

ЭВОЛЮЦИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ
В РАННЕЙ ГЕЛИОСФЕРЕ

А.ЕГИКЯН

Поступила 15 февраля 2017

Принята к печати 7 июня 2017

Рассчитаны изменения потоков протонов в гелиосфере за все время ее существования, обусловленные уменьшением со временем темпа потери массы Солнцем и ее скорости. Рассмотрены два сорта протонов, как принадлежащих солнечному ветру с энергиями около 1 кэВ, соответствующих скорости направленного течения порядка 400 км/с, так и относящихся к аномальной компоненте, ускоренных на границе гелиосферы до энергий порядка 1-100 МэВ. Для каждого вида протонов приводятся аппроксимационные формулы изменения дифференциальных интенсивностей со временем, согласующиеся с имеющимися наблюдательными и теоретическими данными. С их помощью получены аналитические зависимости скоростей облучения водяного льда на разных этапах эволюции гелиосферы, важных для анализа радиационно-химических трансформаций льдов солнечной системы.

Ключевые слова: *эволюция ранней гелиосферы; энергетические частицы; ускорение протонов; льды; дозы облучения*

1. *Введение.* Гелиосфера современного Солнца определяется равенством динамических давлений солнечного ветра и встречного течения межзвездного газа, уравнивающих друг друга на расстоянии примерно 100 а.е. от Солнца (по ходу движения Солнца относительно межзвездной среды со скоростью 26 км/с), причем темп потери массы равен примерно $M = 2 \cdot 10^{-14} M_{\odot} / \text{год}$, а скорость солнечного ветра порядка 400 км/с [1]. Как известно, интенсивность ветра молодого Солнца была намного, на 1-2 порядка больше, а скорость в 2-3 раза быстрее [2-4].

Очевидно, что изменения структуры гелиосферы должны приводить к изменениям потоков заряженных частиц в ее объеме, включая галактические космические лучи (ГКЛ), солнечных космических лучей (СКЛ), аномальной компоненты космических лучей (АКЛ) и протонов солнечного ветра [5,6], обуславливающих важные радиационно-химические трансформации облучаемых веществ. Ниже будут рассматриваться протоны с энергиями около 1 кэВ, принадлежавшие ветру, и протоны АКЛ в диапазоне 1-100 МэВ. Задача облучения льдов солнечной системы космическими лучами (КЛ) в современную эпоху рассматривалась в [7]. Подробные наблюдательные и модельные данные о протонах внутри гелиосферы (на 40 и 85 а.е.) и вне ее представлены

в [8] (рис.4). Суммарные энергетические потоки протонов во всем диапазоне энергий - от 1 эВ до десятков ГэВ, были получены с использованием наблюдательных данных от межпланетных зондов. Депрессия потока СКЛ между кэВ и 100 МэВ энергиями вызвана модуляцией солнечным ветром, препятствующим проникновению частиц относительно низких энергий в гелиосферу. Локальный максимум при энергиях порядка нескольких кэВ обусловлен протонами ветра, распространяющимся со средней скоростью ~400 км/с (подтвержденное спутниковыми измерениями в плоскости эклиптики). Более высокоскоростные (вплоть до 800 км/с), но и менее интенсивные потоки, наблюдаемые вне эклиптики, в данной работе не рассматриваются. Химический состав ГКЛ при их распространении от очагов типа сверхновых и их остатков, меняется как из-за локальных неоднородностей источников, так и из-за взаимодействия с межзвездным газом и пылью [9].

Итак, солнечный ветер распространяется от Солнца, создавая в около-солнечной межзвездной среде замагниченную полость горячей плазмы [1]. Эта полость, гелиосфера, отделяется от окружающего межзвездного газа границей, называемой гелиопаузой. При взаимодействии солнечного ветра с межзвездным (частично ионизованным) газом, образуется структура с двумя, отстоящими друг от друга ударными волнами, внутри которых и замедляется скорость ветра от сверхзвуковой (~400 км/с), до субзвуковой (~100 км/с). Согласно теории взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой [5,10], внутренний ударный фронт и гелиопауза располагаются на расстояниях 100 а.е. и 120 а.е. от Солнца, соответственно. Таким образом, все планеты, и значительная часть объектов пояса Койпера находятся в пределах современной гелиосферы. Область между внешним ударным фронтом, где солнечный ветер замедляется до значения скорости, с которой межзвездный газ обтекает гелиосферу (~20 км/с), и гелиопаузой, называется гелиослоем. Вследствие динамического давления потока межзвездного газа, гелиослой деформирован и образует характерную кометообразную форму, хвост которой направлен в противоположную от направления движения Солнца, сторону. Гелиосфера заполнена заряженными частицами, обусловленными различными источниками, причем важность каждого сорта частиц зависит от большого числа факторов, например, гелиоцентрического расстояния, широты, уровня солнечной активности, физических условий области Галактики, где находится Солнце, и т.д. Однако основное различие между ними заключается в их принадлежности к солнечному ветру, со всеми разновидностями, или же к КЛ галактического происхождения. Напомним, что, примерно 85% КЛ состоит из протонов, 12 % α -частицы, а остальное - электроны и ядра тяжелых элементов [9]. Итак, далее термин ГКЛ будет использоваться для галактических космических лучей, изотропно проникающих в область гелиосферы из

межзвездного пространства. В том же смысле будут пониматься СКЛ - для частиц солнечного ветра и солнечных вспышек, и АКЛ, возникающих в гелиосферных процессах.

Структура меняющейся из-за солнечной активности гелиосферы и ее магнитных полей регулирует процесс проникновения ГКЛ во внутренние области солнечной системы, называемый также модуляцией. Эффективность модуляции зависит от энергии частиц КЛ. Например, в диапазоне энергий порядка МэВ, поток ГКЛ в течение 11-летнего цикла солнечной активности может меняться до 5 раз, антикоррелируя с уровнем активности [5]. Отметим также, что "молодое" Солнце вероятно было более активным [11]. Точнее, сразу после образования примерно 4.6 млрд лет назад светимость Солнца составляла ~70% от современного значения, поверхность была примерно на 200 К холоднее, в то же время в диапазоне 150-250 нм УФ излучение в 2 раза было больше в течение первых 100 млн лет [12]. Данные по раннему солнечному ветру более неопределенные. Наблюдения звездных ветров молодых звезд солнечного типа показывают в 100 и более раз большие интенсивности [2,3]. Теоретические модели Солнца, согласующиеся с недавними астросейсмологическими данными, также указывают на сравнительно более мощные ветры в течение 1 млрд лет после образования [13]. Газ и пыль протосолнечного диска также были выметены на периферию в течение этого периода. Более частые столкновения протопланет и малых тел изменяли состояние поверхности, которое также следует учитывать при интерпретации упомянутых радиационно-химических трансформаций, обусловленных КЛ. Настоящая работа посвящена расчетам изменения потоков протонов солнечного ветра и АКЛ, и доз облучения доминирующего водяного льда с момента образования Солнца.

2. *Об изменении гелиосферы в раннем периоде жизни Солнца.* Уже отмечалось, что в ранний период истории Солнца солнечный ветер был интенсивнее, что подтверждается также современными эволюционными моделями. Известны наблюдательные данные об изменениях звездных ветров молодых звезд, подобных Солнцу [2,3,14], которые позволяют записать следующие аппроксимационные соотношения о концентрации, n_w , и скорости, V_w , сферически-симметричных ветров, в зависимости от времени, подобные приведенным в [14], только с другими подгоночными параметрами, использованными в данной работе для лучшего согласования с современными данными. Эти формулы имеют вид:

$$n_w = n_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_w}, \quad (1)$$

$$V_w = V_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_V}, \quad (2)$$

где $\alpha_n = -2$, $\alpha_V = -0.5$, $\tau = 0.7$ Гут, и коэффициенты n_0 и V_0 выбираются с привязкой к некоторому моменту времени (для данной области пространства). Например, для Солнца, можно определить $n_0 = 600 \text{ см}^{-3}$ и $V_0 = 1100 \text{ км/с}$ при $t=0$, чтобы получить $n_w = n_E = 7 \text{ см}^{-3}$, и $V_w = V_E = 400 \text{ км/с}$, при $t = 4.6$ Гут, где n_E и V_E - современные значения параметров солнечного ветра у орбиты Земли r_E , причем считается, что V_E постоянно вплоть до границ гелиосферы, а n_E меняется обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Следует отметить, что по наблюдениям [2,3,14], темп потери массы подобных Солнцу звезд со временем убывает согласно простым степенным зависимостям (1,2), полученным в [14] на основе интерпретации изотопных данных лунных и метеоритных пород и моделей потери углового момента ранним Солнцем (и подобных звезд) [14 и ссылки там]. И использованные в данной работе подгоночные параметры необходимы для согласования с современными результатами наблюдений подобных Солнцу, но более молодых звезд [2,3], а также с данными расчетов трехмерных МГД моделей для моментов времени $t = 0.7, 2$ и 4.6 Гут [4] (см. ниже, рис.1, внизу слева). Отметим также, что

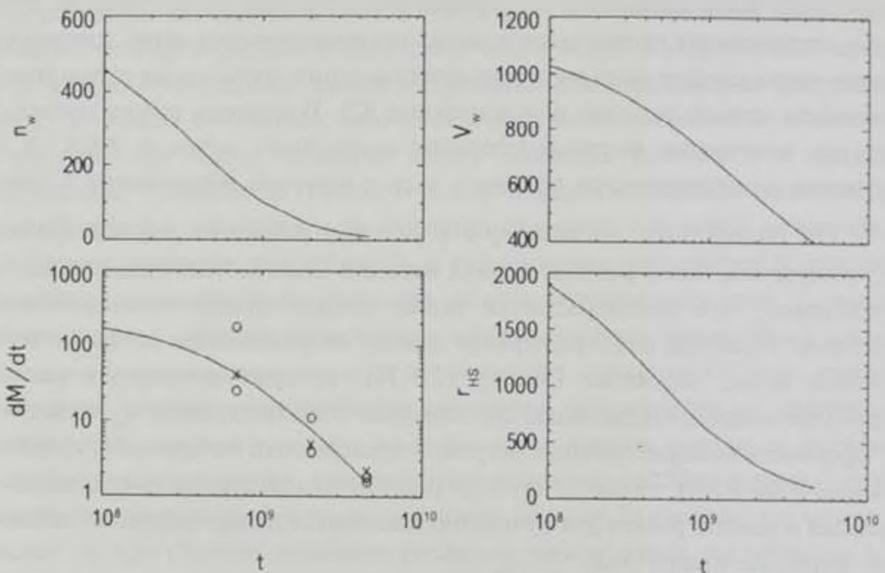


Рис.1. Зависимости концентрации n_w (протон/см³), скорости V_w (км/с), темпа потери массы Солнцем dM/dt (в единицах $M = 2.0 \cdot 10^{-8} M_{\odot}$ год) и радиуса гелиосферы r_{HS} (А.Е.) от времени t (лет) в истории Солнца. Внизу слева показаны верхние и нижние границы ("o") в эпохи 0.7, 2 и 4.6 Гут, определенные по наблюдениям выборки подобных Солнцу звезд разных возрастов [2,3]. Теоретические значения [4] для тех же эпох отмечены "x".

параметры аппроксимаций (1, 2) $\alpha_n = -2$, $\alpha_v = -0.5$, $\tau = 0.7$ Гут в данной работе определялись согласно стандартной процедуре подгонки, с минимальными и максимальными значениями наблюдаемых темпов потери массы подобных Солнцу звезд [2,3], но без учета теоретических значений [4]. Интересно, что полученная аппроксимационная кривая близка к имеющимся теоретическим значениям в 3-х временных точках с точностью до коэффициента меньше 2-х, поэтому с такой же точностью можно записать аппроксимационную кривую для эволюции солнечного ветра. Тогда для меняющейся со временем скорости потери массы Солнцем можно записать $\dot{M}_w = 4\pi r^2 n_w m_p V_w$ (в единицах современного значения $\dot{M} = 1.3 \cdot 10^{12}$ г/с = $2.0 \cdot 10^{-14} M_\odot$ /год, где n_w и V_w относятся к области с радиусом r , и $m_p = 1.67 \cdot 10^{-24}$ г - масса протона:

$$\dot{M}_w = 236 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_n - \alpha_v} \quad (3)$$

Нетрудно оценить по этим формулам, что оба параметра, n_w и V_w , в ранний период истории гелиосферы были намного больше, причем для радиуса гелиосферы r_{HS} можно записать простое соотношение, вытекающее из равенства динамических давлений солнечного ветра, и набегающего со скоростью $V_c = 26$ км/с потока межзвездного газа, с концентрацией нейтральных атомов $n_{ISM} = 0.2$ см⁻³ [15,16]:

$$r_{HS} = r_E \sqrt{\frac{n_E}{n_{ISM}} \cdot \frac{V_w}{V_c}} \quad (4)$$

Отсюда, с учетом (1-3) получаем зависимость $r_{HS}(t)$ от времени (рис.1).

Интенсивный солнечный ветер, будучи потоком заряженных частиц, должен был облучать имеющиеся льды системы, обуславливая их радиационно-химическую трансформацию, от которой, в частности, также зависят фотометрические показатели ледяных покрытий тел системы. Разумеется, в ранний период своей истории, состояние упомянутых поверхностей определялось также взаимными столкновениями планетных тел, и строгий количественный анализ должен учитывать оба процесса, что выходит за рамки данной работы. Здесь же мы ограничимся более скромной задачей, а именно, выяснением изменения возможностей облучения льдов протонами солнечного ветра с убывающей интенсивностью. Даже при скоростях ветра порядка 1000 км/с, частицы ветра остаются нерелятивистскими, поэтому из определения интенсивности J_E и потока энергии частиц $F_E = 4\pi J_E$ в диапазоне энергий ΔE (с размерностью интенсивности эрг/(см² · с · ср · ΔE)) и на расстоянии r от Солнца имеем простое соотношение:

$$(1/4\pi)n_w V_w E_p = \frac{(1/4\pi)\dot{M}_w V_w^2}{8\pi r^2} = \int_{J_E}^{E_2} J_E(E) dE \quad (5)$$

При постоянной скорости ветра практически во всей гелиосфере облучение будет осуществляться практически моноэнергетическими протонами с энергией порядка

$$E_p = m_p \frac{V^2}{2} = 6310 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{2\alpha_p} \text{ эВ.} \quad (6)$$

Согласно наблюдательным данным ([8] рис.4), в современном солнечном ветре имеется небольшой разброс относительно среднего значения E_p ($t = 4.6$ Гуг) = = 0.83 кэВ, порядка $\Delta E = E_2 - E_1 = 0.1$ кэВ. Приняв $\Delta E = k \cdot E = 0.12 E$ за все время от начала истечения, в результате получим эволюционную зависимость дифференциальной интенсивности частиц ветра от времени $J_p = J_E(E)/E$ (с размерностью частиц/(см²·с·ср·ΔE), причем $E = E_p$:

$$J_p(E) = \frac{J_E(E)}{E} = \frac{(1/4\pi) M_w V_w^2}{4\pi r^2 E \Delta E} \quad (7)$$

Видно, что у орбиты Земли

$$J_p(E) = 1.39 \cdot 10^{13} \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_p - 2\alpha_p} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ}} \quad (8)$$

При $t = 4.6$ Гуг, согласно (6) $E = 0.83$ кэВ, а из (8) получаем $J_p(E) = 6.7 \cdot 10^{11}$, что совпадает с известным средним значением [8]. Теперь, зная, как меняется поток частиц ветра во времени (8) и в пространстве (скорость постоянна, концентрация обратно пропорциональна квадрату расстояния от Солнца), легко рассчитать изменения скоростей облучения льдов со временем, в заданной области гелиосферы. При направленном потоке частиц, $F_p(E) = \pi J_p(E)$ [8], скорость облучения $D_r = dD/dt$ определяется формулой [17, и ссылки там]:

$$nM(n)D_r = \int_{E_1}^{E_2} F_p(E) S(E) dE, \quad (9)$$

где, например, для водяного льда, $\rho = 1 \text{ г/см}^3 = nM(n) \cdot 1 \text{ а.е.м.}$, $n = 3.3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $M(n) = 18$ и $1 \text{ а.е.м.} = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$. Функция суммарных энергетических потерь многих льдов и их смесей, $S(E)$, известна, например, $S(E = 0.8 \text{ кэВ}) = 19 \text{ кэВ/ц}$ для водяного льда [18,19] (см. рис.3, ниже). Поскольку, энергетический профиль протонов ветра примерно треугольный, с шириной основания ~ 0.1 кэВ ([8], рис.4), получаем изменение скорости облучения водяного льда со временем (в единицах $\text{эВ} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{а.е.м}^{-1}$), например, у орбиты Земли, согласно формуле:

$$D_r = \frac{0.12\pi J_p(E) S(E) E}{nM(n)} = 5.6 \cdot 10^{-7} \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_p - 2\alpha_p} S(E), \quad (10)$$

где $E = E_p$ и определяется согласно (6).

На рис.2 показаны зависимости (8), (10) у орбиты Земли, а также величины доз облучения, $D = D, \Delta t$ за 1, 10^3 и 10^6 лет. Звездочками отмечены пороговые уровни инициации возможных радиационно-химических трансформаций [7,17] и графитизации (верхний) [20]. Пороговый уровень графитизации (разрушения фуллерено-подобных систем) приводится в качестве верхнего уровня дозы облучения, вызывающей разрушение сложных систем. Приведем также для сравнения распределение скорости облучения в современной гелиосфере в функции от расстояния от Солнца (рис.3). Интересно отметить, что в обоих случаях, и у Юпитера, за все время жизни, и во всей системе, включая объекты пояса Койпера ($r = 200 - 300$ а.е.), минимальное количество поглощенной за 1 млн лет энергии, превышает 1 кэВ (рис.3), что достаточно для инициации сложных радиационно-химических изменений в ледяных смесях [7,17]. При наличии в смеси углеродсодержащих соединений, возможно также соответствующее изменение фотометрических характеристик ледяных покрытий тел системы ([7], и ссылки там).

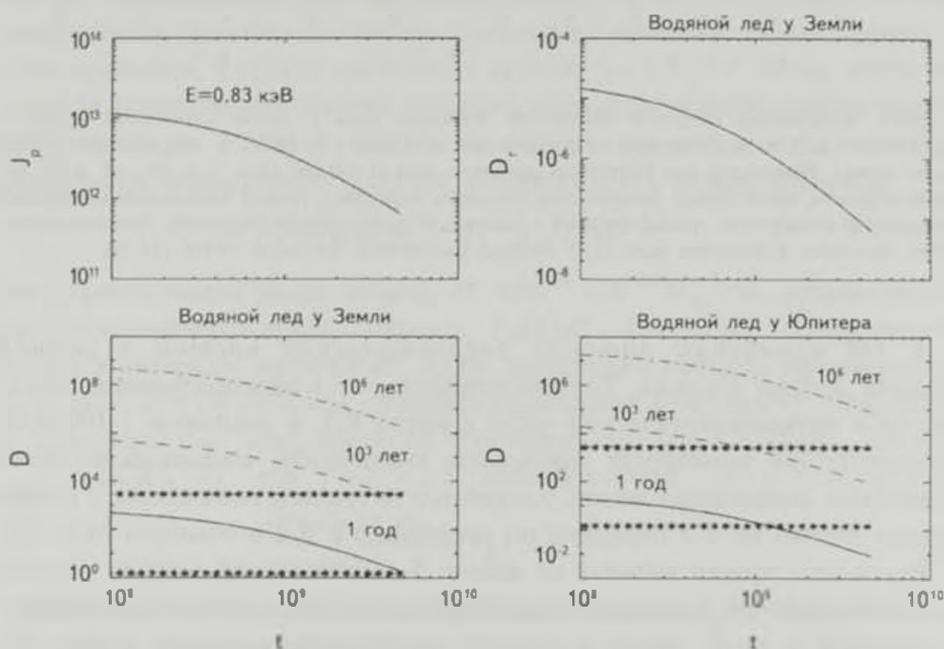


Рис 2 Изменения дифференциальной интенсивности J_p (частиц $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$ и скорости облучения водяного льда D , ($\text{эВ} \text{с}^{-1} \text{см}^{-1} \text{а.е.м.}^{-1}$) со временем t (лет) у Земли протонами встра (сверху). Изменения доз облучения водяного льда D ($\text{эВ} \text{см}^{-1} \text{а.е.м.}^{-1}$) со временем t (лет), у Земли и Юпитера ($r = 5.2$ а.е.) показаны внизу. Звездочками отмечены пороговые уровни инициации возможных радиационно-химических трансформаций (нижний) и графитизации (верхний).

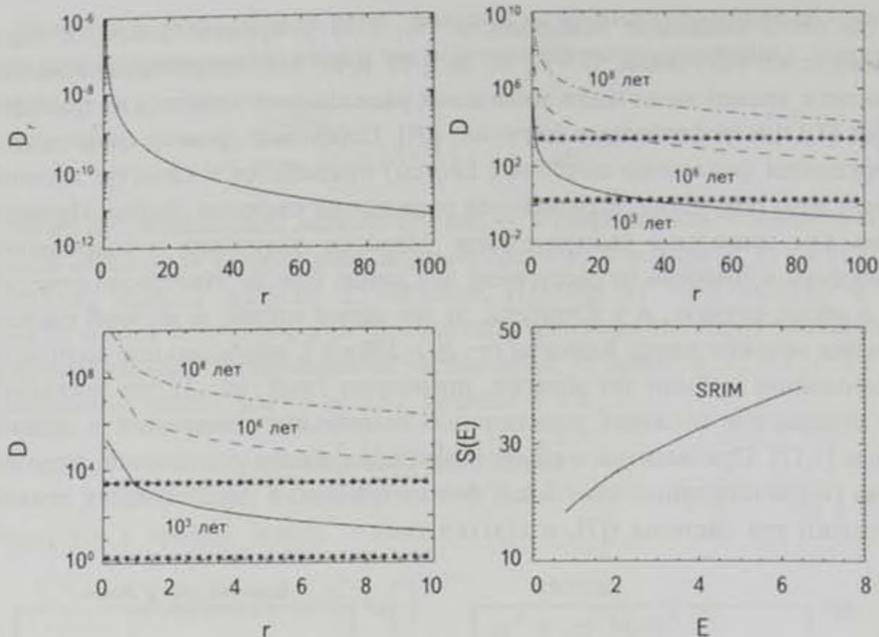


Рис.3. Изменения скорости облучения водяного льда у Земли протонами ветра \dot{D} , ($\text{эВ см}^{-1} \text{ а.е. м.}^{-1}$) в зависимости от расстояния от Солнца r (А.Е.) в современную эпоху (сверху слева). Изменения доз облучения водяного льда D ($\text{эВ см}^{-1} \text{ а.е. м.}^{-1}$) за 10^1 , 10^3 и 10^4 лет (вверху справа и внизу слева). Звездочками отмечены пороговые уровни инициации возможных радиационно-химических трансформаций (нижний) и графитизации (верхний). Энергетические потери протонов в водяном льду $S(E)$ (кэВ/м) рассчитаны согласно SRIM [18,19].

3. *Об изменении потоков энергетических частиц в раннем периоде жизни Солнца.* Хорошо известно, что в околосолнечном пространстве в низкоэнергетической части спектра КЛ, в диапазоне 1-100 МэВ, доминирует так называемая аномальная компонента, состоящая из части захваченных межзвездных ионов, ускоренных на границе гелиосферы, с превышением потока на 4-5 порядков по сравнению с КЛ в обычной МЗС [6].

Результаты теории явления на основе 5-компонентной модели частиц с хорошей точностью совпадают с наблюдениями посредством зонда "Вояджер-1", который в 2004г. вошел в область гелиосферной ударной волны [21]. Параметры эволюционного изменения потока АКЛ можно получить с помощью простых количественных оценок [22]. Действительно, общеизвестная модель образования ГКЛ в оболочках сверхновых предполагает преобразование доли ε (10-30%) кинетической энергии оболочки в энергию частиц E в диапазоне МэВ-ГэВ и выше, со степенным распределением $-E^{-\gamma}$, где $\gamma = 2.5-2.7$ для ГКЛ [9]. На фронте ударной волны статистические механизмы Ферми должны

привести к ускорению протонов от энергий в несколько кэВ до энергий порядка МэВ-ГэВ-ов, за время не более 30000 лет. Дело в том, что в модели диффузного ускорения на фронте сильной ударной волны [9] прирост энергии частицы при каждом пересечении фронта порядка 1/100, поэтому для роста, например, от 1-5 кэВ (400-1000 км/с) до 1-100 МэВ необходимо до 10^4 пересечений фронта, толщина которого, будучи порядка длины свободного пробега, известна, в основном определяется реакцией перезарядки протонов ветра с набегающими нейтральными атомами МЗС и составляет величину порядка 100 а.е. [10]. Тогда максимальное время ускорения оценивается как $t_{acc} = 10^{15} \cdot 10^5 / 10^8 / 3 \cdot 10^7 = 30000$ лет. Такое время ускорения соответствует максимальному значению коэффициента диффузии энергетических частиц в области ускорения, $Q = t_{acc} V_*^2 = 10^{12} \cdot 10^{16} = 10^{28}$ см²/с, что по порядку величины совпадает с оценкой для МЗС [9]. В данной работе ограничимся простой оценкой потока $F(E)$ ускоренных частиц в диапазоне 1-100 МэВ, играющих важную роль в радиационно-химических трансформациях. Вклад от более энергичных частиц пренебрежимо мал, так как ионизационные потери выше 100 МэВ фиксированы (преобладают потери, связанные с релятивистскими эффектами) и не меняются, а спектр достаточно крутой, $\gamma = 2.5 - 2.7$. Итак, пусть 10% ($\varepsilon = 0.1$) кинетической энергии быстрого ветра ядра преобразуется в энергию ускоренных до 100 МэВ частиц на фронте ударной волны, тогда для сферически-симметричного случая, аналогично (5), можно написать:

$$(1/4\pi)\varepsilon \dot{M}_* V_*^2 = A \int_{E_1}^{E_2} J_E(E) dE, \tag{11}$$

где скорость потери массы звездой, $\dot{M}_* = 10^{-14} - 10^{-12} M_\odot / \text{год}$, установившаяся скорость течения, $V_* = 400 - 1100$ км/с, $F_E(E) dE = 4\pi J_E(E) dE$ - поток энергии частиц в интервале энергий dE , $J_E(E)$ - связанная с потоком интенсивность, $E_1 = 1$ MeV, $E_2 = 100$ MeV, и A - площадь характерной поверхности, совпадающая с поверхностью сферического ударного фронта, $A = 5\pi r_1^2$. Полагая $J_E = J_E(E_1)(E_1/E)^\gamma$, где $\gamma = 2.5 - 2.7$, возможно даже $\gamma = 4.0$ [23], получим

$$\frac{(1/4\pi)\varepsilon \dot{M}_* V_*^2}{4\pi r_1^2} = J_E(E_1) \cdot \frac{E_1}{\gamma - 1}. \tag{12}$$

Таким образом, для интенсивности числа частиц $J_p(E)$, например, при $E_1 = 1$ MeV, можно записать

$$J_p(E_1) = \frac{J_E(E_1)}{E_1} = \frac{\gamma - 1}{E_1^2} \frac{(1/4\pi)\varepsilon \dot{M}_* V_*^2}{8\pi r_1^2}, \tag{13}$$

где размерность $[J_p(E_1)] = (\text{частиц} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1})$. При $r_1 = 10^{15}$ см, $\dot{M}_* = 2 \cdot 10^{-14} M_\odot / \text{год}$, $V_* = 400$ км/с, $J_p(E_1) = (\gamma - 1) \cdot 0.084 = 0.13 - 0.25$ частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$. Таким образом, при выборе параметров современного

солнечного ветра M , и V , полученная оценка интенсивности у границы гелиосферы, по порядку величины совпадает с данными наблюдений (~ 1 частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$), и примерно на 4 порядка превышает среднегалактическое значение для МЗС, $J_p(E_1) = 2.0 \cdot 10^{-4}$ частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$ ([6] рис.2). Более точную оценку можно получить, исключив радиус гелиосферы из (13) посредством (4):

$$J_p(E_1) = \frac{\gamma-1}{E_1^2} \frac{\kappa}{4\pi} m_p n_{ISM} V_c^2 V_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-\alpha\gamma} = 12.4(\gamma-1) \cdot \kappa \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-\alpha\gamma}, \quad (14)$$

или

$$J_p(E_1) = (1.9 - 3.7) \cdot \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-0.5} \frac{\text{частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ}}. \quad (15)$$

При вышеприведенных значениях параметров, получим при $t = 4.6$ Сут, $J_p(E_1) = (0.69 - 1.3)$ частиц/см² \cdot с \cdot ср \cdot МэВ, с точностью до множителя 2, совпадающего с экспериментальным значением [6].

Перейдем теперь к расчету эволюции дозы облучения льдов у границы гелиосферы энергетическими частицами АКЛ. Используем (9), где теперь поток $F_p(E) = 4\pi J_p(E)$, а интенсивность $J_E = J_E(E_1)(E_1/E)^\beta$ и $J_p(E)E = J_E$:

$$(nM(n))D_r = \int_{E_1}^{E_2} F_p(E) S(E) dE. \quad (16)$$

Тогда, аппроксимируя энергетические потери протонов в водяном льду, в диапазоне 1-100 МэВ, $S(E) = S(E_1)(E_1/E)^\beta$, ($\beta = 0.71$), получим

$$D_r = \frac{4\pi \cdot S(E_1) J_p(E_1)}{(\beta + \gamma - 1) nM(n)}. \quad (17)$$

Точность (17) (по сравнению со случаем с табличными данными $S(E)$) составляет 6-7%, что вполне приемлемо. Результаты представлены на рис.4, где показаны рассчитанные по программе SRIM [18,19] значения $S(E)$ в сравнении с аппроксимирующей их функцией. Также показана временная зависимость теоретической дифференциальной интенсивности энергетических протонов у 1 МэВ на границе гелиосферы, с указанием современного наблюдаемого значения, и энергетические спектры и скорости облучения в зависимости от γ . Лучше всего совпадает с наблюдаемым в [21] распределение в диапазоне 1-100 МэВ, соответствующее значению $\gamma = 2.0$, в то время как при $E = 1$ МэВ $J_p(E) = 0.55$, что примерно в 2 раза меньше наблюдаемого. С другой стороны, $J_p(E = 1 \text{ МэВ}) = 1.3$ (при $\gamma = 4.0$), что совпадает с наблюдаемым значением. Эти оценки показывают, что следует с осторожностью использовать распределение $\sim E^{-\gamma}$ во всем рассматриваемом диапазоне. Следует подчеркнуть, что в задаче вычисления доз облучения данное обстоятельство не существенно,

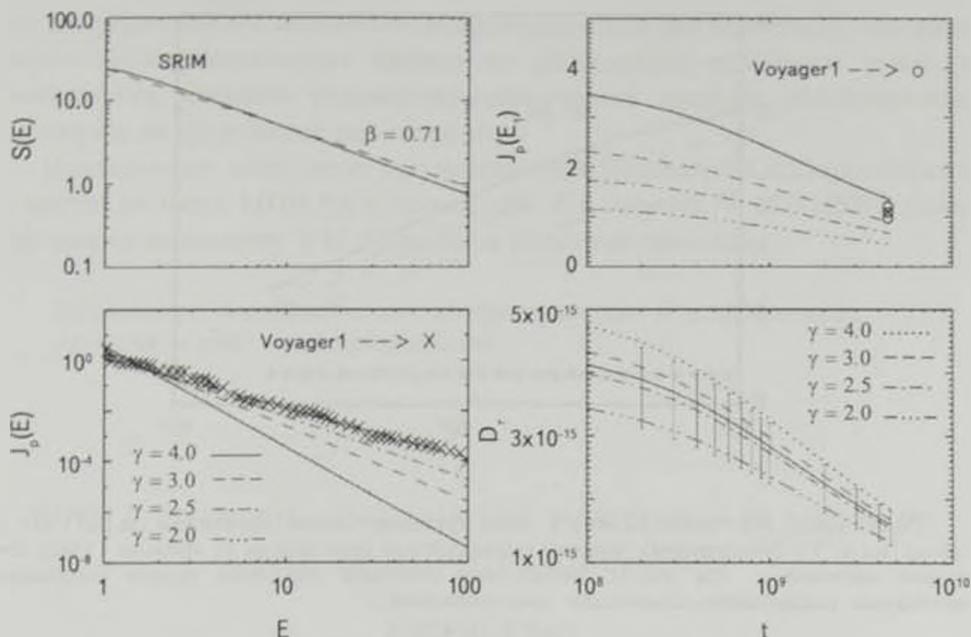


Рис 4. Энергетические потери протонов в водяном льду $S(E)$ (кэВ/м) в зависимости от энергии E (МэВ), рассчитанные по SRIM, в сравнении с аппроксимирующей степенной функцией (вверху, слева). Зависимость теоретической дифференциальной интенсивности энергетических протонов при 1 МэВ у границы гелиосферы $J_p(E)$ (частиц $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$) от времени t (лет). Показано также наблюдаемое современное значение (Voyager 1) (вверху справа) и энергетические спектры $J_p(E)$ ($E = 1 - 100$ МэВ) в зависимости от параметра γ (внизу, слева) и эволюционные изменения скорости облучения D_+ (эВ $\text{с}^{-1} \text{см}^2 \text{а.е.м.}^{-2}$) с указанием относительного отклонения от среднего в зависимости от γ (внизу, справа).

так как они, согласно (17), зависят только от значений $J_p(E=1 \text{ МэВ})$ именно из-за "крутизны" распределения, даже при $\gamma = 2.0$, так что полученные формулы можно считать приемлемыми с точностью до множителя меньше 2.

На рис.5 показано изменение дозы облучения за 100 млн лет у границы гелиосферы с течением времени для вышеприведенных значений γ . Сама граница также меняется, согласно (4), уменьшаясь на 15-20 а.е. примерно за каждые 100 млн лет, начиная со значения 800 а.е. при 3.8 млрд лет назад и кончая современными 100 а.е. Интенсивность энергетических протонов за фронтом ударной волны уменьшается как r^{-2} , а внутри гелиосферы подвержена модуляции солнечным ветром, что требует отдельного рассмотрения. Таким образом, для количественных характеристик облучения льдов солнечной системы энергетическими протонами ранней гелиосферы можно использовать (17), или данные рис.5, что может быть интересным при исследовании объектов пояса Койпера.

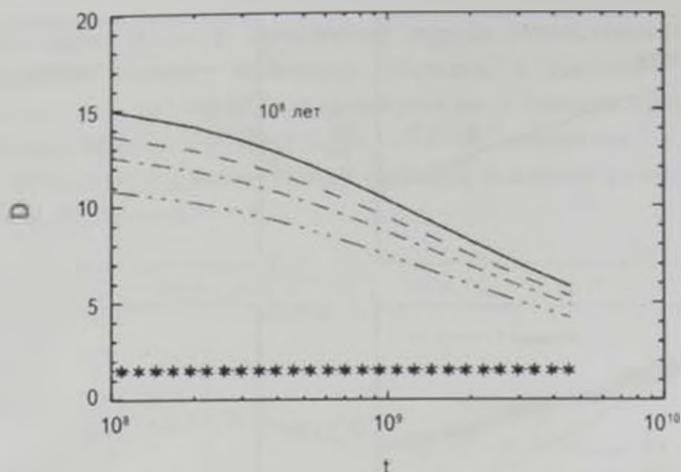


Рис.5. Дозы облучения водяного льда энергетическими протонами за 10^4 лет D ($\text{эВ см}^{-1} \text{ а.с.м.}^{-1}$) у (переменной) границы гелиосферы, в зависимости от времени t (лет), для разных значений γ (см рис.4). Звездочками отмечены пороговые уровни инициации возможных радиационно-химических трансформаций.

Также следует подчеркнуть, что результаты цитированной работы [6] вместе с нашими расчетами наглядно демонстрируют факт превышения потоков низкоэнергетических частиц (1-100 МэВ) как минимум на 4 порядка по сравнению со среднегалактическим, в так называемых астросферах, даже обусловленных такими слабыми звездными ветрами, как солнечным. Это может иметь интересные последствия при прохождении звезд, и в частности Солнца, через межзвездные облака [16,24].

4. *Заключение.* Таким образом, льды на поверхности небесных тел (пояс Койпера, ядра комет, и т.п.) подвержены влиянию облучения протонами разных энергий, в основном порядка 1 кэВ и 1 МэВ. Следует отметить, что ультрафиолетовое излучение, удары метеоритов и нагрев солнечным излучением, также могли способствовать изменению состояния их поверхности за все время их существования. Однако для комплексного решения проблемы, например, анализа фотометрических характеристик ледовых покрытий, необходимо сначала проанализировать влияние отдельных факторов. В данной статье, используя модельные теоретические потоки протонов ветра и ускоренных у границы гелиосферы энергетических протонов. Были рассчитаны скорости облучения и дозы для водяного льда практически за все время существования гелиосферы, начиная с момента зарождения жизни на Земле 3.8 млрд лет назад. Их значения показали, что энергии, поглощенной льдами на поверхности тел солнечной системы в течение 1 млн лет и более, достаточно

для их существенного изменения. В заключение еще раз подчеркнем важность новых экспериментальных данных по результатам облучения льдов, в особенности значений радиационно-химических выходов синтезируемых молекул и их оптических характеристик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 15Т-1С081. Автор благодарен рецензенту В.Н.Обридко за полезные замечания.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
Армения, e-mail: ayaraycg@gmail.com

EVOLUTION OF ENERGETIC PARTICLE FLUXES IN THE EARLY HELIOSPHERE

AYEGHIKYAN

The variations of proton fluxes in the heliosphere during its evolution, due to a decrease of the mass loss rate of the Sun and the flow's speed are calculated. Two kinds of protons are considered as belonging to the solar wind with the energies of about 1 keV, corresponding to the flow's speed of about 400 km/s, as well as related to the anomalous component, accelerated at the boundary of the heliosphere to energies of the order of 1-100 MeV. For each type of protons approximate formulas for differential intensity changes over time consistent with the available observational and theoretical data are presented. Then analytical dependences of water ice irradiation rates at different stages of evolution of the heliosphere are obtained, which are important for the analysis of radiation-chemical transformations of the solar system ices.

Key words: *evolution of the early heliosphere; energetic particles; protons acceleration; ices; irradiation doses*

ЛИТЕРАТУРА

1. *N.Meyer-Vernet*, Basics of the solar wind, Cambridge UP, 2007.
2. *B.Wood, H.-R.Muller, G.Zank et al.*, *Astrophys. J.*, **628**, L143, 2005.

3. *B.Wood, J.Linsky, M.Güdel*, in: H.Lammer, M.Khodachenko (eds.), *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments*, *Astrophys. Space Sci. Library*, **411**, 19, Springer, 2015.
4. *V.Airapetian, A.Usmanov*, *Astrophys. J.*, **817**, L24, 2016.
5. *H.Fahr*, *Adv. Sp. Res.*, **34**, 3, 2004.
6. *K.Scherer, H.Fichtner, S.Ferreira et al.*, *Astrophys. J.*, **680**, L105, 2008.
7. *A.Yeghikyan*, *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **5**, 1, 2008.
8. *J.Cooper, E.Christian, J.Richardson, C.Wang*, *Earth, Moon and Planets*, **92**, 261, 2003.
9. *M.Longair*, *High Energy Astrophysics*, Cambridge UP, 2011.
10. *В.Баранова, К.Краснобаев*, *Гидродинамическая теория космической плазмы*, М., Наука, 1977.
11. *E.Guinan, I.Ribas*, in: *The evolving Sun and its influence on planetary environments*, *ASP Conf. Series*, **269**, 85, 2002.
12. *K.Zahnle, J.Walker*, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 280, 1982.
13. *I.Sackmann, A.Boothroyd*, *Astrophys. J.*, **583**, 1024, 2003.
14. *G.Newkirk Jr.*, *Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.*, **13**, 293, 1980.
15. *A.Yeghikyan, H.Fahr*, in: *Astrophys. Space Sci. Lib.*, **338**, 317-348, Frisch, P. (ed.), *Solar Journey: The significance of our Galactic Environment for the Heliosphere and Earth*, Springer, 2006.
16. *А.Егикян*, *Астрофизика*, **56**, 267, 2013, (*Astrophysics*, **56**, 246, 2013).
17. *А.Егикян*, *Астрофизика*, **54**, 103, 2011, (*Astrophysics*, **54**, 87, 2011).
18. *J.Ziegler, J.Biersack, U.Littmark*, *The Stopping and Range of Ions in solids*, Pergamon Press, NY, 2003.
19. *J.Ziegler, J.Biersack*, www.srim.org, 2013.
20. *F.Cataldo, G.Strazzulla, S.Iglesias-Groth*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **394**, 615, 2009.
21. *E.Stone, A.Cummings, F.McDonald et al.*, *Science*, **309**, 2017, 2005.
22. *A.Yeghikyan*, *Molecular Astrophysics*, in press, 2017.
23. *P.Edmon*, *Multidimensional diffusive shock acceleration in the winds from massive stars*, PhD Thesis, University of Minnesota, 2010.
24. *А.Егикян, Л.Барсамян*, *Астрофизика*, **56**, 481, 2013, (*Astrophysics*, **56**, 443, 2013).