

УДК 620.76/78.004

## ВРЕМЕНА ЖИЗНИ ТЕХНОГЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ, ИНЖЕКТИРУЕМЫХ В ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

© 2022 г. Е. К. Колесников<sup>1</sup>, \*, С. В. Чернов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*e.kolesnikov@spbu.ru

Поступила в редакцию 10.08.2021 г.

После доработки 16.10.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2022 г.

В статье на основе результатов численного моделирования впервые показана возможность длительного орбитального существования техногенных частиц из оксида алюминия, отделяющихся от поверхности активно действующего геостационарного спутника или “мусорного” объекта, “захороненного” в окрестности геостационарной орбиты. Показано, что в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности большие времена орбитального существования (более 1 месяца) имеют частицы, радиусы которых превышают пороговое значения близкое к 1.1 мкм. Времена орбитального существования техногенных частиц с радиусами большими указанного порогового значения практически не зависят от начального положения точки инъекции на геостационарной орбите и быстро растут с увеличением радиуса техногенной частицы. Так, время орбитального существования частицы радиусом 3 мкм равно 130 сут, а для частицы радиусом 3.52 мкм — это время больше 2-х лет (!). Результаты численных экспериментов показывают, что в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности большие времена орбитального существования могут иметь и субмикронные техногенные частицы с радиусами менее 0.1 мкм. Проведенный анализ расчетных данных показывает, что долгоживущие частицы с радиусами в промежутке от 0.01 до 0.1 мкм движутся в т. н. кеплеровском режиме. Кроме того, установлена возможность длительного орбитального существования (более 2-х лет) сверхмелких техногенных частиц с радиусами меньшими 0.01 мкм, инжектируемых на геостационарной орбите. Анализ показывает, что в данном случае техногенная частица движется в т. н. режиме магнитно-гравитационного захвата.

DOI: 10.31857/S0023420622040057

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи динамики в околоземном космическом пространстве техногенных частиц (ТЧ) начали активно рассматриваться с середины 80-х гг. прошлого столетия в связи с быстро возрастающим загрязнением ближнего космоса, потребовавшим разработки методов прогноза загрязнения ОКП указанными частицами [1]. Результаты расчетов времен жизни в ОКП крупных ТЧ с размерами от 1 до 100 мкм, приведенные, например, в работах [2–4], указывали на возможность длительного орбитального существования крупных ТЧ, инжектируемых в ОКП, как на высоких, так и на низких орбитах. Таким образом, из полученных расчетных данных следовало, что крупные ТЧ должны являться важным фактором длительного загрязнения ближнего космоса.

Исследования динамики в ОКП субмикронных частиц с размерами порядка 0.1–1 мкм показали, что времена орбитального существования ТЧ указанных размеров, как правило, оказыва-

лись существенно ограниченными: при инъекции на больших высотах — возмущающим воздействием силы солнечного давления [5], а на низких околоземных орбитах — сопротивлением остаточного газа верхней атмосферы [6].

Особенности динамики в ОКП более мелких частиц с размерами менее 0.1 мкм, не выходящих в процессе орбитального движения за пределы земной плазмосферы, были исследованы нами в работах [7, 8]. Из полученных результатов численного моделирования следовало, что, в отличие от ранее рассматривавшихся субмикронных частиц с размерами порядка 0.1 мкм, частицы с размерами порядка 0.001–0.01 мкм (1–10 нм) при определенных условиях в результате возмущающего воздействия на их движение в ОКП силы Лоренца, действующей на заряд ТЧ со стороны магнитного поля Земли, способны длительное время удерживаться в околоземном пространстве и могут являться, как и крупные ТЧ, важным фактором антропогенного загрязнения ближнего

космоса. Корректность полученных результатов численных экспериментов была подтверждена аналитическими исследованиями, проведенными в работах [9–11].

В настоящей работе на основе применения методов численного моделирования показана возможность длительного орбитального существования техногенных частиц, инжектируемых в ОКП на геостационарной орбите. При этом, как показывают результаты численных экспериментов, большие времена орбитального существования (более 1 месяца) могут иметь как крупные ТЧ с размерами более 1 мкм, так и сверхмелкие ТЧ с размерами от единиц до десятков нанометров.

В настоящее время, спустя почти 60 лет после запуска первого геостационарного спутника, на геостационарной орбите (ГСО) находятся более 440 спутников. Общее же число объектов в окрестности геостационарной орбиты, включающих “мусорные” объекты, переведенные на орбиты “захоронения”, близко к 1200 [12]. Все эти объекты движутся по ГСО или по близким к ГСО орбитам в узкой окрестности нее (на высоте  $\pm 235$  км относительно высоты ГСО и по широте  $\pm 15^\circ$  относительно плоскости ГСО). Полученные нами расчетные данные показывают, что множество указанных орбитальных объектов может являться источником 2-х долгоживущих популяций техногенных частиц, одна из которых состоит из крупных ТЧ с размерами от 1 до 100 мкм, представляющих значительную опасность для космических аппаратов, а другая – образована сверхмелкими ТЧ с размерами от единиц до десятков нанометров, негативные последствия воздействия которых на орбитальные космические аппараты требует специального исследования в лабораторных и натуральных экспериментах.

Заметим, что природа частиц, образующих указанные популяции, может быть весьма различной. Это могут быть и пылевые частицы, адсорбирующиеся на поверхности КА или разгонного блока КА в процессе запуска, от которых в соответствии с приведенными в [13] данными натуральных измерений загрязненные поверхности очищаются спустя примерно месяц с момента выхода на орбиту. В состав этих популяций могут входить и мелкомасштабные продукты деградации материала поверхности материнских объектов под действием УФ-излучения Солнца, а также – в результате воздействия на материал поверхности атомарного кислорода (на низковысотном участке траектории выведения КА на геостационарную орбиту) [1]. Наконец, в их составе могут оказаться и весьма “экзотические” объекты, например, – микробиологические объекты земного происхождения: бактерии, микровицеты, вирусы и др., которые, как показывают результаты проведенных в последние годы натуральных экспериментов [14, 15],

обнаруживаются на внешней поверхности космических объектов и, даже, в определенных случаях, сохраняют свою жизнеспособность в условиях открытого космоса.

## 2. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ДВИЖЕНИЕ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ, ИНЖЕКТИРУЕМЫХ В ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Как показано в [5], задача движения субмикронных частиц на высотах порядка высоты геостационарной орбиты должна решаться с учетом воздействия на частицу: гравитационных сил; силы солнечного давления; силы сопротивления нейтральной компоненты фонового газа, а также электродинамических сил, обусловленных взаимодействием наводимого на частице заряда с магнитным и электрическими полями околоземного космического пространства. Движение ТЧ будем рассматривать в геоцентрической равноденственной экваториальной системе отсчета с началом в центре Земли, ось  $X$  которой направлена в точку весеннего равноденствия, ось  $Z$  направлена на северный географический полюс, а ось  $Y$  дополняет систему до правой. В указанной системе координат движение в ОКП сферической ТЧ массой  $m_d$  и радиусом  $R_d$  будет описываться уравнением:

$$m_d \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{r} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_G^{dst} + \mathbf{F}_L^B + \mathbf{F}_L^E + \mathbf{F}_{pr} + \mathbf{F}_{drag}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  – радиус-вектор местоположения частицы в равноденственной системе отсчета.

В уравнении (1) сила  $\mathbf{F}_G = -G \frac{m_d M_E}{r^3} \mathbf{r}$  представляет собой гравитационную силу, действующую на ТЧ со стороны центрального гравитационного поля Земли ( $G$  – гравитационная постоянная;  $M_E$  – масса Земли), а сила  $\mathbf{F}_G^{dst} = -m_d \nabla \left\{ \frac{GM_E J_2 R_E^2}{2r^3} (3 \sin^2 \phi - 1) \right\}$  – возмущение силы  $\mathbf{F}_G$ , обусловленное полярным сжатием Земли ( $J_2$  – второй зональный гармонический коэффициент;  $\phi$  – географическая широта ТЧ;  $R_E$  – радиус Земли).

Оценки показывают, что для рассматриваемых нами ТЧ с размерами от единиц нанометров до 100 мкм воздействием на движение ТЧ гравитационных возмущений, обусловленных полями Луны и Солнца, можно пренебречь по сравнению с возмущениями, создаваемыми силой Лоренца, силой солнечного давления и эффектом полярного сжатия Земли. В то же время для крупных ТЧ с размерами более 100 мкм для определенных по-

ложений Луны и Солнца совместный возмущающий эффект их гравитационных полей может оказаться соизмеримым с эффектом полярного сжатия Земли [16]. Например, для геостационарной орбиты скорость прецессии орбиты, обусловленной совместным действием Луны и Солнца может достигать значения  $\dot{\Omega}_{L,S} = 14 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ . Для сравнения отметим, что скорость прецессии, вызванная первой степенью полярного сжатия в этом случае всего в 2 раза выше ( $30 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ ).

Силы  $\mathbf{F}_L^B = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  и  $\mathbf{F}_L^E = q\mathbf{E}$  — соответственно магнитная и электрическая составляющие силы Лоренца, обусловленные взаимодействием заряда микрочастицы  $q = q(t)$ , движущейся со скоростью  $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$  в равноденственной системе отсчета, с магнитным  $\mathbf{B}$  и электрическим  $\mathbf{E}$  полями, наблюдаемыми в используемой равноденственной экваториальной системе отсчета, в которой Земля вращается с угловой скоростью  $\Omega$ .

Магнитное поле  $\mathbf{B}$  определяется следующим образом. Известно [17], что в случае, когда линейные скорости вращающегося объекта-источника магнитного поля являются нерелятивистскими (что в нашем случае выполнено), геомагнитное поле при наблюдении из равноденственной системы отсчета, *совпадает* с полем  $\mathbf{B}^G$  (в соответствующих точках), наблюдаемым в гринвичской системе отсчета, связанной с вращающейся Землей. Последнее же поле может быть аппроксимировано суммой  $N$  сферических гармоник ряда Гаусса:

$$\mathbf{B}^G = -\nabla V,$$

$$V = R_E \sum_{n=1}^N \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n+1} \times$$

$$\times \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) \left[ g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi \right],$$

где  $P_n^m$  — присоединенные полиномы Лежандра,  $\varphi$  — географическая долгота,  $\theta$  — дополнение географической широты, а  $g_n^m$  и  $h_n^m$  — постоянные коэффициенты, значения которых для эпохи 2015 г. приведены в [18]. Программная реализация разработанной динамической модели допускает возможность использования для аппроксимации геомагнитного поля от 1 до 13 сферических гармоник.

Электрическое поле  $\mathbf{E}$  представляется суперпозицией полей коротации и конвекции:  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{co-rotation} + \mathbf{E}_{cross-tail}$ .

Поле коротации  $\mathbf{E}_{co-rotation} = \frac{1}{c} (\mathbf{r} \times \Omega) \times \mathbf{B}$  ( $\Omega = \Omega \mathbf{e}_z$  — вектор угловой скорости суточного

вращения Земли). Это поле, наблюдается в равноденственной системе отсчета, и возникает вследствие вращения в ней тела-источника магнитного поля (Земли) [17].

$\mathbf{E}_{cross-tail} = E_{cross-tail} \mathbf{e}_y^{GSM}$  — электрическое поле конвекции, которое может быть аппроксимировано постоянным электрическим полем, направленным с утренней на вечернюю сторону магнитосферы и зависящим от геомагнитной активности.

В выписанных формулах:  $\mathbf{e}_z$  — орт оси вращения Земли  $Z$ , а  $\mathbf{e}_y^{GSM}$  — орт оси  $Y$  геоцентрической солнечной магнитосферной системы координат (GSM) [19].

Сила солнечного давления  $\mathbf{F}_{pr}$  на ТЧ определяется формулой:

$$\mathbf{F}_{pr} = Q_{pr} \frac{N \pi R_d^2}{c} P(\mathbf{r}) \mathbf{s},$$

где  $N$  — плотность потока энергии солнечного излучения, равная на орбите Земли  $1.3533 \cdot 10^6 \text{ эрг/см}^2 \text{ с}$ ;  $Q_{pr}$  — эффективность давления света на ТЧ радиусом  $R_d$ , усредненная по солнечному спектру.

В последней формуле

$$P(\mathbf{r}) =$$

$$= \begin{cases} 0, & \text{при } \begin{cases} x \cos \lambda_s + \sin \lambda_s (y \cos \varepsilon + z \sin \varepsilon) < 0, \\ [-x \sin \lambda_s + \cos \lambda_s (y \cos \varepsilon + z \sin \varepsilon)]^2 + \\ + (-y \sin \varepsilon + z \cos \varepsilon)^2 < R_d^2 \end{cases} \\ 1, & \text{в противоположном случае} \end{cases}$$

— т.н. функция “тени”, равная нулю в области земной тени и единице вне этой области;  $\mathbf{s} = -\cos \lambda_s \mathbf{e}_x^{GEL} - \cos \varepsilon \sin \lambda_s \mathbf{e}_y^{GEL} - \sin \varepsilon \sin \lambda_s \mathbf{e}_z^{GEL}$  — единичный вектор, направленный от Солнца к Земле,  $\varepsilon$  — угол между плоскостями земного экватора и эклиптики,  $\lambda_s$  — эклиптическая долгота Солнца. Для значений радиуса частицы  $R_d < 1 \text{ мкм}$ , соизмеримых с длиной волн в максимуме спектра солнечного излучения  $\lambda_{\max} = 0.55 \text{ мкм}$  или меньших  $\lambda_{\max}$ , корректное задание эффективности давления излучения  $Q_{pr}$  представляет собой самостоятельную и достаточно сложную задачу. В конкретных случаях для расчета значений  $Q_{pr}$  нами использовался описанный в [20] метод, основанный на численном суммировании рядов, которыми представляется формальное точное решение задачи о поглощении и рассеянии света однородной сферической частицей.

Наконец, сила сопротивления  $\mathbf{F}_{drag}$ , возникающая при обтекании движущейся частицы потоком фонового газа, в общем случае представляет собой сумму сил сопротивления  $\mathbf{F}_{drag}^n$  и  $\mathbf{F}_{drag}^{pl}$ , обу-

словленных соответственно взаимодействием ТЧ с нейтральной и заряженной (плазменной) компонентами газа верхней атмосферы. Однако, как показывают оценки [21], в практически интересных случаях возмущающий эффект силы плазменного сопротивления  $\mathbf{F}_{drag}^{pl}$  является пренебрежимо малым и полную силу сопротивления  $\mathbf{F}_{drag}$  можно отождествлять с силой сопротивления нейтральной компоненты фонового газа, которая для сферической ТЧ определяется формулой:

$$\mathbf{F}_{drag} = -C_x \frac{\pi R_d^2}{2} \rho_a v^2 \mathbf{v},$$

где  $\rho_a$  – плотность газа верхней атмосферы, а  $C_x$  – коэффициент сопротивления, значение которого в расчетах полагалось равным 2, что соответствует модели абсолютно неупругого взаимодействия молекул воздуха с поверхностью ТЧ. При численном моделировании движения ТЧ в ОКП для задания плотности атмосферы в точке нахождения частицы используется кусочно-экспоненциальная аппроксимация высотного хода плотности верхней атмосферы, усредненного по суточным и сезонно-широтным вариациям для трех уровней солнечной и геомагнитной активности: низкой, средней и высокой, основанная на данных модели NRLMSISE-00 [22].

Для учета эффекта изменения электрического заряда ТЧ в процессе ее орбитального движения в ОКП уравнение движения (1) решается совместно с уравнением зарядки ТЧ:

$$\frac{dq}{dt} = \sum_i J_i = J_{tot}, \quad (2)$$

где  $J_{tot}$  – полный заряжающий ток, а  $J_i$  – заряжающие токи, соответствующие возможным механизмам зарядки ТЧ в космической среде. В качестве возможных механизмов зарядки рассматривались: зарядка ТЧ падающими на ее поверхность плазменными электронами и ионами тепловых энергий; зарядка заряженными частицами корпускулярных потоков; вторичная электронная эмиссия при соударениях электронов и ионов с поверхностью ТЧ; обратное рассеяние электронов; фотоэлектронная эмиссия; автоэлектронная эмиссия (для металлических ТЧ при низких отрицательных потенциалах).

Вследствие малости радиуса рассматриваемых субмикронных частиц по сравнению с дебаевским радиусом фоновой плазмы, плазменной экранировкой поля частицы на расстояниях  $\sim R_d$  пренебрегалось, и ее емкостная характеристика считалась равной вакуумной:  $C = R_d$ . В этом случае связь между зарядом частицы  $q$  и ее поверхностным потенциалом  $\Phi$  задается простым соотношением  $q = R_d \Phi$ . Для определения зависимо-

стей от потенциала  $\Phi$  токов зарядки  $J_i = J_i(\Phi)$  использовались выражения, приведенные в работах [5, 23–29]. С учетом вышеизложенного, уравнение зарядки (2) может быть рассмотрено как уравнение, описывающее временную эволюцию поверхностного потенциала ТЧ.

Заряжающие токи, обусловленные потоком на ТЧ заряженных частиц из плазмы, определяются локальными значениями плотности и температуры электронов и ионов фоновой плазмы, меняющимися в процессе орбитального движения ТЧ в ОКП. Таким образом, при численном моделировании движения частицы в ОКП, основанном на совместном решении уравнения движения (1) и уравнения зарядки (2), для задания правой части уравнения зарядки в процедуру численного интегрирования указанных уравнений должны быть заложены модели основных структурных областей плазменной оболочки Земли.

Для определения токов из плазмы при нахождении ТЧ в ионосфере используется модель ионосферы IRI-2016 [30], а при движении в плазмосфере – аналитическая модель плазмосферы, основанная на данных работ [31, 32]. Токи из плазмы при движении ТЧ в плазменном слое определяются с использованием параметров плазмы в плазменном слое, приведенных в работе [33]. При выходе ТЧ за пределы земной магнитосферы для определения плазменных токов используются параметры плазмы солнечного ветра, взятые из работы [5].

Для обеспечения возможности численного моделирования движения ТЧ в околоземном пространстве на больших временах с момента ее инжекции в ОКП, в программе учитывается эффект годичного движения Солнца в используемой геоцентрической экваториальной системе отсчета.

Разработанная динамическая модель реализована в расчетной программе, обеспечивающей численное моделирование движения в ОКП нано- и микрочастиц из оксида алюминия, алюминия и углерода на основе численного интегрирования уравнений (1) и (2), записанных в виде системы из семи обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с процедурно заданными правыми частями. Существенная особенность этой программы связана с тем обстоятельством, что используемая в работе аналитическая аппроксимация геомагнитного поля суммой заданного числа сферических гармоник ряда Гаусса зависит от сферических координат в гринвичской системе отсчета. Поэтому для определения магнитного поля в точке местонахождения ТЧ, задаваемой координатами в равноденственной системе отсчета, на каждом шаге процедуры численного интегрирования уравнений движения устанавливается соответствие между координатами ТЧ в равноденственной и гринвичской системах отсчета.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. УСЛОВИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ОРБИТАЛЬНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ, ИНЖЕКТИРУЕМЫХ В ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

С использованием описанной выше программы численного моделирования движения техногенных частиц в околоземном космическом пространстве, была проведена серия численных экспериментов, направленных на определение условий длительного орбитального существования сферических техногенных частиц из оксида алюминия с радиусами от 4 нм до 100 мкм. В качестве критериев прекращения орбитального существования ТЧ принималось снижение ТЧ до высоты 100 км над поверхностью Земли или достижение ТЧ высоты 925000 км (граница сферы действия земного притяжения).

Расчеты времен орбитального существования ТЧ были проведены для 4-х положений точки инъекции на геостационарной орбите с азимутами, отсчитываемыми от направления на точку весеннего равноденствия, равными 0°, 90°, 180° и 270°. Предполагалось, что инъекция производится в момент 12.00 UT 18.V.1996 в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности.

Полученные в результате численных экспериментов зависимости времен орбитального существования  $T_{орб}$  от радиуса ТЧ для 4-х указанных положений точки инъекции ТЧ на геостационарной орбите, представлены на рис. 1.

Как видно из данных рис. 1, в проведенной серии численных экспериментов большие времена орбитального существования ( $T_{орб} > 1$  месяц) имели как субмикронные ТЧ с определенными значениями радиуса в промежутке от 0.01 до 0.1 мкм, так и ТЧ с радиусами большими примерно 1 мкм. При этом для значений радиуса ТЧ в промежутке от 0.01 до 0.1 мкм максимальное время орбитального существования, равное 55 сут, имела частица радиусом 17 нм, инжектируемая в точке с азимутом 270°. Анализ полученных расчетных данных показывает, что долгоживущие частицы с радиусами в промежутке от 0.01 до 0.1 мкм движутся в ОКП в т.н. кеплеровском режиме движения. Возможность реализации указанного режима длительного орбитального существования ТЧ была впервые показана нами в работе [7]. Как показывают оценки, в кеплеровском режиме основной силой, действующей на ТЧ, является сила, действующая со стороны центрального гравитационного поля Земли, а основной силой, возмущающей движение ТЧ по кеплеровской эллиптической орбите в центральном гравитационном поле, — магнитная составляющая силы Лоренца, действующая на наводимый на ТЧ заряд со стороны магнитного поля Земли. При этом воздей-

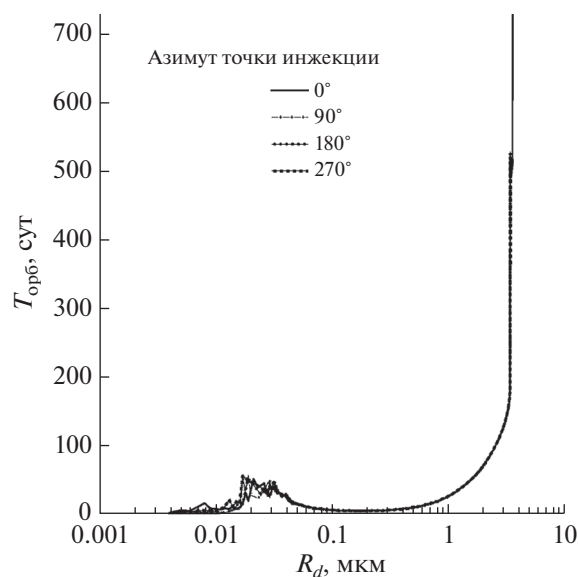
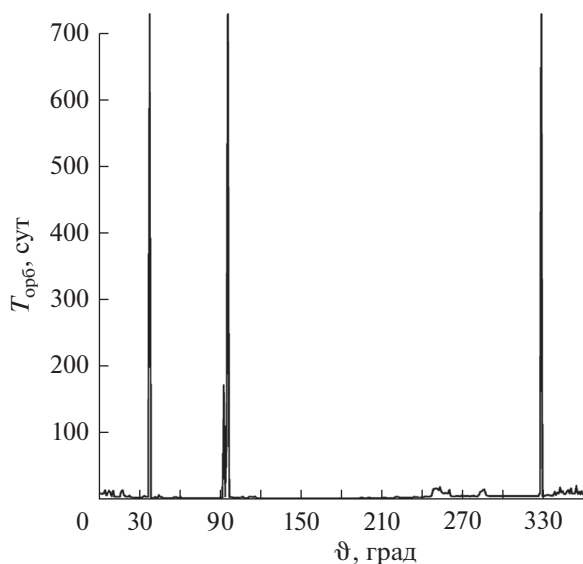


Рис. 1. Зависимости времени орбитального существования ТЧ  $T_{орб}$  от ее радиуса  $R_d$  для четырех значений азимута точки инъекции ТЧ на ГСО.

ствие силы Лоренца приводит к двум основным возмущениям орбиты ТЧ: прецессии орбиты вокруг магнитной оси и вращению орбиты в собственной плоскости в направлении, совпадающем с направлением орбитального движения. Кроме того, имеют место квазипериодические колебания высот перигея и апогея орбиты с периодом близким ко времени полного оборота орбиты вокруг магнитной оси в результате прецессии, а также — вековое изменение среднего значения большой полуоси орбиты.

Итак, полученные результаты указывают на принципиальную возможность длительного орбитального существования субмикронных ТЧ с радиусами в промежутке от 0.01 до 0.1 мкм, инжектируемых в ОКП на геостационарной орбите.

Кроме того, для выяснения принципиальной возможности длительного орбитального существования сверхмелких ТЧ с радиусами от 0.004 до 0.01 мкм (от 4 до 10 нм) были проведены численные эксперименты по моделированию движения в ОКП сверхмелких ТЧ с определенными значениями радиуса в указанном промежутке, инжектируемых в ОКП в близко расположенных точках ГСО с различными значениями азимута. На рис. 2 представлена полученная в результате численных экспериментов зависимость времени орбитального существования ТЧ радиусом 8 нм от азимута точки инъекции ТЧ на ГСО. Как видно из данных рис. 2, ТЧ радиусом 8 нм, инжектированные в ОКП в малых окрестностях точек ГСО с азимутами 38°, 96° и 328°, будут иметь времена орбитального существования большие 2-х лет (!). Анализ полученных расчетных данных показывает,



**Рис. 2.** Зависимость времени орбитального существования сверхмелкой ТЧ радиусом 8 нм от азимута  $\vartheta$  точки ее инжекции на ГСО.

что в случае инжекции ТЧ радиусом 8 нм в окрестностях точек с указанными значениями азимута, частица движется в ОКП в режиме магнитно-гравитационного захвата. Впервые принципиальная возможность реализации указанного режима движения в ОКП сверхмелких ТЧ с радиусом порядка единиц нанометра была показана нами в работе [34], посвященной исследованию особенностей динамики в плазмосфере Земли ТЧ с низким выходом фотоэмиссии в дипольной модели геомагнитного поля. Явления магнитно-гравитационного захвата (МГЗ) возникают в дрейфовом режиме движения наночастицы, когда основное движение ТЧ является близким к вращению по окружности ларморовского радиуса (под действием магнитной составляющей силы Лоренца), центр которой (т.н. ведущий центр (ВЦ)) движется в ОКП по соответствующей пространственной траектории. В использованной в [34] дипольной модели геомагнитного поля движение ведущего центра представляет собой суперпозицию движения по фиксированной силовой линии дипольного магнитного поля в т.н. ведущей плоскости, проходящей через ВЦ и магнитную ось, и азимутального “дрейфа” ВЦ вследствие эффектов неоднородности магнитного поля, изменения электрического заряда ТЧ вдоль траектории ее движения в ОКП, а также в результате возмущающего воздействием сил немагнитной природы (гравитационной силы, силы солнечного давления и электрической составляющей силы Лоренца). Вследствие адиабатической инвариантности эквивалентного магнитного момента ТЧ, имеющей место в условиях слабой неоднородности магнитного поля, уравнение движения ведущего центра ТЧ по магнитной силовой линии в ведущей плоско-

сти является аналогичным уравнению одномерного движения материальной точки в эффективном потенциальном поле. Анализ показывает, что эффект “захвата” ТЧ магнитно-гравитационной ловушкой Земли возникает в условиях, когда вклад гравитационного потенциала Земли в потенциал эффективного поля, описывающего движение ведущего центра ТЧ по магнитной силовой линии в ведущей плоскости, приводит к появлению двух локальных минимумов потенциала эффективного поля в северном и южном полушариях. При этом становится возможным режим движения, в котором ведущий центр ТЧ совершает колебания по отрезку силовой линии в северном или южном полушарии в соответствующей потенциальной яме, одновременно дрейфуя по азимуту вследствие отмеченных выше эффектов неоднородности магнитного поля, изменения электрического заряда ТЧ вдоль траектории ее движения в ОКП, и др. Пространственная траектория ТЧ в этом случае замечает тор, расположенный в северном или южном полушарии с осью, совпадающей с магнитной осью Земли.

Как следует из данных рис. 1, большие времена орбитального существования ( $T_{\text{орб}} > 1$  месяц) могут иметь как мелкие ТЧ с радиусами  $< 0.1$  мкм, так и частицы, радиусы которых превышают пороговое значение близкое к 1.1 мкм. Времена орбитального существования ТЧ с радиусами большими указанного порогового значения практически не зависят от начального положения точки инжекции ТЧ на геостационарной орбите и растут с увеличением радиуса ТЧ. Так, при  $R_d = 2$  мкм,  $T_{\text{орб}} = 71$  сут; для  $R_d = 3$  мкм,  $T_{\text{орб}} = 131$  сут.

Дальнейшее увеличение радиуса ТЧ приводит к очень быстрому росту времени ее орбитального существования: при  $R_d = 3.4$  мкм,  $T_{\text{орб}} = 495$  сут, а для  $R_d = 3.52$  мкм,  $T_{\text{орб}} > 2$  лет (!). Заметим, что проведенные нами в [3] расчеты времен жизни техногенных микрочастиц, инжектируемых в ОКП на геостационарной орбите, с использованием существенно более простой динамической модели (не учитывающей наличие наклона плоскости геостационарной орбиты к плоскости эклиптики и эффект годичного движения Солнца) приводят к существенно меньшим значениям времен орбитального существования техногенных частиц. Таким образом, из полученных расчетов следует, что отделяющиеся от геостационарного космического аппарата (или крупного объекта “космического” мусора на близкой к ГСО орбите “захоронения”) техногенные микрочастицы с радиусами порядка 1–100 мкм, могут годами удерживаться в околоземном космическом пространстве, являясь, таким образом, важным фактором антропогенного загрязнения ближнего космоса.

## ВЫВОДЫ

1. На основе результатов численных экспериментов доказана принципиальная возможность длительного орбитального существования техногенных микрочастиц, отделяющихся от поверхности материнского тела, движущегося по геостационарной орбите или близкой к ней орбите “захоронения”. В качестве техногенных микрочастиц рассмотрены сферические частицы из оксида алюминия. Показано, что в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности большие времена орбитального существования ( $T_{\text{орб}} > 1$  месяц) имеют частицы, радиусы которых превышают пороговое значение близкое к 1.1 мкм. Времена орбитального существования ТЧ с радиусами большими указанного порогового значения практически не зависят от начального положения точки инъекции ТЧ на геостационарной орбите и растут с увеличением радиуса ТЧ. Так, при  $R_d = 2$  мкм,  $T_{\text{орб}} = 71$  сут; для  $R_d = 3$  мкм,  $T_{\text{орб}} = 131$  сут. Дальнейшее увеличение радиуса ТЧ приводит к очень быстрому росту времени ее орбитального существования: при  $R_d = 3.4$  мкм,  $T_{\text{орб}} = 495$  сут, а для  $R_d = 3.52$  мкм,  $T_{\text{орб}} > 2$  лет (!).

2. На основе результатов численных экспериментов показана принципиальная возможность длительного орбитального существования субмикронных ТЧ (с  $T_{\text{орб}} > 1$  месяц) с радиусами  $0.01 < R_d < 0.1$  мкм, инжектируемых в ОКП на геостационарной орбите. Расчеты времен орбитального существования ТЧ были проведены для 4-х положений точки инъекции на геостационарной орбите с азимутами, отсчитываемыми от направления на точку весеннего равноденствия, равными  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ . Предполагалось, что инъекция производится в момент 12.00 UT 18.V.1996 в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности. Как показали результаты численных экспериментов, в этом случае максимальное время орбитального существования, равное 55 суткам, имеет частица с радиусом 17 нм, инжектируемая в точке ГСО с азимутом  $270^\circ$ . Анализ полученных расчетных данных показывает, что долгоживущие частицы с радиусами в промежутке от 0.01 до 0.1 мкм движутся в ОКП в т. н. кеплеровском режиме.

Показана возможность реализации режимов сверхдлительного орбитального существования сверхмелких ТЧ с радиусами  $< 0.01$  мкм ( $< 10$  нм), инжектируемых в ОКП на геостационарной орбите. В частности, показано, что ТЧ радиусом 8 нм, инжектированные в ОКП в малых окрестностях точек ГСО с азимутами  $38^\circ$ ,  $96^\circ$  и  $328^\circ$ , будут иметь экстремально большие времена орбитального существования (более 2-х лет (!)). Анализ полученных расчетных данных показывает,

что в указанных случаях ТЧ движется в ОКП в т.н. режиме магнитно-гравитационного захвата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klinkrad H., Wegener P., Wiedemann C. et al. Modeling of the Current Space Debris Environment / Ed. Klinkrad H. // Space Debris. 2006. P. 59–114.
2. Колесников Е.К., Чернов С.В. О времени существования микрочастиц на низких круговых околоземных орбитах // Космич. исслед. 1997. Т. 35. № 2. С. 221–222. (Cosmic Research. P. 206–207).
3. Колесников Е.К., Чернов С.В., Яковлев А.Б. О времени существования микрочастиц на геостационарной орбите // Космич. исслед. 1999. Т. 37. № 4. С. 446–448. (Cosmic Research. P. 422–424).
4. Колесников Е.К., Чернов С.В. О размерах долгоживущих частиц техногенного астрозоля в верхней атмосфере и ближнем космосе // Избранные труды Международной научной конференции по механике “Шестые Поляховские чтения”. СПб. 2012. С. 116–119.
5. Horanyi M., Houppis H.L.F., Mendis D.A. Charged Dust in the Earth’s Magnetosphere // Astrophysics and Space Science. 1988. V. 144. P. 215–229.
6. Мерзляков Е.Г. О движении субмикронных частиц на низких околоземных орбитах // Космич. исслед. 1996. Т. 34. № 5. С. 558–560. (Cosmic Research. P. 518–520).
7. Колесников Е.К. Особенности орбитального движения субмикронных частиц в плазмосфере Земли // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 1. С. 100–105. (Cosmic Research. P. 92–97).
8. Колесников Е.К., Чернов С.В. О размерах микрочастиц, захватываемых магнитным полем Земли, при различных уровнях геомагнитной активности // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 5. С. 558–560. (Cosmic Research. P. 526–527).
9. Yakovlev A.B., Kolesnikov E.K., Chernov S.V. Analytical research of the possibility of long orbital existence of submicron particles in the Earth’s plasmasphere by the methods of the KAM theory // J. Plasma Physics. 2017. V. 83. P. 905830306. <https://doi.org/10.1017/S0022377817000447>
10. Yakovlev A.B., Kolesnikov E.K., Chernov S.V. The restrictions on the assumption about conservations of parameters of orbit for submicron particles in the Earth’s plasmasphere in light of the corotational electric field // J. Plasma Physics. 2018. V. 84. P. 905840613. <https://doi.org/10.1017/S0022377818001241>
11. Yakovlev A.B., Kolesnikov E.K., Chernov S.V. Investigation of the influence of the field of co-rotation on the possibility of the long-term orbital existence of submicron particles in the plasma-sphere of the Earth // Physics & Astronomy International J. 2018. V. 2. № 1. P. 48–53. <http://medcraveonline.com/PAIJ/PAIJ-02-00047.pdf>
12. Бондаренко Е.Б., Аверьянов П.В., Зайцев С.Э. Развитие имитационного стенда разработки и верификации бортового программного обеспечения в части навигации космических аппаратов. Доклад на

- 43-х академических Королевских чтениях по космонавтике, 2019.
13. *Green B.D. et al.* Optical environment surrounding the MSX spacecraft. In Proceedings of the 7th International Symposium on Materials in Space Environment. Toulouse, France. 1997. P. 153–160.
  14. *Баранов В.М., Поликарпов Н.А., Новикова Н.Д. и др.* Основные результаты эксперимента “Биориск” на Международной космической станции // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2006. Т. 40. № 3. С. 3–9.
  15. *Цыганков О.С., Гребенникова Т.В., Дешевая Е.А. и др.* Исследования мелкодисперсной среды на внешней поверхности Международной космической станции в эксперименте “Тест”: обнаружены жизнеспособные микробиологические объекты // Космическая техника и технологии. 2015. Т. 8. № 1. С. 31–41.
  16. *Евтушенко Ю.Г., Крылов И.А., Мержанова Р.Ф. и др.* Движение искусственных спутников в гравитационном поле Земли. Математические методы в динамике космических аппаратов. М.: ВЦ АН СССР, 1967.
  17. *Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г.* Космическая электродинамика. М.: Мир, 1967.
  18. *Th’ebault E. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. № 1. P. 1–19.
  19. *Hargood M.A.* Space physics coordinate transformations: a user guide // Planetary and Space Science. 1992. V. 40. № 5. P. 711–717.
  20. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
  21. *Колесников Е.К.* Динамические модели процессов распространения потоков заряженных частиц в космической плазме: Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 1998.
  22. *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P. et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. № A12. P. SIA 15-1-SIA 15-16.
  23. *Kanal M.* Theory of current collection of moving spherical probes. Sci. Rep. JS-5. Space Physics Research Laboratory. University of Michigan. Ann Arbor. 1962.
  24. *Whipple E.C.* Potentials of surfaces in space // Reports on progress in physics. 1981. V. 44. P. 1197–1250.
  25. *Katz I., Parcs D.E., Mandell M.J. et al.* A three dimensional dynamic study of electrostatic charging in materials. Report NASA. (CR-135256). 1977.
  26. *Draine B.T., Salpeter E.E.* On the Physics of Dust Grains in Hot Gas // Astrophysical J. 1979. V. 231. P. 77–94.
  27. *Prokopenko S.M.L., Laframboise J.G.* High-Voltage Differential Charging of Geostationary Spacecraft // J. Geophysical Research. 1980. V. 85. № A8. P. 4125–4131.
  28. *Grard R.J.L.* Properties of the Satellite Photoelectron Sheath Derived from Photoemission Laboratory Measurements // J. Geophysical Research. 1973. V. 78. № 16. P. 2885–2906.
  29. *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958.
  30. *Bilitza D., Altadill D., Truhlik V. et al.* International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. V. 15. P. 418–429.
  31. *Hill J.R., Whipple E.C.* Charging of Large Structures in Space with Application to the Solar Sail Spacecraft // J. Spacecraft Rockets. 1985. V. 22. № 3. P. 245–253.
  32. *Lyons L.R., Williams D.J.* Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publ. Co., 1987.
  33. *Garrett H.B., DeForest S.E.* Time-Varying Photoelectron Flux Effects on Spacecraft Potential at Geosynchronous Orbit // J. Geophysical Research. 1979. V. 84. № A5. P. 2083–2088.
  34. *Колесников Е.К., Чернов С.В.* О возможности длительного орбитального существования в плазмосфере Земли наночастиц из материала с низким выходом фотоэмиссии // Космич. исслед. 2015. Т. 53. № 5. С. 388–394. (Cosmic Research. P. 354–359).