

УДК 523.45-87;551.521

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗ РАДИАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СПУТНИКА ЮПИТЕРА ЕВРОПЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2021 г. О. О. Царева^{a,*}, Е. П. Попова^{b,c,d,e}, В. Ю. Попов^{a,d,f}, Х. В. Малова^{a,g}, Л. М. Зеленый^a

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bСколковский институт науки и технологий, Центр нейробиологии и нейрореабилитации, Москва, Россия

^cЦентр астрономических исследований, Университет Бернардо О'Хиггинса, Сантьяго, Чили

^dНациональный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

^eОбъединенный институт ядерных исследований, Лаборатория радиационной биологии, Дубна, Россия

^fФизический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^gНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: olga8.92@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2021 г.

После доработки 02.03.2021 г.

Принята к публикации 15.03.2021 г.

Считается, что в подледном океане Европы, спутника Юпитера, возможно существование микроскопической жизни. Однако радиационные пояса Юпитера усложняют возможность ее обнаружения на поверхности или на небольших глубинах. С помощью численного моделирования, мы исследовали влияние наклона магнитного диполя Юпитера, альвеновских крыльев и индуцированного поля Европы на динамику электронов вблизи спутника Юпитера, что позволило уточнить карту доз радиации на поверхности Европы, полученную ранее в приближении ведущего центра.

Ключевые слова: Европа – спутник Юпитера, радиация, радиационные пояса Юпитера

DOI: 10.31857/S0320930X21040113

ВВЕДЕНИЕ

В 1990-х годах миссия NASA Galileo, которая предоставила большую часть современных данных о Европе, нашла убедительные доказательства существования обширного океана под ледяным покровом Европы. Оказалось, что внешние слои Европы (толщиной примерно 100 км) состоят из воды – частично в виде ледяной коры (толщиной 10–30 км), и частично в виде подповерхностного жидкого океана (Kivelson и др., 2000). В таком океане не исключено наличие микроскопической жизни, так как он, возможно, не замерзает из-за воздействия приливных сил, периодические изменения которых приводят к деформации спутника и, как следствие, к нагреву его недр. Этот же механизм служит причиной эндогенной геологической активности Европы, напоминающей тектонику плит. Кроме того, у Европы есть крайне разреженная атмосфера, состоящая в основном из кислорода. Космический телескоп Hubble Space Telescope обнаружил выбросы водяного пара в нескольких местах на Европе. Такой перенос эндогенного материала на поверхность Европы

позволяет исследовать химический состав подповерхностного океана без необходимости бурения ледяной коры. Таким образом, ученые считают Европу одним из самых многообещающих мест в нашей Солнечной системе для поиска жизни. Запуск аппарата для изучения ледяных спутников Юпитера, “Jupiter Icy Moon Explorer” (JUICE), запланирован на 2022 г. (Grasset и др., 2013). С его помощью ученые надеются получить информацию о возможной обитаемости океана Европы. Орбита Европы расположена в радиационном поясе Юпитера, поэтому поверхность спутника подвержена сильному радиационному излучению, которое может разрушить органическую жизнь, проникающую через разломы льда из океана на поверхность. Степень воздействия излучения заряженных частиц на поверхностный материал зависит от глубины защиты, типа материала и его географического положения на поверхности Европы. Оценки радиации на поверхности Европы выполнялись различными научными группами (U.S. Geological Survey, NASA/JPL-Caltech, Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, Nature Astron-

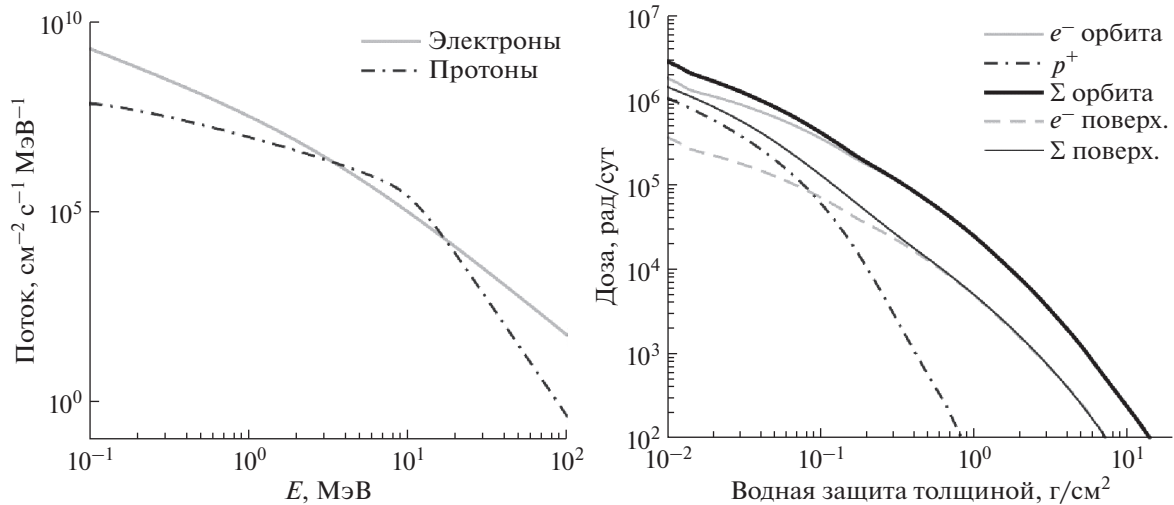


Рис. 1. Слева: спектры протонов и электронов радиационных поясов Юпитера на расстоянии $9.5R_{J_u}$. Справа: дозы радиации под слоем воды за счет электронов (серая сплошная линия) и протонов (пунктирная с точкой) и их суммарные дозы (толстая сплошная линия), рассчитанные на орбите Европы. Также показаны дозы радиации на поверхности Европы – электронов (серая пунктирная) и суммарные дозы электронов и протонов (тонкая сплошная линия). Вклад электронов в радиацию на поверхности Европы ниже, чем на ее орбите (в 5 раз, по данным (Podzolkо и др., 2011)).

оту), которые описывали движение электронов в рамках приближения ведущего центра (Podzolkо и др., 2011; Paranicas и др., 2000; 2009; Truscott и др., 2011; Nordheim и др., 2018). Наша цель – уточнить и дополнить известные результаты с помощью прямого моделирования с учетом лармовского радиуса частиц, наклона диполя Юпитера, альвеновских крыльев и индуцированного магнитного поля Европы, а также определить на поверхности Европы области с наименьшими дозами радиации, в которых есть возможность обнаружить органику. Для этого была разработана численная модель, позволяющая найти концентрацию электронов радиационных поясов Юпитера на поверхности Европы.

СПЕКТРЫ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА И МОЩНОСТИ ДОЗ

Поток частиц, достигающих поверхности Европы в отсутствие индуцированных и собственных полей, должен соответствовать спектрам радиационных поясов Юпитера (рис. 1). Электронный спектр, измеренный детектором энергетических частиц (EPD) орбитального аппарата Galileo, аппроксимируется функцией $j(E) = 4\pi \cdot 23 \times 10^6 E^{-1.58} (1 + E/3.11)^{-1.86} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}$, предложенной в работе Nordheim и др. (2018). Спектр протонов на орбите Европы соответствует функции $j(E) = 4\pi \times 842.79 \times 10^3 E(E + 0.07)^{-2.36} \times (1 + (E/10.4)^{4.78})^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}$.

Начальный энергетический спектр электронов был скорректирован с учетом доли электронов, которые могут достичь поверхности Европы. Мы предполагаем, как и Podzolkо и др. (2011); Truscott и др. (2011), что поток электронов на поверхности Европы не превышает 20% от своего максимального значения. В то же время энергичные протоны способны бомбардировать все точки на поверхности Европы. Таким образом, мы нормируем максимальное количество протонов и электронов, попадающих на поверхность Европы, на дифференциальный энергетический поток протонов и уменьшенный поток электронов радиационных поясов Юпитера.

Дозы радиации от протонов и электронов в веществе защиты рассчитаны согласно методическим указаниям (РД 50-25645.216-90). Мощность поглощенной дозы излучения от протонов в Гр определяется по формуле:

$$H_R = B \int \Phi(E) \frac{dE}{\rho dx}, \quad (1)$$

где B – коэффициент перехода от поглощенной энергии к дозе, Гр $\text{МэВ}^{-1} \text{ см}^2$; $dE/\rho dx$ – ионизационные потери в веществе защиты, $\text{МэВ г}^{-1} \text{ см}^2$; $\Phi(E)$ – это дифференциальный энергетический спектр, E_0 – энергия протонов на глубине защиты δ , связанная с энергией протонов E , МэВ , падающих на защиту.

Метод расчета доз от протонов основан на предположении их прямолинейного распространения. А метод расчета доз от электронов усложнен их многократным рассеянием в веществе с учетом ионизационных потерь, т.е. их траектории

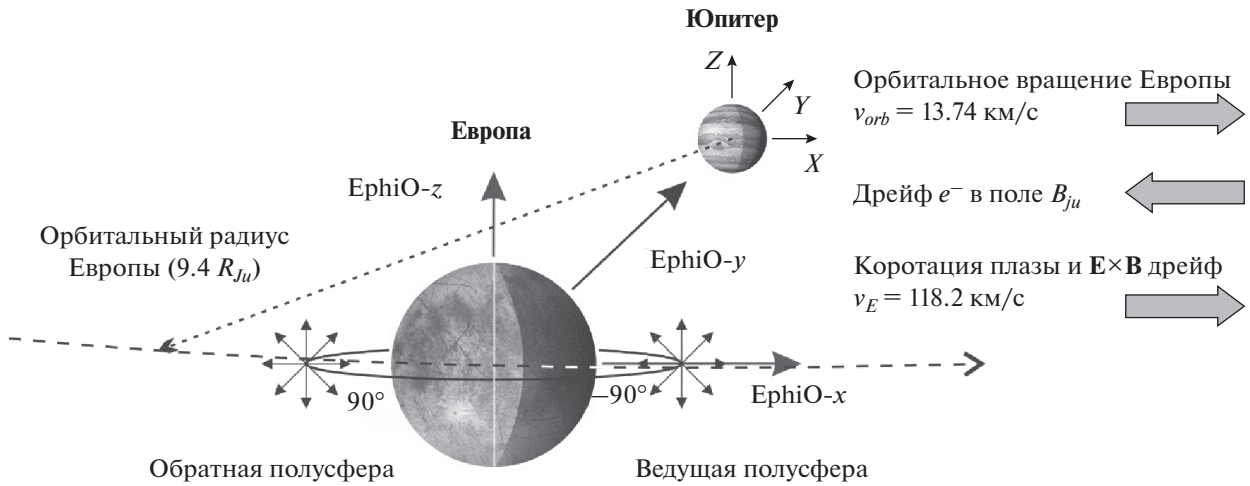


Рис. 2. Европоцентрированная система (EphiO) движется вместе со спутником. Ось z направлена вдоль оси вращения Юпитера, ось y – вдоль радиуса-вектора к центру Юпитера, ось x имеет азимутальное направление (в сторону потока плазмы). Нулевой меридиан ($\phi = 0$) обращен к Юпитеру.

в среде не являются прямолинейными. Ионизационные потери и длины свободных пробегов протонов и электронов для различных веществ, (включая воду), можно найти в работе Беспалова (2008).

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА

Рассмотрим движение электрона относительно подвижной Европоцентрированной системы координат (назовем ее EphiO). Абсолютная скорость частицы (\mathbf{v}) в этой системе складывается со скоростью орбитального вращения спутника ($v_{orb} = 13.74$ км/с). Поскольку Европа является синхронным спутником Юпитера и всегда обращена к нему одной стороной ($\phi = 0$), то в системе отсчета EphiO Юпитер не движется, но совершает обороты вокруг своей оси с угловой скоростью собственного вращения ($2\pi/9.9$ ч⁻¹) минус орбитальное вращение Европы ($2\pi/84$ ч⁻¹).

С экваториальной плоскости на расстоянии $5R_{Eu} \pm (\tau_b v_x)/2$ от центра Европы, (где τ_b – полупериод осцилляций частиц), электроны с энергиями 0.1–50 МэВ были запущены во всех направлениях, (отмеченных стрелками на рис. 2). Траектории движения электронов интегрировались в магнитном (\mathbf{B}) и электрическом (\mathbf{E}) полях. Уравнение движения релятивистской частицы с зарядом Ze и массой покоя m_0 в системе СИ:

$$\begin{cases} d\mathbf{r}/dt = \mathbf{v} - v_{orb}\mathbf{e}_x, \\ \mathbf{p} = m_0\mathbf{v}/\sqrt{1-|\mathbf{v}|^2/c^2}, \\ d\mathbf{p}/dt = Ze(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]), \\ \mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0, \quad \mathbf{v}(0) = \mathbf{v}_0. \end{cases} \quad (2)$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЮПИТЕРА И ЕВРОПЫ

Электрическое поле коротации $\mathbf{E}_\Omega = -[\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}] \times \mathbf{B}_{Ju}$, где $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость вращения Юпитера, заставляет холодные частицы вращаться на восток вокруг Юпитера со скоростью $\mathbf{v}_E = [\mathbf{E}_\Omega \times \mathbf{B}]/B^2$. Общее магнитное поле $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{Ju} + \mathbf{B}_{Ind} + \mathbf{B}_{AW}$ состоит из собственного магнитного поля Юпитера (\mathbf{B}_{Ju}), индуцированного поля Европы (\mathbf{B}_{Ind}) и крыльев Альвена (\mathbf{B}_{AW}).

Компоненты собственного магнитного поля выражаются как $\mathbf{B}_{Ju} = -\nabla U$, где U определяется суммой сферических гармоник

$$U(r, \theta, \phi) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \times \left[g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right] \times P_n^m(\cos \theta), \quad (3)$$

где r, θ, ϕ – сферические координаты, R – радиус планеты (или спутника), g_n^m и h_n^m – коэффициенты Гаусса и P_n^m – нормализованные по Шмидту полиномы Лежандра n -й степени и m -го порядка. Мы рассматриваем мультипольное магнитное поле 1-го порядка (т.е. дипольное поле) с коэффициентами Гаусса магнитного поля Юпитера $G_1^0 = 4.205 \times 10^5$ нТл, $G_1^1 = -0.659 \times 10^5$ нТл и

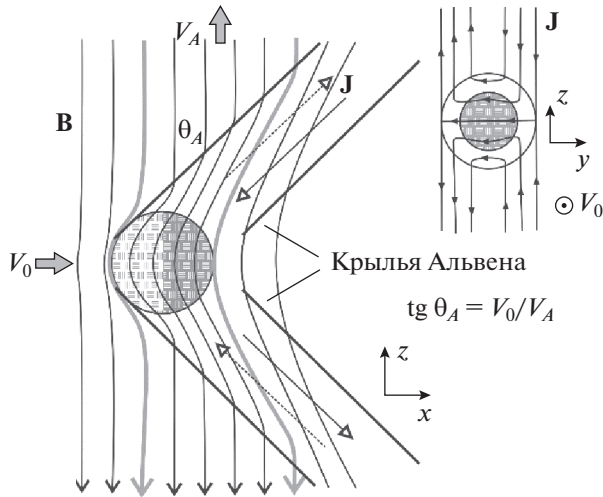


Рис. 3. Крылья Альвена. Силовые линии магнитного поля \mathbf{B} , возмущенные токовыми трубками Альвена, показаны в XZ -плоскости. Токи Альвена \mathbf{J} , текущие вдоль силовых линий и замыкающиеся на ионосфере, показаны стрелками в YZ -плоскости. Рисунок адаптирован из Jia и др. (2010).

$H_1^1 = 0.250 \times 10^5$ нТл из модели VIP4 (Connerney и др., 1998).

Согласно Parkinson (1983), магнитное поле, индуцированное однородной сферой в однородном внешнем поле, совпадает с полем диполя. Океан Европы с толщиной 3.5 км (подобный земному) индуцирует магнитное поле с относительной амплитудой $A = 0.7$, а требуемая при этом проводимость равна $\sigma = 58$ мСм/м (Zimmer и др., 2000). В пределе бесконечной проводимости $\sigma \rightarrow \infty$ относительная амплитуда равна $A = 1$. Ионосфера или облако захваченных ионов, вероятно, также обладают проводимостью, но недостаточной для индуцирования магнитного поля. Поскольку наклон диполя Юпитера составляет 10° и орбита Европы почти круговая (эксцентриситет равен всего 0.009) и слабо наклонена к плоскости экватора планеты (на 0.466°), магнитная ось индуцированного поля также будет менять наклон (параллельно магнитной оси Юпитера) по мере вращения спутника. Индуцированное магнитное поле равно

$$\mathbf{B}_{Ind}(r, \theta, \phi) = \frac{A B_{Ju}(9.4 R_{Ju}, \pi/2, \Phi_0)}{2 G_1^0} \times \left(\frac{R_{Eu}}{R_{Ju}} \right)^3 \mathbf{B}_{Ju}(r, \theta, \phi + \Phi_0), \quad (4)$$

где Φ_0 – угол поворота магнитного поля Юпитера, B_{Ju} – дипольное поле Юпитера, G_1^0 – старший дипольный коэффициент Гаусса.

Вращающийся поток холодной магнитосферной плазмы Юпитера частично отклоняется от спутников Юпитера токами, индуцированными в их ионосферах, создавая клиновидные структуры, называемые “крыльями Альвена” (рис. 3). В Европоцентрированной системе отсчета крылья Альвена расположены под углом $\theta_A = \arctg M_A$ к магнитному полю $B_0 \parallel z$ для перпендикулярного потока плазмы, где M_A – альфеновское число Маха. Альвеновские трубки действуют как внешние проводники с проводимостью $\Sigma_A = 1/(\mu_0 V_A (1 + M_A^2)^{1/2})$, где V_A – это скорость распространения альвеновской волны. Магнитоплазменные величины – альвеновское число Маха $M_A = V_0/V_A = 0.39$, скорость потока плазмы $V_0 = 150$ км/с, массовая плотность ионов $\rho = 120 \times m_p$ кг/см³ – взяты из Neubauer (1998). Продольные токи распределяются по цилиндру с радиусом R_{Eu} около Европы и изгибаются, согласно альвеновским характеристикам, при больших положительных и отрицательных значениях z . Согласно Neubauer (1980), внутри цилиндра $\sqrt{x^2 + y^2} \leq R_{Eu}$ электрическое поле $E_i = 0.9 V_0 B_0$ постоянно и магнитное поле равно $B_x = E_i \mu_0 \Sigma_A$. Снаружи оно уменьшается пропорционально $\sim (x^2 + y^2)^{-1}$. Мы не учитывали влияние индуцированного поля на геометрию альвеновского крыла.

ДИНАМИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРИБЛИЖЕНИИ ВЕДУЩЕГО ЦЕНТРА

Согласно Paranicas и др. (2000), скорость ведущего центра заряженной частицы относительно Европы может быть выражена как

$$\mathbf{v} = (v_E - v_{orb} - v_D) \mathbf{e}_x, \quad \text{для электронов,} \quad (5)$$

$$\mathbf{v} = (v_E - v_{orb} + v_D) \mathbf{e}_x, \quad \text{для протонов,}$$

где v_E – это скорость $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа из-за электрического поля коротации плазмы, v_{orb} – скорость орбитального вращения Европы, v_D – дрейфовая скорость поперек магнитных силовых линий Юпитера.

Электроны со скоростью ниже порога ($v < v_{th}$) приближаются к спутнику от $-X$ и осаждают заднюю полусферу спутника (рис. 2). При более высоких энергиях ($v > v_{th}$) скорость дрейфа электронов на запад превышает относительную скорость коротации плазмосферы Юпитера относительно Европы, и, следовательно, эти частицы дрейфуют к спутнику от $+X$, собираясь в ведущем полушарии, показанном на рис. 2.

Порог скорости определяется условием $v_D = v_E - v_{orb}$ и для осесимметричного диполя

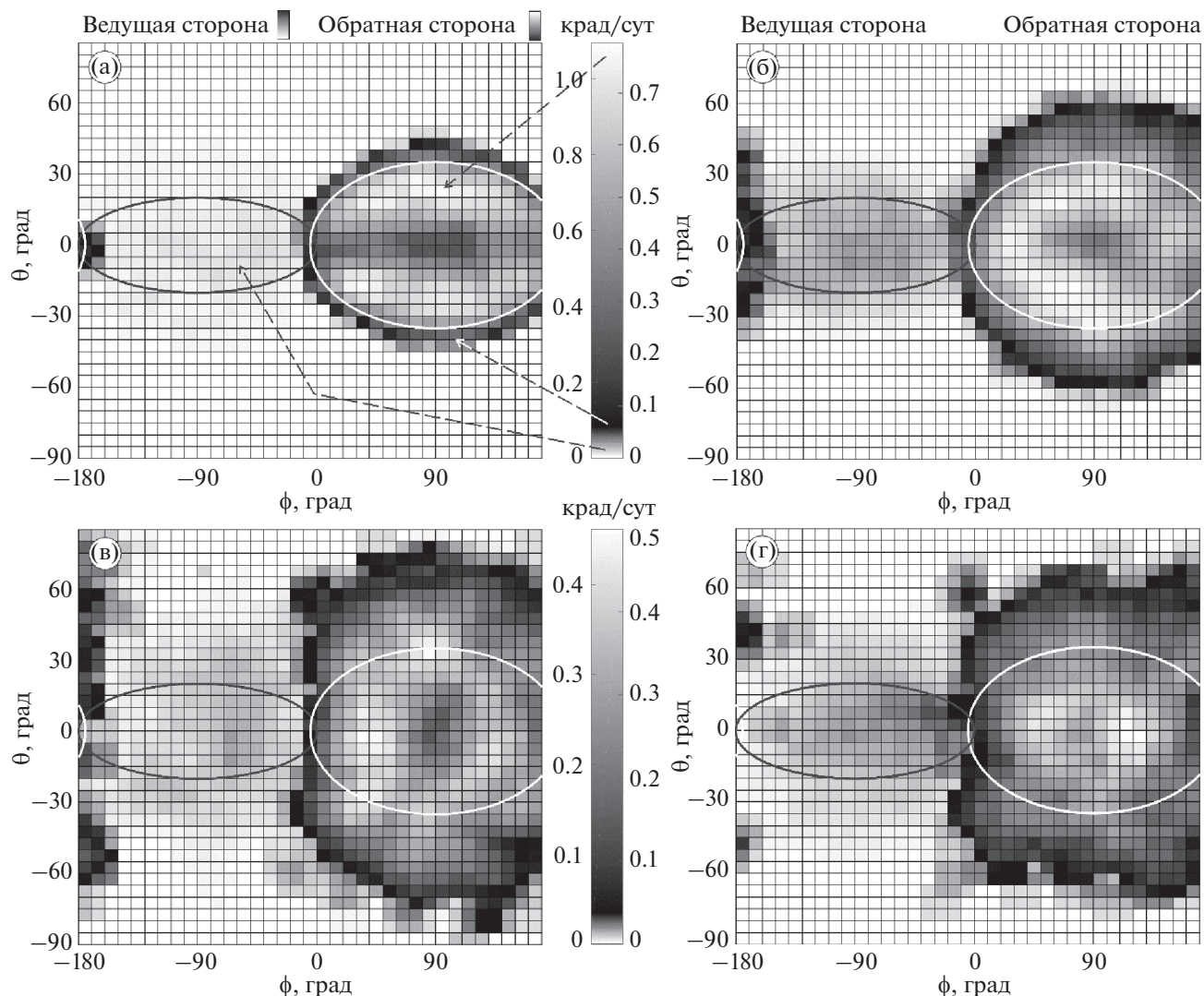


Рис. 4. Распределение радиации на поверхности Европы под слоем воды с толщиной 2.5 г/см^2 в моделях: (а) осесимметричное магнитное поле Юпитера; (б) реальное магнитное поле Юпитера (**JuMF**); (в) JuMF + модель индуцированного поля Европы (**Ind**); (г) JuMF + Ind + модель крыльев Альвена (Alfvén wing model, **AWM**).

Юпитера равен 25 МэВ. По мере вращения спутника вокруг Юпитера, порог скорости электронов может меняться от 25 до 30 МэВ. Электроны с энергией более 150 МэВ могут “перескакивать” спутник и проникать в оба полушария, как это делают протоны, (приближаясь к спутнику от $-X$).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И СРАВНЕНИЕ С ПРИБЛИЖЕНИЕМ ВЕДУЩЕГО ЦЕНТРА

С помощью моделирования нами получены распределения энергетических потоков заряженных частиц на поверхности Европы, и по формулам из методических указаний (РД 50-25645.216-90) рассчитаны их дозы радиации.

Согласно приближению ведущего центра, электроны, движущиеся в осесимметричном диполе Юпитера, концентрируются на поверхности Европы в областях, ограниченных окружностями. На рис. 4 области выпадения электронов с энергиями 5 и 30 МэВ очерчены белой и черной окружностями на обратной и ведущей сторонах Европы, соответственно. Более того, как было отмечено в работе (Podzolkó и др., 2011), с учетом ларморовского движения частиц у поверхности, на обратной стороне Европы, концентрация электронов на границе круга оказывается выше, чем в его центре. На противоположной (ведущей) стороне концентрация электронов выше в центре круга.

Мы определили мощность поглощенной дозы радиации под водой на глубине 2.5 г/см^2 . Элек-

Максимальная мощность дозы излучения электронов (крад/день) на поверхности Европы под слоем воды для моделей магнитного поля различной сложности

Модель	Толщина водного слоя, г/см ²	
	0.43	2.5
Осесимметр. JuMF	16	1.1
JuMF	13	0.8
JuMF + Ind	7.1	0.46
JuMF + Ind + AWM	7.5	0.5

троны и протоны с энергиями <5 и <55 МэВ на такую глубину не проникают (Беспалов, 2008). При такой толщине защиты распределение доз облучения на поверхности Европы для моделей магнитного поля возрастающей сложности показано на рис. 4.

В таблице приведены максимальные дозы радиации за защитами разной толщины для разных моделей поля. В поле наклонного диполя Юпитера общее количество радиации такое же, как и в осесимметричном поле. Но при этом область ее распределения увеличена, поэтому, согласно таблице, максимальная доза меньше. Индуцированное магнитное поле Европы защищает поверхность планеты от 37% радиации и увеличивает область ее поражения. Альвеновские крылья не влияют на общее количество радиации, но меняют ее распределение, увеличивая концентрацию электронов в центрах обратной и ведущей полушфер Европы. Поэтому максимальная доза в такой модели выше.

Наиболее опасной областью для жизни на поверхности Европы, с точки зрения радиационных условий, является заднее полушарие спутника, потому что на него осаждаются мощный поток электронов с энергией <30 МэВ. Высокоширотные области и ведущее полушарие более безопасны из-за отсутствия в них низкоэнергетических электронов. В ведущем полушарии основной вклад в излучение вносят электроны с энергией >30 МэВ, (способные проникать под слой воды толщиной более 13 г/см²). Электроны с энергиями >150 МэВ (как и протоны с энергиями порядка МэВ) могут достичь любой точки на поверхности Европы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана численная модель движения электронов в дипольном поле Юпитера, включая альвеновские крылья, индуцированное и внутреннее поля Европы, позволяющая уточнить и дополнить результаты, полученные с помощью при-

ближения ведущего центра (Nordheim и др., 2018) с учетом ларморовского радиуса частицы (Podzolkо и др., 2011).

Показано, что области высыпания электронов на поверхность Европы в наклонном диполе Юпитера больше по размеру и концентрации частиц, чем области в осесимметричном диполе, используемом в приближении ведущего центра. Индуцированное поле снижает дозы радиации на поверхности Европы, увеличивая области их распространения. Альвеновские крылья, как и ожидалось, не влияют на общую дозу облучения, а перераспределяют ее. Получено, что с учетом рассмотренных эффектов максимальная доза в нашей модели почти в два раза меньше, чем в приближении ведущего центра.

Таким образом, численное моделирование позволило построить более точную карту доз радиации, которая может помочь будущим миссиям в поиске органической жизни на спутнике Юпитера – Европе.

Авторы признательны Правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку следующих работ по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039): 1) построение модели динамики электронов вблизи Европы, 2) расчет доз радиации на поверхности Европы под слоем воды различной толщины, 3) построение карты распределения доз радиации на поверхности Европы. Исследование Е.П. Поповой поддержано Российским научным фондом в рамках гранта 17-11-01052. В рамках гранта РФФИ 17-11-01052 Е.П. Поповой была поставлена задача и предложены модели магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов В.И.* Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учебное пособие. 4-е изд., испр. прав. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 369 с.
- Connerney J.E.P., Acuña M.H., Ness N.F., Satoh T.* New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № A6. P. 11929–11940. <https://doi.org/10.1029/97JA03726>
- Grasset O., Dougherty M.K., Coustenis A., Bunce E.J., Erd C., Titov D., Blanc M., Coates A., Drossart P., Fletcher L.N., Hussmann H., Jaumann R., Krupp N., Lebreton J.-P., Prieto-Ballesteros O., Tortora P., Tosi F., Van Hoolst T.* Jupiter icy moons explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system // *Planet. and Space Sci.* 2013. V. 78. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002>
- Jia X., Kivelson M.G., Khurana K.K., Walker R.J.* Magnetic Fields of the Satellites of Jupiter and Saturn // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 152. P. 271–305.
- Kivelson M.G., Khurana K.K., Russell C.T., Volwerk M., Walker R.J., Zimmer C.* Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at

- Europa // *Science*. 2000. V. 289. P. 1340–1343. <https://doi.org/10.1126/science.289.5483.1340>
- Neubauer F.M.* Nonlinear standing Alfvén wave current system at Io: Theory // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. № A3. P. 1171–1178.
- Neubauer F.M.* The sub-Alfvénic interaction of the Galilean satellites with the Jovian magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № E9. P. 19843–19866.
- Nordheim T.A., Hand K., Paranicas C.* Preservation of potential biosignatures in the shallow subsurface of Europa // *Nature Astron.* 2018 V. 2. P. 673–679.
- Paranicas C., Cooper J.F., Garrett H.B., Johnson R.E., Sturner S.J.* Europa’s Radiation Environment and Its Effects on the Surface. 2009. P. 529.
- Paranicas C., McEntire R.W., Cheng A.F., Lagg A., Williams D.J.* Energetic charged particles near Europa // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2000. V. 105 № A7. P. 16005–16015.
- Parkinson W.D.* Introduction to Geomagnetism. Edinburgh: Scottish Acad. Press, 1983. 433 p.
- Podzolko M.V., Getselev I.V., Gubar Y.I., Veselovsky I.S., Sukhanov A.A.* Charged particles on the Earth-Jupiter-Europa spacecraft trajectory // *Adv. Space Res.* 2011. V. 48. P. 651–660.
- Truscott P., Heynderickx D., Sicard-Piet A., Bourdarie S.* Simulation of the radiation environment near Europa using the geant4-based planetocosmics-j model // *IEEE Transactions on Nuclear Sci.* 2011. V. 58 № 6. P. 2776–2784.
- Zimmer C., Khurana K.K., Kivelson M.G.* Subsurface oceans on Europa and Callisto: Constraints from Galileo magnetometer observations // *Icarus*. 2000. V. 147. № 2. P. 329–347.