

УДК 523.165

ВАРИАЦИИ СКОРОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ХОНДРИТАХ С ИЗВЕСТНЫМИ ОРБИТАМИ

Г. К. Устинова*, В. А. Алексеев

Представлено академиком РАН М.Я. Маровым 10.10.2018 г.

Поступило 24.10.2018 г.

Представлены результаты многолетних исследований скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль орбит 42 хондритов, последовательно выпадавших на землю в 1959–2016 гг. Анализ содержания ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами позволяет выстроить пространственный профиль средней за миллион лет интенсивности галактических космических лучей ($E > 100$ МэВ) на 2–4 а.е. от Солнца, свидетельствующий о постоянном возникновении и диссипации в этой области слоя магнитных неоднородностей солнечного ветра, эффективно модулирующего галактические космические лучи. Это говорит о постоянстве магнитогидродинамической обстановки в Солнечной системе, по крайней мере в течение последнего миллиона лет.

Ключевые слова: внутренняя гелиосфера, магнитогидродинамические процессы, солнечная модуляция, галактические космические лучи, космогенные радионуклиды, метеориты.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485133-37>

Исследование космогенных радионуклидов в постоянно выпадающих на Землю каменных метеоритах (хондритах) открывает новые уникальные возможности по изучению процессов в межпланетном пространстве и закономерностей пространственных и временных вариаций распределения космической радиации в трёхмерной гелиосфере, обусловленных солнечной активностью. Дело в том, что содержания космогенных радионуклидов прямо пропорциональны интенсивности космических лучей при полёте хондритов в межпланетном пространстве, и эти нуклиды являются, таким образом, естественными детекторами космических лучей на разных расстояниях от Солнца и в разные периоды времени в зависимости от времени падения хондрита и протяжённости его орбиты [1–3]. Уникальность исследований обусловлена тем, что измерению доступны содержания космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада $T_{1/2}$ от нескольких дней (или даже часов, в зависимости от быстроты доставки хондрита в лабораторию) до миллионов лет. Очевидно, что существенным фактором эффективности этих исследований является достаточно хорошо налаженная в последние годы сеть наблюдений и регистрации падающих болидов, что позволяет точно рассчитывать сфотографированные орбиты метеоритов. К настоящему времени насчитывается уже

26 хондритов с известными орбитами, начиная с Pribram (1959 г.) и Lost City (1970 г.) [4].

Движение метеоритов, как и других космических тел, подчиняется законам Кеплера, так что их орбиты в координатах $r(t)$ описываются уравнениями Кеплера (см., например, [5])

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

где a — большая полуось, e — эксцентриситет, E — эксцентрическая аномалия, T — орбитальный период. При $t = 0$ $r = q$, т.е. перигелию, а при $t = T/4$ $r = \tilde{r}_0$, т.е. среднему гелиоцентрическому расстоянию \tilde{r}_0 метеоритной орбиты, на котором накапливаются, например, долгоживущие космогенные радионуклиды с периодом полураспада $T_{1/2} \gg T$.

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. Наблюдаемые в лунных образцах эффекты СКЛ с энергией > 20 МэВ проявляются лишь в слоях < 2 см от поверхности, которые в метеоритах теряются при абляции [1, 15]. Согласно наблюдениям в земной атмосфере (т.е. на 1 а.е.) [6] пренебрежимо малый глобальный эффект дают и протоны с $E > 100$ МэВ, которые генерируются в самых мощных (но локальных по времени) сол-

*Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва
E-mail: ustinova@dubna.net.ru; AVAL37@mail.ru

нечных вспышках, что дополнительно уменьшается в метеоритах пропорционально $\sim \tilde{r}_0^2$.

В условиях изотропного облучения хондритов ГКЛ в межпланетном пространстве измеряемые на момент падения радионуклиды с $T_{1/2} \leq T$ накапливаются на последнем участке орбиты хондритов перед их падением на Землю в течение $\sim 1,5 T_{1/2}$ радионуклидов, что естественно сопоставлять со средним гелиоцентрическим расстоянием \tilde{r}_0 хондритов в эти промежутки времени. Сравнение измеренных содержаний $H_{\tilde{r}_0}$ радионуклидов с их рассчитанными содержаниями H_{\oplus} в идентичных хондритах при интенсивности ГКЛ на 1 а.е. (по имеющимся данным стратосферных измерений [7]) позволяет определить радиальный градиент скоростей образования космогенных радионуклидов $\left(G_{\tilde{r}_0} = \frac{H_{\tilde{r}_0}/H_{\oplus} - 1}{\tilde{r}_0 - 1} \cdot 100\% \right.$

на 1 а.е.) и, таким образом, оценить интенсивность ГКЛ на разных гелиоцентрических расстояниях в разные периоды времени, что пока недоступно прямым измерениям в межпланетном пространстве в тех объёмах, которые могут предоставить постоянно выпадающие хондриты.

Навстречу ГКЛ, изотропно поступающим в гелиосферу из космического пространства, Солнце излучает солнечный ветер (протоны и электроны с $E < 10$ эВ) и солнечные космические лучи (СКЛ), в основном солнечные протоны с $E > 10$ МэВ, которые, ослабляясь пропорционально квадрату расстояния, распространяются вплоть до динамической границы равновесия с межзвёздным газом на расстояниях ≥ 100 а.е. Это приводит к постепенному уменьшению интенсивности поступающих ГКЛ, их модуляции общим объёмом солнечного ветра, для которой характерны малые $\sim 2-4$ %/а.е. градиенты ГКЛ. Именно такие градиенты были измерены в полётах КК Маринер-4, -5 в 1964–1965 гг., Пионер-10, -11 в 1972–1976 гг. и Вояджер-1, -2 в 1984–1986 гг. [7–9], что свидетельствует о непрерывном, равномерном росте интенсивности ГКЛ с удалением от Земли вплоть до её выравнивания с интенсивностью ГКЛ в космическом пространстве на границе гелиосферы.

Однако такая постоянная равномерность не согласуется с динамическими процессами и конфигурациями магнитных полей в гелиосфере. 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 по-

степенно искривляются, закручиваясь по спирали Архимеда, и примерно на ~ 5 а.е. становятся практически азимутальными [10]. 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 объёмом солнечного ветра, в годы высокой солнечной активности ввиду худших условий диффузии ГКЛ в азимутальных полях, чем в радиальных, на 2–5 а.е. от Солнца периодически возникает более эффективная модуляция ГКЛ, в частности с более высокими градиентами ГКЛ в этой области, которая является, по-видимому, зоной взаимодействия прямых и обратных ударных волн, высокоскоростных потоков солнечного ветра и коротитирующих потоков низкоэнергичных частиц. Это характеризуется повышенной турбулентностью магнитных полей и повышенной плотностью магнитных неоднородностей, эффективно рассеивающих ГКЛ, создающих дополнительный градиент их интенсивности к малому градиенту при спокойном солнечном ветре. При спаде солнечной активности нестационарные процессы ослабевают, и такой эффективный модулирующий слой постепенно истончается и рассасывается, так что остаточная модуляция снова определяется лишь полным объёмом солнечного ветра. Следует обратить внимание, что указанные выше запуски КК Маринер, Пионер и Вояджер производились в периоды минимумов солнечной активности 19-, 20- и 21-го 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 области эффективной модуляции и снова регистрировали лишь малые градиенты ГКЛ, обусловленные лишь общим объёмом солнечного ветра.

Между тем в области до 4–5 а.е. внутренней гелиосферы лежат орбиты метеоритов, которые могут выпасть на Землю. Уже первые исследования радионуклидов в хондритах с известными орбитами Pribram и Lost City, выпавших в фазах максимума 19- и 20-го солнечных циклов, зарегистрировали существенный рост интегральных градиентов ГКЛ ($E > 100$ МэВ) вдоль их орбит (вплоть до ~ 4 а.е.), тогда как данные о хондрите Innisfree, выпавшем в минимуме 20-го цикла, зарегистрировали малые градиенты ГКЛ, соответствующие измерениям на КК Пионер-10, -11 [10, 11]. Эти закономерности подтвердились проводимым нами последовательным

изучением космогенных радионуклидов в 42 выпавших с 1959 г. хондритах, что привело к мониторингу пространственных и временных вариаций ГКЛ в гелиосфере в течение уже 5 солнечных циклов и впервые выявило динамический характер и особенности солнечной модуляции ГКЛ на 2–4 а.е. внутренней гелиосферы (т.е. в пределах метеоритных орбит; рис. 1). Для 10 из этих хондритов орбиты точно рассчитаны [4] (рис. 1а), и найденные для скоростей образования их радионуклидов закономерности полностью соответствуют общей картине мониторинга 11-летних вариаций ГКЛ за ~60 лет, сглажен-

ных полиномиальной кривой (рис. 1б). Оценка протяжённости орбит для других хондритов на рис. 1б выполнена феноменологическим методом, разработанным и подробно описанным в [1, 12]. На рис. 1в по стратосферным данным [7] показано, что интенсивность ГКЛ у Земли антикоррелирует с солнечной активностью и величиной градиентов скоростей образования радионуклидов в хондритах. Действительно, градиенты варьируются от 0 до ~100 %/а.е. пропорционально солнечной активности, составляя в среднем за солнечный цикл 20–30 %/а.е. [1–3, 13]. Непосредственными измерениями в пределах ~5 а.е. от Солнца вариации градиентов ГКЛ в зависимости от солнечной активности были зарегистрированы только после запуска КА Улисс в максимуме 1990 г. [14].

Как проявляются эти процессы на длительной временной шкале? Вторая особенность космогенных радионуклидов, а именно существование долгоживущих радионуклидов, в частности ^{26}Al с $T_{1/2} = 0,717$ млн лет, позволяет выявить такие фундаментальные закономерности. В табл. 1 представлены измеренные на момент падения 10 хондритов с известными орбитами содержания ^{26}Al , накопленные под действием средней интенсивности ГКЛ за миллион лет на средних гелиоцентрических расстояниях их орбит. Для оценки 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) [1, 15]. Показано, что они количественно воспроизводятся расчётом 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. Что происходит на других гелиоцентрических расстояниях? Расчёты скоростей образования ^{26}Al в идентичных хондритах на 1 а.е. с использованием средней интенсивности $I = 0,24 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ и сравнение с измеренными содержаниями ^{26}Al выявили градиенты скоростей образования этого изотопа $G_{\bar{r}}$ (%/а.е.) порядка 20–30 %/а.е. (на рис. 1а, б этот диапазон отмечен штриховыми горизонталями). Соответствующий этому градиенту рост с гелиоцентрическим расстоянием средней за миллион лет интенсивности ГКЛ представлен на рис. 2. Видно, что полиномиальная кривая через отдельные точки демонстрирует крутой рост интенсивности ГКЛ с пиком на 2–4 а.е. ввиду периодического накопления ГКЛ в этой области из-за худших условий дальнейшего проникновения

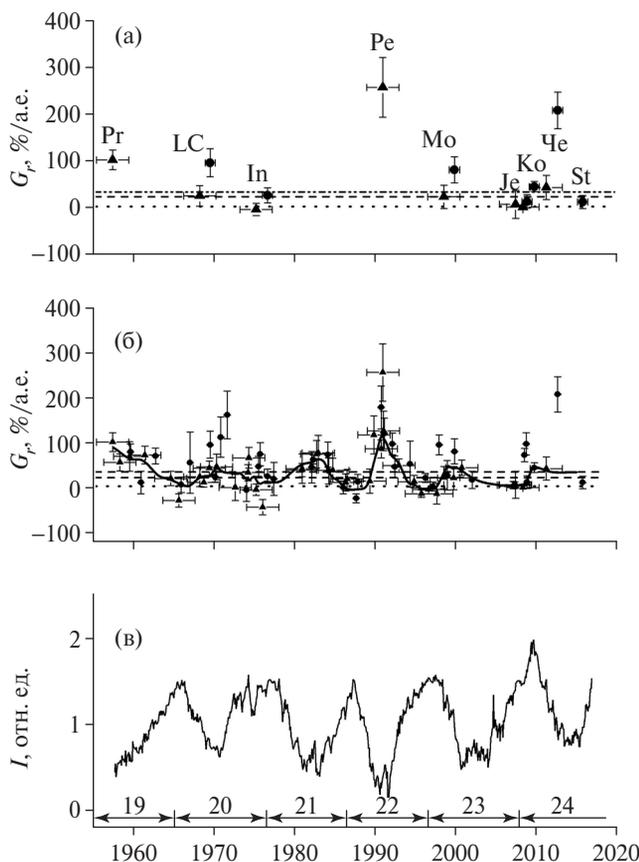


Рис. 1. а — вариации интегральных градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит (на 2–4 а.е. от Солнца) по данным о радиоактивности ^{54}Mn (кружки), ^{22}Na (треугольники) и ^{26}Al (штриховые горизонталы на 20–30 %/а.е.) в 10 хондритах с известными орбитами, выпавших в 1959–2016 гг. (см. табл. 1); б — вариации интегральных градиентов скоростей образования космогенных радионуклидов вдоль метеоритных орбит в 42 хондритах, выпавших в 1959–2016 гг. (кривая — полиномиальная кривая сглаживания экспериментальных данных по пяти точкам с учётом веса каждой точки; неизвестные орбиты хондритов рассчитаны феноменологическим методом [1, 12]; обозначения, как на рис. 1а); в — вариации интенсивности ГКЛ ($E > 100$ МэВ) у Земли по стратосферным данным [5].

Таблица 1. Средние за миллион лет интенсивность I (>100 МэВ) и градиенты G_r ГКЛ в гелиосфере по данным о радиоактивности ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами (см. ссылки в [1, 2, 13, 15])

№	Хондрит	a , а.е.	\tilde{r}_0^{**} , а.е.	^{26}Al , расп. · мин ⁻¹ · кг ⁻¹	G_r , %/а.е.	$I(>100 \text{ МэВ})$, см ⁻² с ⁻¹ ср ⁻¹
1	Příbram (Pr)	2,401±0,002	3,33±0,01	53±5	22±9	0,36±0,03
2	Lost City (LC)	1,66*	1,81	58±6	26±22	0,29±0,03
3	Innisfree (In)	1,87*	2,25	64±6	22±14	0,30±0,03
4	Peekskill (Pe)	1,49±0,03	1,72±0,03	71±6	36±24	0,30±0,03
5	Morávka (Mo)	1,85±0,07	1,60±0,06	57±6	31±21	0,28±0,03
6	Košice (Ko)	2,71±0,24	3,63±0,32	60±2	15±7	0,33±0,01
7	Челябинск(Че)	1,72±0,02	2,25±0,03	28±4	33±27	0,34±0,05
8	Stubenberg (St)	1,53±0,01	1,75±0,01	61±5	28±16	0,29±0,02
9	Jesenice (Je)	1,75±0,07	2,04±0,08	41±6	28±25	0,31±0,05
10	Park Forest (PF)	2,53±0,19	3,45±0,26	69±4	20±4	0,35±0,02
11	Ср. гипотетич. хондрит***	1,95±0,08	2,38±0,10	56±5	26±16	0,32±0,03
12	Луна (L-24; Ap-15)		1	Глубинный профиль		0,24±0,02

Примечание. * Ошибки не указаны. ** Средние гелиоцентрические расстояния орбит хондритов рассчитаны по уравнениям Кеплера (1) для моментов времени $t = T/4$, где $T = 365\sqrt{a^3}$ дней, если a в а.е. *** Гипотетический хондрит, орбита которого осциллирует в пределах вариаций: $a \sim 1,49-2,71$ а.е., $e \sim 0,395-0,680$ (ср. $0,517 \pm 0,013$) (афелий $Q \sim 2,10-4,50$ а.е., ср. $Q \sim 3,02$ а.е.), $\tilde{r}_0 \sim 1,60-3,63$ а.е.

к Земле. Тенденция к последующему выполаживанию интенсивности ГКЛ с удалением от Земли свидетельствует о локальности участка гелиосферы с динамическими процессами проявления солнечной модуляции, т.е. о перманентном возникновении эффективного модулирующего слоя магнитных неоднородностей на 2–4 а.е. внутренней гелиосферы в течение последнего ~1 млн лет. Это говорит о постоянстве магнитогидродинамической обстановки

в Солнечной системе, по крайней мере в течение последнего миллиона лет.

Данные табл. 1 определяют и пределы возможной неопределённости результатов по средней интенсивности ГКЛ в течение миллиона лет из-за возможной нестабильности метеоритных орбит на этой временной шкале. Действительно, представленные в табл. 1 значения средней интенсивности ГКЛ по данным 10 хондритов, большая ось которых меняется в пределах $a \sim 1,49-2,71$ а.е., а эксцентриситет $e \sim 0,395-0,680$ [4], можно рассматривать как вариации средней интенсивности ГКЛ за миллион лет при осцилляции в указанных пределах элементов орбиты гипотетического хондрита с соответствующими средними параметрами: $a = 1,95 \pm 0,08$ а.е.; $e = 0,517 \pm 0,013$; $\tilde{r}_0 = 2,38 \pm 0,10$ а.е. (и, соответственно, при осцилляции среднего значения афелия $Q \sim 3,02$ а.е. в пределах $Q \sim 2,10-4,50$ а.е.). Из табл. 1 следует, что на среднем гелиоцентрическом расстоянии такого хондрита $\tilde{r}_0 = 2,38 \pm 0,10$ а.е. (при осцилляции его афелия в широких пределах от 2,10 до 4,50 а.е.) среднее за миллион лет значение интенсивности ГКЛ составляет $I (> 100 \text{ МэВ}) = 0,32 \pm 0,03 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$, что в пределах указанных ошибок соответствует значениям по данным всех хондритов и обусловлено именно постоянством средней за миллион лет интенсивности ГКЛ в области метеоритных орбит. Из сравнения со значением $I (> 100 \text{ МэВ}) = 0,24 \pm 0,02 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ на 1 а.е. по лунным данным следует более высокий (на 20–30%) уровень интенсивности ГКЛ в области метеоритных орбит на 2–5 а.е., что позволяет рассматривать эту

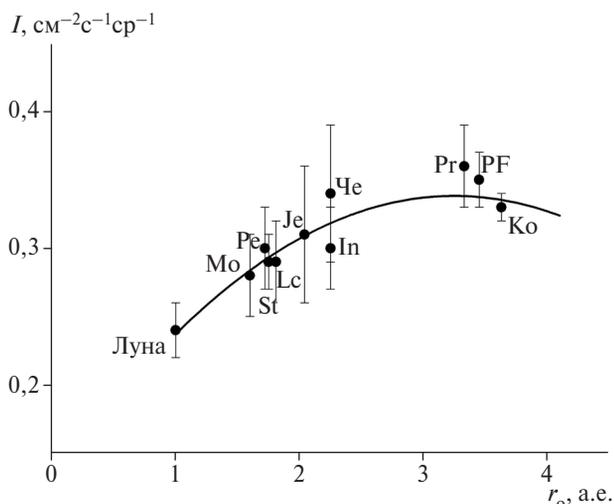


Рис. 2. Пространственное распределение средней за миллион лет интенсивности ГКЛ (> 100 МэВ) в гелиосфере по данным о содержании ^{26}Al в 10 хондритах с известными орбитами. Значение для Земли по глубинным профилям ^{26}Al в колонках лунного грунта Luna-24 и Apollo-15 [1, 15]. Данные аппроксимированы полиномом второй степени с учётом ошибок измерений.

область как область эффективной модуляции ГКЛ в дополнение к модуляции общим объёмом солнечного ветра.

Источник финансирования. Работа частично поддержана программой № 28 фундаментальных исследований Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврухина А.К., Устинова Г.К. Метеориты — зонды вариаций космических лучей. М.: Наука, 1990. 262 с.
2. Алексеев В.А., Устинова Г.К. // Геохимия. 2006. № 5. С. 467–482.
3. Устинова Г.К. // ДАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 289–293.
4. Meier M.M.M. Meteorites with Photographic Orbits // <http://www.meteoriteorbits.info>. 2016.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1988. С. 51–57.
6. Usoskin I.G., Desorgher L., Velinov P., et al. // Acta Geophys. 2009. V. 57. № 1. P. 88–101. DOI: 10.2478/s11600-008-0019-9.
7. Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B., et al. The Astroparticle Phys. Conf. arXiv: 1411.7534v.1 [astro-ph. SR] 27 Nov. 2014.
8. McKibben R.B., O'Gallagher J.J., Pyle K.R., Simpson J.A. Proc. 15th Intern. Cosm. Ray Conf. 1977. Plovdiv, V. 3. P. 240–245.
9. Venkatesan D., Decker R.B., Krimigis S.M. Proc. 20th Intern. Cosm. Ray Conf. Moscow, 1987. V. 3. P. 385–388.
10. Parker E.N. Cosmic Magnetic Fields. Oxford: Clarendon Press, 1979. 841 p.
11. Lavrukhina A.K., Ustinova G.K. // Adv. Space Res. 1981. V. 1. № 3. P. 143–146.
12. Lavrukhina A.K., Ustinova G.K. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1972. V. 15. № 4. P. 347–360.
13. Alexeev V.A., Laubenstein M., Povinec P.P., Ustinova G.K. // Adv. Space Res. 2015. V. 56. P. 766–771. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.004.
14. McKibben R.B., Connell J.J., Lopate C., et al. // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 1217–1228.
15. Lavrukhina A.K., Ustinova G.K. // Nature. 1971. V. 232. № 5311. P. 462–463.

VARIATIONS OF COSMOGENIC RADIONUCLIDE PRODUCTION RATES IN CHONDRITES OF KNOWN ORBITS

G. K. Ustinova, V. A. Alexeev

Presented by Academician of the RAS M.Ya. Marov October 10, 2018

Received October 24, 2018

The results of multiyear investigations of cosmogenic radionuclide production rates along the orbits of 42 chondrites, fallen successively to the Earth in 1959–2016 are presented. They constitute a long set of homogeneous data, statistical smoothing of which demonstrates some main regularities of distribution and variation of the galactic cosmic rays (GCR) with energy > 100 MeV in the internal (< 5 AU) heliosphere. This set is exclusive, and it has timeless importance for all the future investigations of magneto-hydrodynamic peculiarities of the GCR solar modulation mechanism. Analysis of ^{26}Al contents in 10 chondrites of known orbits allowed us to deduce a spatial profile of the GCR intensity ($E > 100$ MeV), averaged over a 1 My in the internal heliosphere, testifying to permanent development and dissipation of a layer of the solar wind magnetic irregularities, which efficiently modulates cosmic radiation. It suggests a constancy of magneto-hydrodynamic environment in the Solar system at least for the last million years.

Keywords: internal heliosphere, magneto hydrodynamic processes, solar modulation, galactic cosmic rays, cosmogenic radionuclides, meteorites.