -2 в 1984–1986 гг., что и должно быть *a priori*, ввиду очень высокой интенсивности ГКЛ вблизи Земли (Anderson, 1968; Venkatesan и др., 1987; Burlaga, Ness, 1998).

Однако совокупные неопределенности градиентов G_r^H по содержаниям радионуклидов в метеоритах значительно выше ошибок измерений градиентов потоков ГКЛ на КА. Следует учитывать, что ошибки измерения содержаний радионуклидов в метеоритах составляют около 10%, и неопределенности расчета скоростей образования радионуклидов не меньше 10%, тогда как точность измерения интенсивности ГКЛ в стратосфере примерно 2% (Bazilevskaya и др., 2014). Это приводит к сильному различию неопределенностей градиентов G_r^H ($\sim 20\%$) и градиентов потоков ГКЛ ($\sim 3\%$), измеренных на КА.

Несмотря на слишком высокие неопределенности градиентов G_r^H по данным отдельных хондритов (рис. 4), самым важным является выявленная тенденция низких градиентов (0–10% на 1 а. е.) для всех периодов минимума солнечной активности в 1957–2013 гг. (соответствующих максимуму интенсивности ГКЛ у Земли (нижняя

кривая на рис. 4)), что наблюдается и в прямых измерениях на КА. Большие градиенты G_F^H (50–100% на 1 а. е.) предсказаны лишь для периодов максимума солнечной активности (соответствующих минимуму интенсивности ГКЛ у Земли (нижняя кривая на рис. 4)), при исключительно высоких значениях G_F^H порядка ~200% на 1 а. е. в максимумах 1992 и 2012 гг.

Относительные вариации градиентов G_F^H в течение длительных периодов времени предоставляют ценную информацию о вариациях интенсивности ГКЛ во времени (по меньшей мере, в течение последнего ~1 млн лет) и пространстве (в пределах 2–4.5 а. е., т.е. для типичной протяженности метеоритных орбит), что не доступно прямым измерениям в межпланетном пространстве на КА. Метеориты же с учетом все более налаживаемой регистрацией метеоритных падений предоставляют эффективный метод извлечения уникальной информации по особенностям солнечной модуляции и других динамических процессов в гелиосфере, так же как и о структуре самой гелиосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космогенные радионуклиды в свежес выпавших хондритах являются естественными детекторами вариаций интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) как на временной шкале (от ~10 лет до ~1 млн лет), так и на пространственной шкале (≤ 4 а. е.).

1. Разработан метод извлечения информации по вариациям интенсивности и интегральным градиентам потоков ГКЛ в трехмерной гелиосфере путем исследования содержаний радионуклидов с разными периодами полураспада в хондритах с известной датой падения и орбитами разной протяженности и наклона. Измеренные содержания радионуклидов на момент падения хондритов с известными орбитами накапливаются на средних гелиоцентрических расстояниях их орбит. Скорости их образования в те же хондритах на 1 а. е. можно рассчитать при использовании стратосферных данных по интенсивности ГКЛ в соответствующие периоды времени (например, в течение последних 460 дней и ~4 лет накопления ^{54}Mn ($T_{1/2} = 312$ сут) и ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6$ лет), соответственно, перед падением хондрита). Сравнивая измеренные и рассчитанные скорости образования радионуклидов, можно оценить градиенты G_F^H их скоростей образования (прямо пропорциональные градиентам потоков ГКЛ ($E > 100$ МэВ)) для разных периодов времени в течение последних пяти солнечных циклов и для разных расстояний в гелиосфере.

2. Выявлена зависимость градиентов потоков ГКЛ от фазы солнечной активности во внутрен-

ней гелиосфере (т.е. в типичной области метеоритных орбит на 2–4.5 а. е. от Солнца). Непродолжительные максимумы градиентов потоков ГКЛ (согласно данным по ^{54}Mn и ^{22}Na), которые были особенно высокими в 1992 и в 2012 гг., антикоррелируют с обусловленными солнечной модуляцией глубокими минимумами интенсивности ГКЛ вблизи Земли, что зарегистрировано и нейтронными мониторами (<http://cosmicrays.oulu.fi>), и баллонными измерениями в стратосфере (Stozhkov и др., 2009; Bazilevskaya и др., 2014). Это свидетельствует о периодическом развитии в годы высокой солнечной активности на 2–4 а. е. гелиосферы эффективного модулирующего слоя магнитных неоднородностей солнечного ветра и его последующей диссипации в годы минимума, когда основная модуляция обусловлена в основном лишь солнечным ветром в объеме всей гелиосферы. Наблюдаемые вариации градиентов G_F^H скоростей образования радионуклидов указывают на их высокую чувствительность к малейшим изменениям магнитогидродинамических условий в трехмерной гелиосфере.

3. Впервые установлены вариации средних градиентов G_F^H на длительной временной шкале (по крайней мере, в течение последнего ~1 млн лет) и пространстве (по крайней мере на 2–4.5 а. е., т.е. в типичной области метеоритных орбит), что недоступно прямым измерениям на КА. Показано, что средние градиенты за современные солнечные циклы (согласно скорости образования ^{22}Na) сравнимы со средними градиентами за последний миллион лет (согласно скорости образования ^{26}Al), что свидетельствует о постоянстве механизма солнечной модуляции ГКЛ в течение по крайней мере ~1 млн лет.

Таким образом, метеориты, особенно с учетом все более налаживаемой сети фотографирования их падений, предоставляют эффективный метод извлечения уникальной информации как об особенностях солнечной модуляции и других динамических процессов в гелиосфере, так и о структуре самой гелиосферы. Возможность изучения вариаций градиентов потоков ГКЛ на длительной временной шкале и на разных гелиоцентрических расстояниях обеспечивает возможность прогнозирования радиационной обстановки в межпланетном пространстве, что особенно важно в перспективе пилотируемых космических полетов. Быстрая доставка свежес выпавших метеоритов в лаборатории для измерения и успешного изучения короткоживущих радионуклидов, хотя бы таких, как ^{54}Mn и ^{22}Na , является необходимым залогом дальнейших исследований, использующих метеориты в качестве зондов потоков ГКЛ.

Представленные результаты не были бы получены, если бы по инициативе С.Н. Вернова с 1957 г.

не была развита стратосферная сеть баллонных измерений интенсивности ГКЛ, которая функционирует до сих пор на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (Stozhkov и др., 2009). В.А. Алексеев и Г.К. Устинова благодарны за частичную поддержку этой работы Программой № 28 Фундаментальных исследований РАН. П.П. Повинец благодарен за поддержку грантами VEGA (1/0891/17) и APVV (15-0576) Министерства образования, науки, исследований и спорта Словацкой Республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Устинова Г.К. Солнечная модуляция галактических космических лучей в трехмерной гелиосфере по метеоритным данным // Геохимия. 2006. № 5. С. 467–482.
- Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // Геохимия. 2013. Т. 51. № 7. С. 580–598.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1988. С. 51–57.
- Лаврухина А.К., Устинова Г.К., Малышев В.В., Сатарова Л.М. Моделирование ядерных реакций в изотропно облучаемой толстой мишени // Атомная энергия. 1973. Т. 34. № 1. С. 23–28.
- Лаврухина А.К., Устинова Г.К. Метеориты – зонды вариаций космических лучей. М.: Наука, 1990. 262 с.
- Устинова Г.К. Закономерности скоростей образования космогенных радионуклидов в гелиосфере и проблемы солнечной модуляции на длительной временной шкале // Докл. РАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 289–293.
- Устинова Г.К., Алексеев В.А., Лаврухина А.К. Методы определения доатмосферных размеров метеоритов // Геохимия. 1989. № 10. С. 1379–1395.
- Alania M.V., Dorman L.I., Lavrukina A.K., Ustinova G.K. GCR variations in the heliosphere according to radioactivity of meteorites // Proc. 18th Inter. Cosmic-Ray Conf., Bangalore, 1983. V. 10. P. 42–45.
- Alexeev V.A., Kalinina G.V., Pavlova T.A. Investigations of tracks in Chelyabinsk LL5 and Košice H5 chondrites // Exp. Geochem. 2014. V. 2. P. 10–13.
- Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K. Variations of cosmogenic radionuclide production rates along the meteorite orbits // Adv. Space Res. 2015. V. 56. P. 766–771.
- Anderson H.R. The radial gradient of cosmic radiation measured by Mariner 2 and 4 // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 2897–2909.
- Armstrong T.W., Alsmiller R.G. Calculation of cosmogenic radionuclides in the Moon and comparison with Apollo measurements // Proc. 2nd Lunar Sci. Conf., Houston. 1970. P. 1729–1745.
- Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A.K., Svirzhevsky N.S. Temporal and energy behavior of cosmic ray fluxes in the periods of low solar activity // Proc. 33rd Inter. Cosm. Ray Conf., Rio de Janeiro. 2013. The Astroparticle Phys. Conf. arXiv: 1411.7534. 2014. V. 1.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Heber B., Yanke V.G., Raviart A., Mueller-Mellin R., Kunow H., Roehrs K., Wibberenz G., Paizis C. 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 Inter. Cosm. Ray Conf., Hamburg, 2001. V. 10. P. 3996–3999.
- Bhandari N., Lal D., Rajan R.S., Arnold J.R., Marti K., Moor C.B. Atmospheric ablation in meteorites: A study based on cosmic ray tracks and neon isotopes // Nucl. Tracks. 1980. V. 4. P. 213–262.
- Bhandari N., Bonino G., Cini Castagnoli G., Taricco C. The 11-year solar cycle variation of cosmogenic isotope production rates in chondrites // Meteoritics. 1994. V. 29. P. 443–444.
- Bhandari N., Murty S.V.S., Shukla P.N., Shukla A.D., Mahajan R.R., Sarin M.M., Srinivasan G., Suthar K.M., Sisodia M.S., Jha S., Bischoff A. Itawa Bhopji (L3–5) chondrite regolith breccia: Fall, classification and cosmogenic records // Meteoritics and Planet. Sci. 2002. V. 37. P. 549–563.
- Bhattacharya S.K., Goswami J.N., Lal D. Semi-empirical rates of formation of cosmic ray tracks in spherical objects exposed in space: Pre- and post-atmospheric depth profiles // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 8356–8363.
- Bogard D.D., Clark R.S., Keith J.E., Reynolds M.A. Noble gases and radionuclides in Lost City and other recently fallen meteorites // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 4076–4083.
- Borovička J., Spurný P., Kalenda P., Tagliaferri E. The Morávka meteorite fall. 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records // Meteoritics and Planet. Sci. 2003. V. 38. P. 975–987.
- Borovička J., Tóth J., Igaz A., Spurný P., Kalenda P., Haloda J., Svoreň J., Kornoš L., Silber E., Brown P., Husárik M. The Košice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit // Meteorit. and Planet. Sci. 2013a. V. 48. P. 1757–1779.
- Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalinda P., Clark D., Shrbený L. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk impactor // Nature. 2013b. V. 503. P. 235–237.
- Borovička J., Spurný P., Brown P. Small near-Earth asteroids as a source of meteorites // Arxiv.org/pdf/ 1502.03307. 2015.
- Brown P., Cheplecha Z., Hawkes R.L., Wetherill G., Beech M., Mossman K. The orbit and atmospheric trajectory of the Peekskill meteorite from video records // Nature. 1994. V. 367. P. 624–626.
- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M.B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., de Groot-Hedlin C., Drob D.P., Edwards W., Evers L.G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D.E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R.E., Spurný P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R. J., Whitaker R., Krzeminski Z. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. P. 238–241.
- Burlaga L.F. Understanding the heliosphere and its energetic particles // Proc. 18th Inter. Cosm. Ray Conf. Bangalore. 1983. V. 12. P. 21–60.

- Burlaga L.F., Ness N.F.* Magnetic field strength distributions and spectra in the heliosphere and their significance for cosmic ray modulation: Voyager-1, 1980–1994 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 29719–29732.
- Burr G.S., Jull A.J.T.* Accelerator mass spectrometry for radiocarbon research // *Encyclopedia of Mass Spectrometry* / Eds Gross M.L., Caprioli R. Amsterdam: Elsevier, 2009. V. 5. P. 656–669.
- Cepelcha Z.* Fireballs photographed in central Europe // *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.* 1977. V. 28. P. 328–340.
- Cressy P.J.* Cosmogenic radionuclides in the Lost City and Ucera meteorites // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 4072–4074.
- Eberhardt P., Geiss J., Lutz H.* Neutrons in meteorites // *Earth Science and Meteoritics.* Amsterdam: North-Holland, 1963. P. 143–168.
- Eugster O., Herzog G.F., Marti K., Caffee M.W.* Irradiation records, cosmic ray exposure ages, and transfer time of meteorites // *Meteorites and the Early Solar System II* / Eds Lauretta D., McSween H.Y. (Jr). Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 829–851.
- Evans I.C., Reeves I.H., Rancitelli L.A., Bogard D.D.* Cosmogenic nuclides in recently fallen meteorites: Evidence for Galactic cosmic ray variations during the period 1967–1978 // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 5577–5591.
- Fireman E.L.* Radioactivities in meteorites and cosmic-ray variations // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1967. V. 31. P. 1691–1700.
- Graf Th., Marti K., Xue S., Herzog G.F., Klein J., Middleton R., Metzler K., Herd R., Brown P., Wacker J.F., Jull A.J.T., Masarik J., Koslowsky V.T., Andrews H.R., Cornet R.J.J., Davies W.G., Greiner B.F., Imahori Y., McKay J.W., Milton G.M., Milton J.C.D.* Exposure history of the Peekskill (H6) meteorite // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1997. V. 32. P. 25–30.
- Haack H., Grau T., Bischoff A., Hortsmann M., Wasson J., Sørensen A., Laubenstein M., Ott U., Palme H., Gellissen M., Greenwood R.C., Pearson V.K., Franchi I.A., Gabelica Z., Schmitt-Kopplin Ph.* Maribo – a new CM fall from Denmark // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2012. V. 47. P. 30–50.
- Haba M.K., Sumino H., Nagao K., Micouchi T., Komatsu M., Zolensky M.E.* Noble gases in the Chelyabinsk chondrite // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston. 2014. #1732.
- Halliday I., Griffin A.A., Blackwell A.T.* The Innisfree meteorite and the Canadian camera network // *J. Roy. Astron. Soc. Canada.* 1978. V. 72. P. 15–39.
- Herzog G.F.* Cosmic-ray exposure ages of meteorites // *Meteorites, Planets, and Comets* / Ed Davis A.M. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 347–380.
- Honda M., Nishiizumi K., Imamura M., Takaoka N., Nishio O., Horie K., Komura K.* Cosmogenic nuclides in the Kirin chondrite // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1982. V. 57. P. 101–109.
- Jull A.J.T.* Terrestrial ages of meteorites // *Meteorites and the Early Solar System II* / Eds Lauretta D., McSween H.Y. (Jr). Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 889–905.
- Jull A.J.T., Burr G.S.* Mass Spectrometry Instruments VI: Accelerator Mass Spectrometry // *Treatise of Geochemistry* / Eds Turekian K.K., Holland H. Amsterdam: Elsevier, 2013. V. 15. P. 375–383.
- Kojima H., Antia H.M., Dugad S.R., Gupta S.K., Hayashi Y., Jagadeesan P., Jain A., Kawakami S., Mohanty P.K., Nonaka T., Oshima A., Rao B.S., Shibata S.* Measurement of the radial density gradient of cosmic ray in the heliosphere by the GRAPES-3 experiment // *Astropart. Phys.* 2015. V. 62. P. 21–29.
- Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C.* TALYS-1.0 // *Proc. Inter. Conf. Nucl. Data Sci. Technol.*, EDP Sciences. 2008. P. 211.
- Kováčik A., Sýkora I., Povinec P.P., Porubčan V.* Non-destructive gamma-spectrometry analysis of cosmogenic radionuclides in fragments of the Košice meteorite // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2012. V. 293. P. 339–345.
- Lal D.* Hard rock cosmic-ray archaeology // *Space Sci. Rev.* 1972. V. 14. P. 3–102.
- Laubenstein M., Hult M., Gasparro J., Arnold D., Neumaier S., Heusser G., Köhler M., Povinec P.P., Reyss J.-L., Schwaiger M., Theodorsson P.* Underground measurements of radioactivity // *Appl. Rad. Isotopes.* 2004. V. 61. P. 167–172.
- Lavrukhina A.K., Ustinova G.K., Ibraev T.A., Kuznetsova R.I.* Cosmic-radiation-induced radioactivity of the Moon and meteorites, and origin of meteorites // *Meteorite Research.* Dordrecht: D. Reidel, 1969. P. 227–245.
- Lavrukhina A.K., Ustinova G.K.* Solar proton medium flux constancy over a million years // *Nature.* 1971. V. 232. P. 462–463.
- Lavrukhina A.K., Ustinova G.K.* On the absence of effective modulation of Galactic cosmic rays in the Solar System during the ice age // *Proc. 9th Lunar and Planet. Sci. Conf.*, Houston, 1978. P. 2399–2414.
- Lavrukhina A.K., Ustinova G.K.* Heliolatitude variations of Galactic cosmic rays according to radioactivity of cosmogenic radionuclides in chondrites // *Proc. 16th Inter. Cosm. Ray Conf.*, Kyoto, 1979. V. 3. P. 206–211.
- Lavrukhina A.K., Ustinova G.K.* Galactic cosmic-ray gradients in the ecliptic plane and at high latitudes during two solar cycles (meteorite data) // *Adv. Space Res.* 1981. V. 1. P. 143–146.
- Leya I., Masarik J.* Cosmogenic nuclides in stony meteorites revisited // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2009. V. 44. P. 1061–1086.
- Leya I., Welten K.C., Nishiizumi K., Caffee M.W.* Cosmogenic nuclides in the solar gas-rich H3-6 chondrite breccia Frontier Mountain 90174 // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2009. V. 44. P. 77–85.
- Marti K., Graf T.* Cosmic-ray exposure history of ordinary chondrites // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1992. V. 20. P. 221–243.
- Masarik J., Reedy R.C.* Effects of bulk composition on nuclide production processes in meteorites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1994. V. 58. P. 5307–5317.
- Masarik J., Emrich P., Povinec P.P., Tokár S.* Monte Carlo simulation of cosmogenic nuclide production // *Nucl. Instrum. Meth.* 1986. V. B17. P. 483–489.
- McCrosky R.E., Posen A., Schwartz G., Shao C.Y.* Lost City meteorite – Its recovery and a comparison with other fireballs // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 4090–4108.
- McKibben R.B., O’Gallagher J.J., Pyle K.R., Simpson J.A.* Cosmic ray intensity gradients in the outer Solar System measured by Pioneer-10 and -11 // *Proc. 15th ICRC.* Plovdiv, 1977. V. 3. P. 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.* 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.* 2003. V. 21. P. 1217–1228.
- Meier M.M.M. Meteorites with photographic orbits (<http://www.meteoriteorbits.info>). 2016.
- Meier M.M.M., Welten K.C., Caffee M.W., Friedrich J.M., Jenniskens P., Nishiizumi K., Shaddad M.H., Wieler R. A noble gas and cosmogenic radionuclide analysis of two ordinary chondrites from Almahata Sitta // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2012. V. 47. P. 1075–1086.
- Melcher C.L. Thermoluminescence of meteorites and their orbits // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1981. V. 52. № 1. P. 39–54.
- Moraal H., Stoker P.H. Long-term neutron monitor observations and the 2009 cosmic ray maximum // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115: A12109. doi 10.1029/2010JA015413
- Neder H., Laubenstein M., Heusser G. Radionuclide concentrations in the freshly fallen meteorite Morávka // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2001. V. 36. P. A146–A147.
- Nishiizumi K., Imamura M., Honda M. Cosmic ray produced radionuclides in Antarctic meteorites // *Mem. Nat. Inst. Polar Res. Spec. Issue.* 1979. V. 12. P. 161–177.
- Nishiizumi K., Caffee M.W., Huber L., Welten K.C., Wieler R. Cosmogenic radionuclides and noble gases in Chelyabinsk meteorite // *Meteorit. and Planet. Sci.* 76th Meteoritical Soc. Meeting. Edmonton, Canada. 2013. V. 48. #5260.
- Ozdín D., Plavčan J., Horňáčková M., Uher P., Porubčan V., Veis P., Rakovský J., Tóth J., Konečný P., Svoreň J. Mineralogy, petrography, geochemistry and classification of the Košice meteorite // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2015. V. 50. P. 864–879.
- Parker E.N. Theoretical studies of the solar wind phenomenon // *Space Sci. Rev.* 1969. V. 9. P. 325–360.
- Parker E.N. Cosmic magnetic fields. Oxford: Clarendon press, 1979. 841 p.
- Popova O.P., Jenniskens P., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Y., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.W., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science.* 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Potgieter M.S. Solar modulation of cosmic rays // *Living Rev. Solar Phys.* 2013. V. 10. P. 3–66.
- Potgieter M.S., Le Roux J.A. On a possible modulation barrier in the outer heliosphere // *Proc. 20th Intern. Cosm. Ray Conf. Moscow, 1987.* V. 3. P. 291.
- Povinec P.P. History of cosmic rays by cosmogenic radionuclides // *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf. Moscow: IUPAP, 1987.* V. 7. P. 115–137.
- Povinec P.P., Comanducci J.F., Levy-Palomo I. IAEA-MEL's underground counting laboratory (CAVE) for the analysis of radionuclides at very low-levels // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2005. V. 263. P. 441–445.
- Povinec P.P., Masarik J., Sýkora I., Kováčik A., Beňo J., Meier M.M.M., Wieler R., Laubenstein M., Porubčan V. Cosmogenic nuclides in the Košice meteorite: Experimental investigations and Monte Carlo simulations // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2015a. V. 50. P. 880–892.
- Povinec P.P., Laubenstein M., Ferrière L., Brandstätter F., Sýkora I., Kováčik A., Jull A.J.T., Topa D., Koeberl C. The Chelyabinsk meteoroid – what we learned from the recovered meteorite fragments? // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2015b. V. 50. P. 273–286.
- Rancitelli L.A., Fruchter J.S., Felix W.D., Perkins R.W., Wogman N.A. Cosmogenic isotope production in Apollo deep-core samples // *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th.* 1975. V. 2. P. 1891–1899.
- Rancitelli L.A., Laul J.C. Cosmogenic radionuclide and trace element characterization of the Innisfree and Louisville meteorites // *Meteoritics.* 1977. V. 12. P. 346–347.
- Reedy R.C., Arnold J.R., Lal D. Cosmic-ray record in solar system matter // *Science.* 1983. V. 219. P. 127–135.
- Stozhkov Yu.I., Svirzhhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhhevskaya A.K. Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. P. 1124–1137.
- Tóth J., Svoreň J., Borovička J., Spurný P., Igaz A., Kornoš L., Veres P., Husárik M., Koza J., Kučera A., Zigo P., Gajdoš Š., Világi J., Čapek D., Křišandová Z., Tomko D., Šilha J., Schunová E., Bodnárová M., Bůžová D., Krejčová T. The Košice meteorite fall: Recovery and strewn field // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2015. V. 50. P. 853–863.
- Ustinova G.K. Cosmic rays in the heliosphere and cosmogenic nuclides // *Nucl. Geophys.* 1995. V. 9. P. 273–281.
- Ustinova G.K., Lavrukhina G.K. The features of modulation mechanism over a long time scale // *Proc. 20th Intern. Cosm. Ray Conf. Moscow, 1987.* V. 4. P. 307–310.
- Ustinova G.K., Lavrukhina A.K. Analytical expressions for distribution of cosmic radiation and radionuclides in meteorites // *Proc. 21st Intern. Cosmic Ray Conf. Adelaide, 1990.* V. 7. P. 141–144.
- Ustinova G.K., Lavrukhina A.K. On modeling nuclear reactions in meteorites // *24th Lunar and Planet. Sci. Conf. LPI, Houston, 1993.* V. 3. P. 1457–1458.
- Venkatesan D., Decker R.B., Krimigis S.M. Cosmic ray intensity gradients during 1984–1986 // *Proc. 20th Intern. Cosm. Ray Conf. Moscow, 1987.* V. 3. P. 385.
- Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Compositions of chondrites // *Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1988.* V. A 325. P. 535–544.
- Welten K.C., Caffee M.W., Hillegonds D.J., McCoy T.J., Masarik J., Nishiizumi K. Cosmogenic radionuclides in L5 and LL5 chondrites from Queen Alexandra Range, Antarctica: Identification of a large L/LL5 chondrite shower with a preatmospheric mass of approximately 50000 kg // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 177–196.
- Wrigley R.C. Some cosmogenic radionuclides in the Lost City meteorite // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 4124–4126.