

УДК 523.64

НЕГРАВИТАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ВЫБРОСА КОМЕТ ИЗ ОБЛАКА ООРТА ЗА СЧЕТ КОМЕТНЫХ ВСПЫШЕК

© 2023 г. Д. В. Белоусов^{а, *}, А. К. Павлов^{а, **}

^аФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dom.999.bel@gmail.com

**e-mail: anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 19.04.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Кометные ядра в облаке Оорта накапливают большие концентрации радикалов в поверхностных слоях при облучении космическими лучами при низких температурах. Индуцированная рекомбинация радикалов при нагреве поверхности кометы за счет прохода близкой звезды, звезды О и В класса, а также вспышек близких сверхновых приводят к нагреву слоя льда с высвобождением летучих газов из аморфного льда. При накоплении газа, оказывающего большое давление под поверхностью кометы, происходит выброс газа и пыли в виде струи, способный менять орбиту кометы в облаке Оорта. Рассматриваемый негравитационный механизм может эффективно выбрасывать кометы с радиусами ≤ 1 км из облака Оорта во внутреннюю часть Солнечной системы. Общий эффект воздействия вспышек на стабильность орбит комет за время эволюции облака Оорта мог привести к уменьшению числа долгопериодических комет малого радиуса.

Ключевые слова: кометы, облако Оорта, кометные вспышки, космические лучи, вспышки сверхновых

DOI: 10.31857/S0320930X23060026, **EDN:** DBAROC

ВВЕДЕНИЕ

Кометные ядра в облаке Оорта, источнике долгопериодических комет, подвержены постоянному облучению галактическими космическими лучами (ГКЛ) при температурах ~ 10 К. Первичными продуктами воздействия ионизирующего потока частиц на материал поверхности кометного ядра является образование ионов и радикалов. С уменьшением температуры скорость рекомбинации радикалов падает и имеет место эффективное накопление радикалов. Рекомбинация большой концентрации радикалов сопровождается значительным энерговыделением в облученном материале и выбросом новообразованных летучих компонент (Moore и др., 1983). Экспериментальные результаты показали высокую эффективность накопления радикалов во льду, облученного протонами, электронами и нейтронами при низких температурах (10–100 К) (Moore и др., 1983; Carpenter, 1987; Shabalin и др., 2003; Zhu и др., 2021; Pavlov и др., 2022). Выделение энергии происходит как при внешнем нагреве облученного льда, так и спонтанно при достижении критической концентрации радикалов. Подъем температуры на несколько градусов за счет внешнего нагрева при высокой концентрации радикалов запускает цепную реакцию реком-

бинации. В результате рекомбинация радикалов создает большой импульс энерговыделения при низких температурах, что может быть причиной кометных вспышек на далеких расстояниях от Солнца (Pavlov и др., 2022; Belousov и др., 2022).

Обнаружение большого числа долгопериодических комет с почти параболическими орбитами поставило вопрос об устойчивости их орбит и механизмах выброса комет из облака Оорта во внутреннюю часть Солнечной системы. Все ранее предложенные механизмы являются гравитационными: воздействие проходящей звезды, приливное воздействие галактического диска и столкновение с молекулярным облаком (Fernandez, 2000). Несмотря на большую удаленность от Солнца, кометы в облаке Оорта подвергаются периодическому нагреву за счет прохождения звезд классов О и В и вспышек сверхновых (Stern, Shull, 1988). Учитывая процесс накопления радикалов в поверхностном слое кометы при воздействии ГКЛ, внешний нагрев может спровоцировать распространение фронта рекомбинации радикалов с локальным разогревом кометного льда и выбросом газа и пыли. Из-за низких орбитальных скоростей комет в облаке Оорта ~ 200 м/с, импульс отдачи при вылете струи газа может привести к значительному изменению параметров орбит

комет. Аналогичный негравитационный механизм пертурбации кометных орбит наблюдается на близких расстояниях от Солнца, где имеет место активная сублимация водяного льда (Marsden и др., 1973). Учитывая, что орбитальная скорость кометы зависит от гелиоцентрического расстояния r как $\propto r^{-1/2}$, в облаке Оорта эффективность рассматриваемого негравитационного механизма может быть на несколько порядков выше, чем во внутренней части Солнечной системы.

В данной работе впервые предлагается негравитационный механизм изменения орбит комет в облаке Оорта за счет вылета струи газа и пыли, вызванной рекомбинацией свободных радикалов в поверхностных слоях кометного ядра.

МОДЕЛЬ

В процессе облучения быстрая рекомбинация накопленных радикалов может происходить двумя способами: спонтанно и индуцировано. Индуцированная реакция рекомбинации происходит при внешнем нагреве слоя льда с радикалами. Спонтанная рекомбинация в макрообъеме может происходить при достижении критической плотности радикалов n_{cr} (Shabalin и др., 2003). Как показано в (Hudson, Moore, 1992), для наиболее подвижных при низких температурах Н-радикалов $n_{cr} \approx 1\%$ (относительно числа молекул воды) при температурах 5–10 К и облучении протонами с энергиями 1 МэВ. В нашей работе мы рассматриваем только индуцированную рекомбинацию с концентрациями радикалов близкой к n_{cr} . В работе (Gronoff и др., 2020) был получен профиль поглощенной дозы в комете при облучении потоком ГКЛ со спектром LIS (Local Interstellar Spectrum). Используя значения скорости накопления дозы из работы (Gronoff и др., 2020) I и выхода радикалов Y из работы (Johnson, Quickenden, 1997; Siegel и др., 1961), можно оценить время накопления критической концентрации радикалов: $t_{cr} = n_{cr}/YI$. В результате, на одном метре под поверхностью кометы время накопления $t_{cr} \approx 60$ млн лет, тогда как на 10 м $t_{cr} \approx 600$ млн лет.

Значительный нагрев поверхности комет на расстояниях $\sim 10^4$ – 10^5 а. е. могут вызвать проходящие звезды и вспышки близких сверхновых. В работе (Stern, Shull, 1988) показано, что прохождение звезды высокой светимости (классов О и В) вблизи облака Оорта за время эволюции Солнечной системы ≈ 4.5 млрд лет привело по крайней мере к одному эпизоду роста температуры до 16 К у каждого кометного ядра. Также до температуры 22 и 34 К могли нагреться 50 и 10% комет в облаке Оорта, соответственно. Близкие сверхновые приводят к нагреву поверхностных слоев комет до 30 К во всем облаке Оорта с периодом ≈ 180 млн лет.

Во внутренней части Солнечной системы вылет газа и пыли с поверхности кометы приводит к наблюдаемому росту светимости кометы. Резкий рост светимости кометы в течение нескольких часов или суток называется кометной вспышкой (Gronkowski, 2007). В контексте данной работы наибольший интерес представляют наблюдаемые вспышки на больших гелиоцентрических расстояниях ≥ 3 а. е., где не эффективна сублимация водяного льда. Современные механизмы вспышек комет на далеких расстояниях основываются на процессе перехода аморфной фазы льда в кристаллическую. Считается, что кометы формировались на расстояниях от Солнца, где преобладает аморфная фаза льда с включением различных газов (CO , CO_2). Вылет захваченных газов из аморфного льда происходит только при достижении температуры ≈ 140 К (Bar-Nun и др., 1985). Таким образом, нагрев от вспышки сверхновой в облаке Оорта не может привести к высвобождению газа из аморфного льда. С другой стороны, быстрая рекомбинация радикалов может протекать при намного меньших температурах, чем переход аморфного льда в кристаллический (Pavlov и др., 2022). При рекомбинации радикалов в водяном льду выделяется энергия ≈ 120 и ≈ 60 Дж/г для Н и ОН, соответственно. В результате рекомбинация в поверхностном слое приводит к значительному разогреву слоя льда (до 180 К). При достижении температуры ≈ 140 К в слое становится эффективным процесс перехода аморфного льда в кристаллический. Дальнейшее распространение газа до поверхности кометы определяется структурой кометного ядра. В настоящее время структура долгопериодических комет не известна и является предметом исследований будущих космических миссий (Fulle и др., 2022). Здесь же мы примем, что внутренние свойства комет в облаке Оорта в первом приближении схожи со свойствами наблюдаемых комет на близких расстояниях от Солнца. В дальнейшем мы будем использовать термин “кометная вспышка” для обозначения резкого выброса газа и пыли с поверхности комет в облаке Оорта.

Здесь мы используем модель вспышки кометы, которая основывается на эффекте накопления газа с высоким давлением под поверхностью кометы: выброс газа вместе с пылевыми частицами происходит при достижении давления газа, превышающего прочность материала границ полости (Reach и др., 2010). Такой механизм вспышки применялся для исследования комет 67P/Churyumov–Gerasimenko (67P) (Prialnik, Sierks, 2017), 29P/Schwassmann–Wachmann (Gronkowski, Wesolowski, 2015) и 17P/Holmes (Reach и др., 2010). Одним из главных параметров в данном механизме кометной вспышки является масса аморфного льда, подверженного фазовому переходу, из которого вылетают захваченные газы. Основными

компонентами газа при вспышках комет на больших гелиоцентрических расстояниях являются CO и CO₂ (Meech и др., 2017).

В работе (Reach и др., 2010) была получена оценка размеров области поверхности кометы (на примере кометы 17P/Holmes), подверженной вспышке: 10⁻²–1 км². На комете 67P были обнаружены круглые глубокие впадины (ямы) диаметром до 200 м (Vincent и др., 2015). Такие ямы на поверхности 67P могли быть результатом разрушения полостей с большим давлением газа при локальной вспышке (Vincent и др., 2015). Здесь мы примем, что площадь под поверхностью кометы в облаке Оорта, где достигается большое давление газов, соответствует размеру впадин на наблюдаемых кометах. Толщина слоя кометы, где происходит переход аморфного льда в кристаллический, определяется концентрацией радикалов. Поскольку верхний 10-метровый слой кометного ядра подвержен наибольшему облучению потоком ГКЛ (Gronoff и др., 2020), толщина слоя кометы с высоким содержанием радикалов ≈ 10 м. В результате объем области кометного ядра, подверженной вспышке, лежит в интервале 10⁵–10⁷ м³. С учетом средней плотности кометных ядер ≈ 600 кг/м³, масса выброса при кометной вспышке составляет 10⁸–10¹⁰ кг, если принять, что все вещество в полости с высоким давлением газа выносится с поверхности кометы при вспышке. Общая энергия перехода аморфного льда в кристаллический (≈ 0.9 × 10⁵ Дж/кг) и рекомбинации радикалов в водяном льду (H и OH) составляет ≈ 2.7 × 10⁵ Дж/кг. В результате энергию вспышки в облаке Оорта можно оценить равной 10¹³–10¹⁵ Дж. Полученное значение попадает в диапазон энергий наблюдаемых кометных вспышек (Gronkowski, 2007).

В данной работе мы ограничимся сравнением эффективности исследуемого негравитационного механизма изменения орбит комет за счет кометных вспышек и известных гравитационных механизмов. Для этого вначале определим величину изменения орбитальной скорости кометного ядра при вылете струи пыли и газа. Метод расчета последующего изменения параметров орбит комет за счет кометных вспышек ничем не отличается от случая гравитационного импульсного воздействия. В нашем рассмотрении применяются формулы расчета изменения популяции комет в облаке Оорта и соответствующая терминология из классических работ (Hills, 1981; Fernandez, 2000).

Величина импульса отдачи при вспышке

Струя газа и пыли создает негравитационное ускорение (\mathbf{a}_{NG}), которое выражается через параметры выброса:

$$\mathbf{a}_{NG} = Q_g m_g \mathbf{v}_g / M_c, \quad (1)$$

где \mathbf{v}_g – средняя скорость молекул газа с массой m_g , M_c – масса кометы и Q_g – количество молекул газа, вылетающих с поверхности в единицу времени. Поскольку вспышка происходит за короткое время относительно орбитального периода кометы, общее изменение скорости кометы ($\Delta \mathbf{V}$) можно получить, проинтегрировав уравнение (1) по времени:

$$\Delta \mathbf{V} = \frac{\Delta M}{M_c} \mathbf{v}_g, \quad (2)$$

где ΔM – общая масса выброшенного вещества при вспышке. Частицы пыли увлекаются потоком газа и также выносятся со скоростью газа. Здесь мы считаем, что скорость выброса при вспышке равна средней скорости молекул газа, вылетающих через отверстие в коре (Huebner и др., 2006):

$$v_g = \frac{3\pi}{8} \left(\frac{8kT}{\pi m_g} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Примем температуру газа равной температуре перехода аморфного льда в кристаллический. С учетом полученной выше оценки ΔM и уравнений (2) и (3) амплитуда изменения орбитальной скорости кометы с радиусом 1 км во время вспышки $\Delta V \approx 0.02$ –2 м/с. Важно указать, что ядра комет с радиусом меньше ста метров при вспышке могут быть разрушены. Вероятность такого процесса будет зависеть от прочности материала кометы и амплитуды вспышки. Так как в данной работе нас интересует стабильность орбит комет, мы ограничимся рассмотрением комет с радиусами > 100 м.

Конус потерь

Гравитационные воздействия звезд и галактического диска за время эволюции облака Оорта приводят к изотропному распределению скоростей комет (Hills, 1981). При этом существует так называемый “конус потерь” в пространстве скоростей, в котором орбиты комет проходят через внутреннюю часть Солнечной системы, где под воздействием планет-гигантов кометы могут быть переведены на гиперболические орбиты. В результате кометы в конусе потерь могут потенциально уходить из облака Оорта как вовнутрь Солнечной системы, так и в межзвездную среду (Hills, 1981). Заполнение конуса потерь происходит при хаотизации орбит комет при внешнем воздействии. Здесь мы исследуем влияние рассматриваемого негравитационного механизма на эффективность заполнения конуса потерь в облаке Оорта.

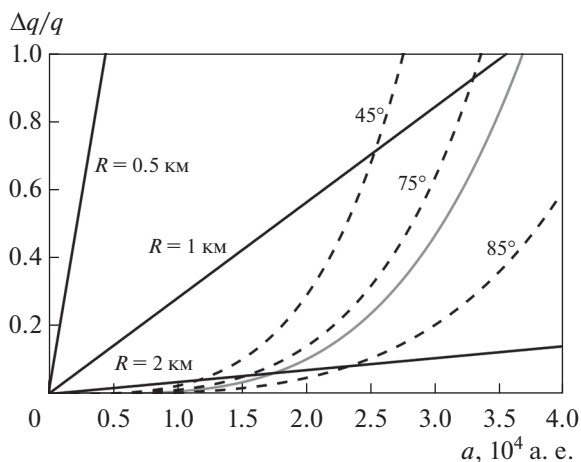


Рис. 1. Относительное изменение перигелия орбиты кометы в облаке Оорта в зависимости от значения большой полуоси a .

Любые воздействия наиболее эффективно меняют перигелийное расстояние кометы q на больших расстояниях от Солнца. Изменение азимутальной составляющей скорости кометы v_T на величину Δv_T определяет значение приращения перигелия Δq (Fernandez, 2005):

$$\Delta q/q = 2\Delta v_T/v_T + \Delta v_T^2/v_T^2, \quad (4)$$

где $\Delta q = q_i - q_f$, q_i – начальное значение перигелия и q_f – значение перигелия после воздействия. Азимутальная составляющая скорости кометы на расстоянии от Солнца r выражается как $v_T \sim (2GM_\odot q)^{1/2}/r$, M_\odot – масса Солнца и G – гравитационная постоянная. Примем расстояние r равным его усредненному значению за орбитальный период $\langle r \rangle = 1.5a$ где a – большая полуось орбиты. Так как воздействие планет-гигантов наиболее эффективно на гелиоцентрических расстояниях ≈ 15 а. е., в формуле (4) мы используем $q_i = 15$ а. е. с эксцентриситетом $e \approx 1$. Такие кометы с почти параболическими орбитами могут эффективно выбрасываться из облака Оорта. В случае кометной вспышки величина Δv_T получается из уравнений (2) и (3), если принять, что импульс отдачи сонаправлен с азимутальной составляющей скорости кометы. На рис. 1 представлены изменения перигелия орбиты кометы за счет гравитационных механизмов и воздействия вспышек комет. Приливное воздействие галактического диска представлено черными пунктирными кривыми для трех углов 45° , 75° и 85° (по направлению на галактический диск). Серая сплошная кривая – гравитационное воздействие проходящих звезд. Величина изменения перигелия орбиты для гравитационных воздействий взяты из работы (Fernandez, 2000). Изменения перигелия при

вспышке кометы с радиусом 2, 1 и 0.5 км и с массой выброса $\Delta M = 10^{10}$ кг изображены черными сплошными кривыми. При $a < 1 \times 10^4$ а. е. изменение перигелия орбит комет за счет гравитационных воздействий незначительно. С другой стороны, вспышки комет способны менять орбиты комет во всем облаке Оорта. Как следует из работы (Fernandez, 2000), кометы с $\Delta q/q \sim 1$ могут выбрасываться во внутреннюю часть Солнечной системы в окрестность Земли в течение одного орбитального периода P . Как видно на рис. 1, условие $\Delta q/q \sim 1$ выполняется для $a \approx (2.5-3.5) \times 10^4$ а. е. в случае гравитационных воздействий. При вспышке кометы с радиусом 1 км $a \approx 3.5 \times 10^4$ а. е., тогда как для кометы с радиусом 0.5 км $a \approx 5 \times 10^3$ а. е.

В случае гравитационных воздействий конус потерь эффективно заполняется при $a > a_{\text{fill}} \approx (2.5-3.5) \times 10^4$ а. е. Значение большой полуоси, где $\Delta q/q \sim 1$, обозначается как a_{fill} . С другой стороны, гравитационные воздействия не существенны при $a < a_{\text{min}} \approx 1 \times 10^4$ а. е. На основе этого вводится разделение облака Оорта на следующие области: ядро облака Оорта, где $a < a_{\text{min}}$; внутреннее облако Оорта для комет с большой полуосью в интервале $a_{\text{min}} < a < a_{\text{fill}}$; внешнее облако Оорта, где $a > a_{\text{fill}}$ (Fernandez, 2005). Гравитационные механизмы не зависят от радиуса кометы, тогда как эффективность негравитационного механизма растет с уменьшением радиуса кометного ядра. В результате для комет с радиусами меньше или порядка 1 км указанное разделение облака Оорта может сильно меняться. Зависимость a_{fill} от радиуса кометного ядра R получается из уравнений (2), (3) и (4) при $\Delta q/q \sim 1$. На рис. 2 представлены значения величины a_{fill} в случае кометных вспышек. Черные кривые построены для трех разных значений массы выброшенного вещества при вспышке: 10^8 , 10^9 , 10^{10} кг. Черная пунктирная кривая – параметр a_{fill} в случае гравитационных воздействий (не зависит от радиуса кометы). Как видно на рис. 2, a_{fill} для комет с радиусом ≤ 1 км меньше 3.5×10^4 а. е. (величина a_{fill} в случае гравитационных воздействий) при массе выброса $\Delta M = 10^{10}$ кг. Кометы с радиусом меньше 600 м и $\Delta M = 10^{10}$ кг имеют параметр $a_{\text{fill}} < 1 \times 10^4$ а. е., что соответствует области классического ядра облака Оорта.

Основным механизмом выброса комет из облака Оорта является процесс хаотизации орбит с последующим заполнением конуса потерь, в котором кометы имеют перигелий в зоне влияния Сатурна и Юпитера. В соответствии с работой (Hills, 1981), величина конуса потерь при изотропном распределении скоростей комет определяется как $F \sim 2q/a$, где F соответствует проценту

популяции комет, перигелий которых лежит в интервале от 0 до q . Как указывалось выше, кометы с большой полуосью $a > a_{\text{fill}}$ при гравитационных и негравитационном воздействиях эффективно заполняют конус потерь. Отличительной чертой исследуемого негравитационного механизма является зависимость параметра a_{fill} от радиуса кометы R (рис. 2). Поток комет из облака Оорта с заполненным конусом потерь $a > a_{\text{fill}}$ и $q \approx 15$ а. е. в случае кометных вспышек равен:

$$\dot{N} = \int_{a_{\text{fill}}(R)}^{\infty} F \frac{1}{P} N_c da, \quad (5)$$

где N_c – начальное число комет в облаке Оорта и P – орбитальный период кометы. Поток комет из облака Оорта под действием гравитационных механизмов получается из уравнения (5) с $a_{\text{fill}} = 3.5 \times 10^4$ а. е. По классической модели современного стационарного облака Оорта большая часть комет находится в ядре облака Оорта (Duncan и др., 1987). Функция распределения комет зависит от большой полуоси как $\Gamma(a) \propto a^{-\gamma}$, где параметр γ лежит в интервале 2–4 (Fernandez, 2005). Из уравнения (5) мы получаем отношение потоков комет в результате действия гравитационного и негравитационного механизмов:

$$\frac{\dot{N}_{\text{nongrav}}}{\dot{N}_{\text{grav}}} = \left(\frac{a_{\text{fill-grav}}}{a_{\text{fill-nongrav}}(R)} \right)^{(\gamma+3/2)}, \quad (6)$$

где $a_{\text{fill-grav}}$ и $a_{\text{fill-nongrav}}$ границы внешнего/внутреннего облака Оорта в случае гравитационных и негравитационного воздействий, соответственно. На рис. 3 представлено сравнение потоков комет из облака Оорта в результате действия гравитационных и негравитационного механизмов. Как видно на рис. 3 в случае вспышек комет с массой 10^{10} кг поток комет с $R \approx 650$ –750 м во внутреннюю часть Солнечной системы на два порядка превышает поток от гравитационных воздействий. В случае вспышек с $\Delta M = 10^9$ кг, $\dot{N}_{\text{nongrav}}/\dot{N}_{\text{grav}} = 100$ при $R \approx 300$ м, тогда как для комет с $R \approx 500$ м потоки выбрасываемых комет в результате действия гравитационных и негравитационных механизмов совпадают.

Кометные ливни

Как было указано в работах (Hills, 1981; Fernandez, 2000), заполнение конуса потерь во внутреннем облаке Оорта может происходить только при очень близком проходе звезды (расстояние до Солнца $D_{\odot} < 10^4$ а. е.). Заполнение конуса потерь по пути движения звезды через облако Оорта происходит на расстоянии от кометы $D < D_F$, где $D = D_F$ при $\Delta q/q \sim 1$. Если принять $D_{\odot} \gg D$, тогда

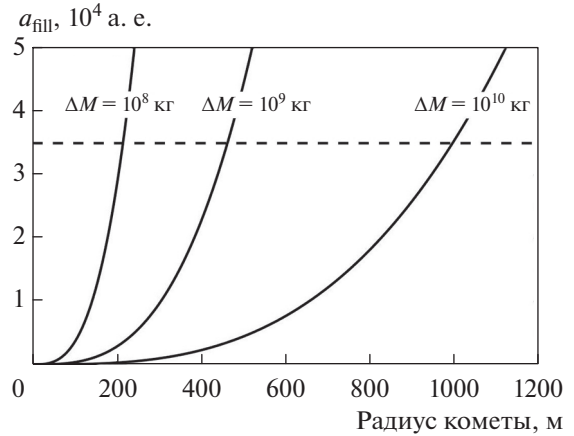


Рис. 2. Граница внутреннее/внешнее облака Оорта (a_{fill}) в зависимости от радиуса кометы при учете влияния кометных вспышек на стабильность орбит.

$$D_F \approx \frac{1}{2} \left(\frac{M_{\text{star}}}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{V_{\text{star}}}{V_{\odot}} \right)^{-1} D_{\odot} \left[1 + \left(\frac{u}{D_{\odot}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где M_{star} – масса звезды, V_{star} – скорость звезды, V_{\odot} – скорость Солнца относительно соседних звезд ($V_{\odot} \approx 20$ км/с) и u – расстояние вдоль движения звезды до точки кратчайшего расстояния до Солнца (Fernandez, 2005).

Проход звезды помимо гравитационного воздействия приводит к росту поверхностной температуры кометы (Stern, Shull, 1988). Таким образом, звезда создает две цилиндрические области в облаке Оорта с сильными гравитационным и тепловым воздействиями. Нагрев кометы на несколько градусов может спровоцировать рекомбинацию радикалов в поверхностном слое. В результате комета может получить дополнительное негравитационное ускорение или полностью разрушиться. В табл. 1 приведено сравнение радиусов гравитационного (D_F) и теплового воздействий для звезд различных классов. Для звезд с 0.5 – $2M_{\odot}$ радиус теплового воздействия составляет 0.1 – $1D_F$. В случае звезд классов O и B, радиус теплового воздействия больше гравитационного.

Проход близкой звезды провоцирует резкий рост числа комет, выбрасываемых во внутреннюю часть Солнечной системы (кометный ливень). В соответствии с моделью Heisler и др. (1987), кометный ливень за счет гравитационных возмущений должен происходить с периодом несколько десятков миллионов лет при прохождении звезд с 1 – $2M_{\odot}$ на расстоянии $D_{\odot} = 10^4$ а. е. В этот период поток комет во внутреннюю часть Солнечной системы увеличивается больше, чем на порядок по сравнению со средним потоком комет (Heisler и др., 1987). В то же время, неграви-

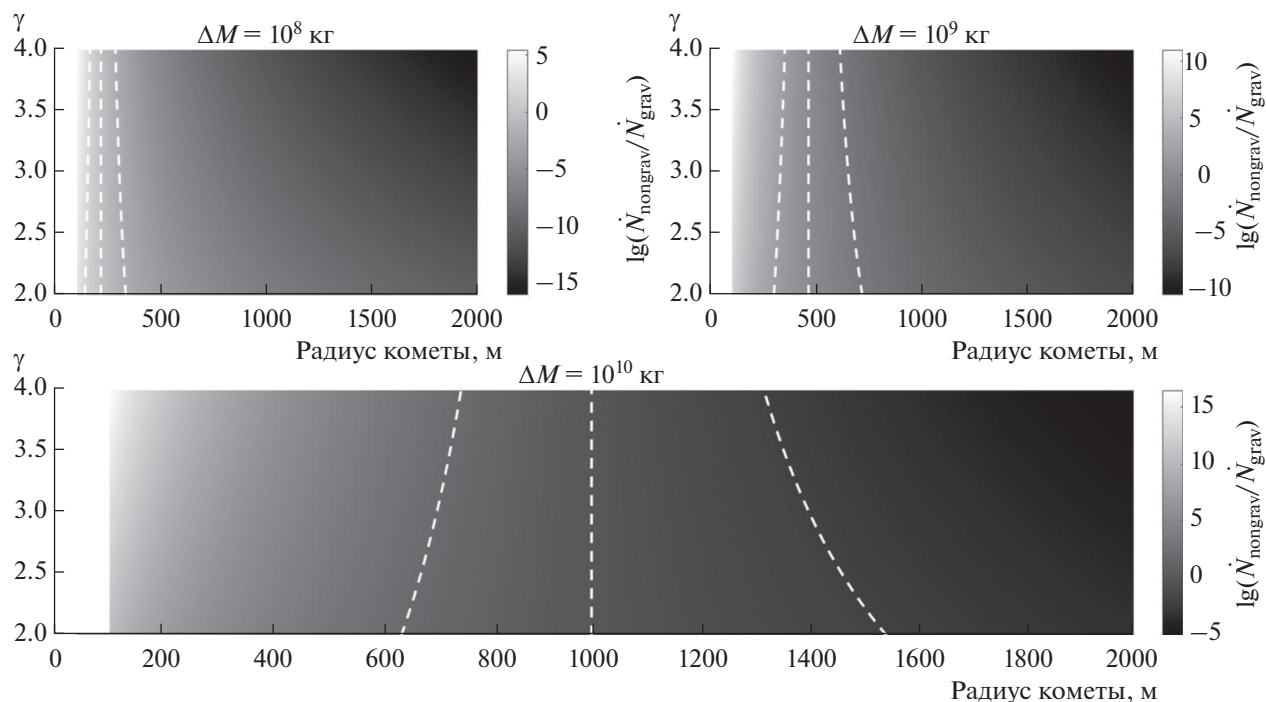


Рис. 3. Логарифм отношения потоков комет из облака Оорта во внутреннюю часть Солнечной системы в случае негравитационного (кометных вспышек) (\dot{N}_{nongrav}) и гравитационных воздействий (\dot{N}_{grav}) в зависимости от радиуса кометы и параметра γ (уравнение (6)). Графики построены для трех разных значений массы выброшенного материала при вспышке: 10^8 , 10^9 и 10^{10} кг. Белые пунктирные кривые соответствуют (слева направо) $\lg(\dot{N}_{\text{nongrav}}/\dot{N}_{\text{grav}}) = 2, 0, -2$.

тационный механизм изменения орбит комет также приведет к увеличению потока комет с $R < 1$ км на несколько порядков. Здесь важно учитывать, что гравитационное воздействие звезды происходит одновременно с тепловым. В результате кометы с $R < 1$ км при учете воздействия кометных вспышек могут эффективнее выбрасываться из облака Оорта во время кометного ливня, чем кометы больших радиусов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Мы показали, что кометы в облаке Оорта могут быть подвержены кометным вспышкам. Поскольку наблюдение вспышек на таких расстояниях не является возможным, представляет большой интерес изучение воздействия импульса от струи газа и пыли при вспышке на стабильность орбит комет в облаке Оорта. Обсуждаемый механизм изменения орбит комет за счет вылета струи

Таблица 1. Радиус гравитационного и теплового воздействий проходящей звезды в облаке Оорта

Класс звезды	$\lg n$, пк^{-3}	$\lg D_F$, а. е.	$\lg D_{\Delta T=2}$, а. е.	$\lg D_{\Delta T=10}$, а. е.
O3	-9.2	5.8	6.3	5.7
O5	-7.4	5.5	6.2	5.6
B0	-6.4	5.0	5.6	5.0
G5	-2.2	3.5	3.2	2.6
Белые карлики	-1.6	3.1	2.3	1.7
M5	-1.2	2.8	1.8	1.2

Значение величины D_F получается из уравнения (7) с $D_{\odot} = 10^4$ а. е. и $u = D_{\odot}$. Значения концентраций звезд главной последовательности n взяты из работы Stern и Shull (1988). $D_{\Delta T=2}$ и $D_{\Delta T=10}$ — это радиусы областей вокруг звезды, где происходит нагрев поверхности комет по сравнению с равновесной температурой в облаке Оорта на 2 и 10 К, соответственно. Метод расчета радиуса теплового воздействия звезды взят из работы Stern и Shull (1988).

газа и пыли во время кометной вспышки (негравитационный механизм) эффективно воздействует на кометы меньше или порядка одного километра. Такие кометы при одной вспышке могут выбрасываться во внутреннюю часть Солнечной системы. Гравитационные механизмы изменения орбит комет не зависят от радиуса (массы) кометного ядра, тогда как эффективность рассматриваемого негравитационного механизма растет с уменьшением радиуса кометы. В результате популяция комет малого радиуса подвержена более сильным изменениям по сравнению с кометами большего радиуса.

За время эволюции облака Оорта воздействие негравитационного механизма изменения орбит комет должно было привести к обеднению облака Оорта кометами малого радиуса. В стандартной модели предполагается степенной рост числа комет в сторону меньших радиусов. В работе (Вое и др., 2019) показано, что с учетом наблюдательной селекции, показатель роста числа наблюдаемых долгопериодических комет с радиусами <1 км падает на порядок по сравнению с кометами больших радиусов. Из нашей модели следует, что воздействия сверхновых и проходящих звезд за время эволюции облака Оорта приводят к вспышкам большого числа комет и к выбросу комет малого радиуса из облака Оорта за счет негравитационных воздействий. Этот эффект должен был привести к значительному уменьшению числа малых комет в облаке Оорта. В данной работе мы рассматриваем влияние только одной вспышки. Возможные повторные вспышки могут провоцировать полное разрушение кометного ядра. Такой эффект может служить дополнительным механизмом уменьшения числа малых долгопериодических комет. Транснептуновые тела также деструктурируют относительное уменьшение числа тел с малыми радиусами (Вое и др., 2019). Низкие температуры поверхностных слоев транснептуновых объектов (30–60 К) позволяют накапливать большие концентрации радикалов при облучении космическими лучами. В результате малые тела внешней Солнечной системы могут быть также подвержены вспышкам, что может приводить к изменению их орбит или к полному разрушению малых тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматриваются вспышки кометных ядер в облаке Оорта и их влияние на стабильность кометных орбит. Источником кометных вспышек является рекомбинация свободных радикалов, накопленных в поверхностных слоях кометного ядра при облучении космическими лучами. Подъем поверхностной температуры кометного ядра при проходе звезды или вспышки сверхновой провоцирует быструю ре-

комбинацию радикалов с последующим выбросом газа и пыли с поверхности кометы. Струя из газа и пыли приводит к импульсу отдачи кометного ядра с последующим изменением параметров орбиты кометы. Из расчетов получено, что:

1. Кометы с радиусами ≤ 1 км и с сильно вытянутыми орбитами могут эффективно выбрасываться во внутреннюю часть Солнечной системы при одной вспышке.

2. Большое количество кометных вспышек за время эволюции облака Оорта могло приводить к относительному уменьшению числа комет с малыми радиусами, что позволяет объяснить наблюдаемое уменьшение числа долгопериодических комет с радиусами ≤ 1 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bar-Nun A., Herman G., Laufer D., Rappaport M.L.* Trapping and release of gases by water ice and implications for icy bodies // *Icarus*. 1985. V. 63. P. 317–332.
- Belousov D., Pavlov A., Tsurkov D., Lomasov V.* Irradiation effects in comet ice: A source of cometary cryovolcanism // 53th Conf. Lunar and Planet. Sci. 2022. Abs. #1244.
- Boe B., Jedicke R., Meech K.J., Wiegert P., Weryk R.J., Chambers K.C., Denneau L., Kaiser N., Kudritzki R.-P., Magnier E.A., Wainscoat R.J., Waters C.* The orbit and size-frequency distribution of long period comets observed by Pan-STARRS1 // *Icarus*. 2019. V. 333. P. 252–272.
- Carpenter J.M.* Thermally activated release of stored chemical energy in cryogenic media // *Nature*. 1987. V. 330. P. 358–360.
- Duncan M., Quinn T., Tremaine S.* The formation and extent of the Solar system comet cloud // *Astron. J.* 1987. V. 94. P. 1330–1338.
- Fernandez J.A.* Long-period comets and the Oort cloud // *Earth, Moon, and Planets*. 2000. V. 89. P. 325–343.
- Fernandez J.A.* Comets: Nature, Dynamics, Origin and their Cosmogonical Relevance // *Astrophys. and Space Sci. Library* / Eds: *Burton W.B.* 2005. 383 p.
- Fulle M., Lazzarin M., La Forgia F., Zakharov V.V., Bertini I., Epifani E.M., Ammannito E., Buzzoni A., Capria M.T., Carbognani A., Da Deppo V., Della Corte V., Fiscale S., Frattin E., Inno L., and 22 co-authors.* Comets beyond 4 AU: How pristine are Oort nuclei? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 513. P. 5377–5386.
- Gronkowski P.* The search for a cometary outbursts mechanism: A comparison of various theories // *Astron. Nachr.* 2007. V. 328. P. 126–136.
- Gronkowski P., Wesołowski M.* A model of cometary outbursts: a new simple approach to the classical question // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2015. V. 451. P. 3068–3077.
- Gronoff G., Maggiolo R., Cessateur G., Moore W.B., Airapetian V., De Keyser J., Dhooghe F., Gibbons A., Gunell H., Mertens C.J., Rubin M., Hosseini S.* The effect of cosmic rays on cometary nuclei. I. Dose deposition // *Astrophys. J.* 2020. V. 890. id. 89 (8 p.).

- Heisler J., Tremaine S., Alcock C.* The frequency and intensity of comet showers from the Oort cloud // *Icarus*. 1987. V. 70. P. 269–288.
- Hills J.G.* Comet showers and the steady-state infall of comets from the Oort cloud // *Astrophys. J.* 1981. V. 86. P. 1730–1740.
- Hudson R.L., Moore M.H.* A far-IR study of amorphous ice: an unreported oscillation between amorphous and crystalline phases // *J. Phys. Chem.* 1992. V. 96. P. 6500–6404.
- Huebner W.F., Benkhoff J., Capria M-T., Coradini A., De Sanctis C., Orosei R., Prialnik D.* Heat and gas diffusion in comet nuclei // *ISSI Sci. Report*. 2006. 285 p.
- Johnson R.E., Quickenden T.I.* Photolysis and radiolysis of water ice on outer Solar system bodies // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. Iss. E5. P. 10985–10996.
- Marsden B.G., Sekanina Z., Yeomans D.K.* Comets and nongravitational forces. V // *Astrophys. J.* 1973. V. 78. P. 211–225.
- Meech K.J., Kleyna J.T., Hainaut O., Micheli M., Bauer J., Denneau L., Keane J.V., Stephens H., Jedicke R., Wainscoat R., Weryk R., Flewelling H., Schunová-Lilly E., Magnier E., Chambers K.C.* CO-driven activity in Comet C/2017 K2 (PANSTARRS) // *Astrophys. J.* 2017. V. 849. id. L8 (7p.).
- Moore M.H., Donn B., Khanna R., A'Hearn M.F.* Studies of proton-irradiated cometary-type ice mixtures // *Icarus*. 1983. V. 54. P. 388–405.
- Pavlov A.K., Belousov D.V., Tsurkov D.A., Lomasov V.N.* Cosmic ray irradiation of comet nuclei: A possible source of cometary outbursts at large heliocentric distances // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 511. P. 5909–5914.
- Prialnik D., Sierks H.* A mechanism for comet surface collapse as observed by Rosetta on 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 469. P. S217–S221.
- Reach W.T., Vaubaillon J., Lisse C.M., Holloway M., Rho J.* Explosion of Comet 17P/Holmes as revealed by the Spitzer Space Telescope // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 276–292.
- Shabalin E., Kulagin E., Kulikov S., Melikhov V.* Experimental study of spontaneous release of accumulated energy in irradiated ices // *J. Radiation Phys. and Chem.* 2003. V. 67. P. 315–319.
- Siegel S., Flournoy J.M., Baum L.H.* Irradiation yields of radicals in gamma-irradiated ice at 4.2° and 77° K // *J. Chem. Phys.* 1961. V. 34. P. 1782.
- Stern S.A., Shull J.M.* The influence of supernovae and passing stars on comets in the Oort cloud // *Nature*. 1988. V. 332. P. 407–411.
- Vincent J.B., Bodewits D., Besse S., Sierks H., Barbieri C., Lamy P., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Keller H.U., Agarwal J., A'Hearn M.F., Auger A.T., Barucci M.A., Bertaux J.L., and 52 co-authors.* Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse // *Nature*. 2015. V. 523. P. 63–66.
- Zhu C., Bergantini A., Singh S.K., Abplanalp M.J., Kaiser R.I.* Rapid radical–radical induced explosive desorption of ice-coated interstellar nanoparticles // *Astrophys. J.* 2021. V. 920. id. 73 (15p.).