

Тела зодиакального света: их происхождение, эволюция, выпадение на Землю

А.В.Бялко

Институт теоретической физики имени Л.Д.Ландау РАН (Москва, Россия)

Эта статья продолжает серию прошлогодних публикаций, описывающих осколки Гигантского столкновения, в результате которого образовалась Луна. В предыдущих статьях одним из следствий Гигантского столкновения считается выход значительного количества осколков на подковообразные орбиты, которые были рассчитаны решением ограниченной задачи трех тел. Наблюдаемая интенсивность зодиакального света была теоретически объяснена отражением солнечного света от частиц, движущихся по множеству подковообразных орбит, получена оценка их отражающей поверхности, а также высказана гипотеза, объясняющая учащение выпадения метеоритов в те периоды, когда эксцентриситет земной орбиты близок к своим максимумам. Это предположение получило подтверждение при исследовании магнитных свойств пыли в кернах антарктического льда итальянскими учеными. В этой статье нами проанализированы отложения космической пыли в глубинах Тихого океана. Доказательные данные представлены вместе с изложением причинной связи, показывающей, как вариации эксцентриситета Земли усиливают выход зодиакальных тел на орбиты астероидов групп Аполлона и Атона, у которых вероятность столкновения с нашей планетой достаточно высока. Обсуждаются также возможность полета исследовательской миссии к телам зодиакального света.

Ключевые слова: задача трех тел, точки Лагранжа, подковообразные траектории, орбиты астероидов групп Аполлона и Атона, космическая пыль, эксцентриситет земной орбиты.

В последнее время возник повышенный интерес к объяснению природы зодиакального света [1]. На фотографиях восходов и заходов Солнца на Марсе, полученных марсоходами НАСА, отчетливо видно свечение в плоскости эклиптики, аналогичное зодиакальному свету, наблюдаемому на Земле в безлунные ночи перед восходом Солнца или после его заката (рис.1). Угловой размер Солнца на Марсе в полтора-два раза меньше по сравнению с видимым с Земли, форма области свечения существенно отличается от конуса земного зодиакального света.

В работе [1] анализируется плотность межпланетной пыли в плоскости эклиптики по результатам полета космического аппарата «Juno» к Юпитеру в 2013–2016 гг. Отмечено повышение концентрации пыли при пересечении двух кометных хвостов и орбиты Марса. В плоскости эклиптики или под небольшим углом к ней расположены орбиты



Алексей Владимирович Бялко, доктор физико-математических наук, ассоциированный сотрудник Института теоретической физики имени Л.Д.Ландау РАН, заместитель главного редактора журнала «Природа». Область научных интересов — теоретическая физика, науки о Земле.
e-mail: alex@byalko.ru

большинства астероидов, распределение их плотности также приведено в этой работе. Однако в ней нет прямого утверждения, что источником наблюдаемого с Земли зодиакального света является межпланетная космическая пыль в плоскости эклиптики. Вопрос, таким образом, остается открытым. Но его разрешение принципиально возможно. Нужно провести спектральный анализ марсианского неба при восходах и закатах. Смещение фраунгоферовых линий слева и справа от положения Солнца должно оказаться асиммет-

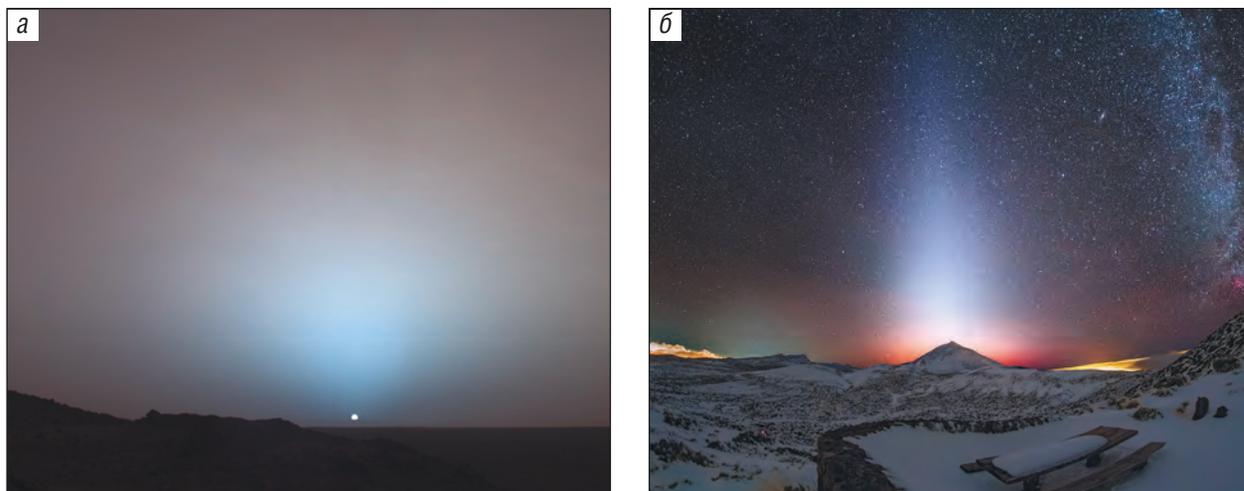


Рис. 1. Зодиакальный свет: а — при закате Солнца на Марсе, в кратере Гусева (изображение получено 19 мая 2005 г. марсоходом «Spirit» в рамках проекта НАСА «Mars Exploration Rover», NASA/JPL/Texas A&M/Cornell); б — при восходе Солнца на Земле, в Национальном парке Тейде на о.Тенерифе (3 февраля 2018 г., фото Juan Carlos Casado).

ричным, поскольку его свет отражается от пыли в кольце астероидов, которая, с одной стороны, движется навстречу Марсу, а с другой — удаляется от него. Относительное смещение линий по порядку величины $\sim 10^{-4}$ равно отношению скорости астероидов к скорости света, оно вполне измеримо.

Зодиакальный свет при наблюдениях с Земли вообще не смещает фраунгоферовых линий [2]. Поэтому дальнейшее развитие гипотезы о том, что тела зодиакального света находятся во встречном движении на подковообразных орбитах вблизи Земли, можно считать содержательным. Кроме того, не исключено, что они оказались там вследствие Гигантского столкновения (ГС), в результате которого образовалась Луна. Они длительно эволюционировали при многочисленных взаимных столкновениях и взаимодействии с солнечным ветром, но тем не менее сохраняют много информации о состоянии Солнечной системы миллиарды лет назад.

Этой теме в прошлом году были посвящены три статьи в журнале «Природа». В статье о зодиакальном свете* его наблюдаемая интенсивность была теоретически объяснена отражением солнечного света от множества частиц, движущихся по подковообразным орбитам, близким к орбите Земли, получена оценка полной поверхности этих тел, а также высказана гипотеза, объясняющая учащение выпадения метеоритов в те периоды, когда эксцентриситет земной орбиты близок к своим максимумам. Эта гипотеза нашла экспериментальное подтверждение по данным анализа

пыли в кернах антарктического льда. Здесь эти доказательные данные будут представлены вместе с траекториями, показывающими, как рассеяние на точках Лагранжа приводит к выходу зодиакальных тел на орбиты типа астероидов групп Аполлона и Атона (их вероятность столкновения с нашей планетой и Луной весьма высока).

Две следующие статьи в журнале «Природа»** излагали и развивали идеи, впервые высказанные в нашей с академиком М.И.Кузьминым статье в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» [3]. Важный результат этих работ состоит в оценке вероятностей попадания осколков образования Луны в Венеру и Марс: они на несколько порядков ниже, чем вероятности попадания в Землю, но все же достаточны для появления гидросферы Марса. Главный вывод этих работ состоит в том, что все орбиты осколков образования Луны проходят через узкую область вблизи точки, где произошло ГС. Столкновения осколков в этой области могут выводить их на подковообразные орбиты, что поддерживает гипотезу о происхождении зодиакальной пыли из осколков ГС. Здесь будет показано, что кроме этого способа выведения тел на подковообразные орбиты существует еще один — гравитационное рассеяние на первых двух точках Лагранжа.

** Бялко А.В., Кузьмин М.И. Следствия столкновения, породившего Луну: траектории осколков. Природа. 2020; 10: 31–39. DOI:10.7868/S0032874X2010004X.

Бялко А.В., Кузьмин М.И. Следствия столкновения, породившего Луну: эволюция осколков на орбитах Солнечной системы. Природа. 2020; 11: 56–60. DOI:10.7868/S0032874X2011006.

* Бялко А.В. Зодиакальный свет: старая проблема и новые гипотезы. Природа. 2020; 6: 22–31. DOI:10.7868/S0032874X20060034.

Многообразие подковообразных орбит

Решение задачи трех тел, приводящее к подковообразным орбитам, было впервые обнаружено в 1973 г. М.Оллабо и Э.Эверхартом [4]. Движение тел в плоскости эклиптики происходит с малыми скоростями по сдвигающимся петлям, период петли равен одному году. В плоскости, перпендикулярной эклиптике, движение тел точно периодическое, также с годичным периодом (рис.2).

При приближении к Земле или к точкам Лагранжа L1 и L2 происходит разворот траекторий с дальнейшим петлевым движением в обратном направлении. Вертикальное движение не оказывает существенного влияния на область разворота, динамика тел определяется их проекцией в плоскости земной орбиты. Около точек Лагранжа L3, L4 и L5 тела проходят без особых вариаций траекторий.

В целом замкнутые траектории тел напоминают подкову, что и отражено в их названии. Толщина подковы — дистанция между минимальным и максимальным расстояниями до Солнца — невелика. Минимум скорости на подковообразных орбитах достигается при их пересечении с земной орбитой. Именно там концентрация тел оказывается максимальной. Сегодня известно более десятка астероидов на подковообразных орбитах. Замк-

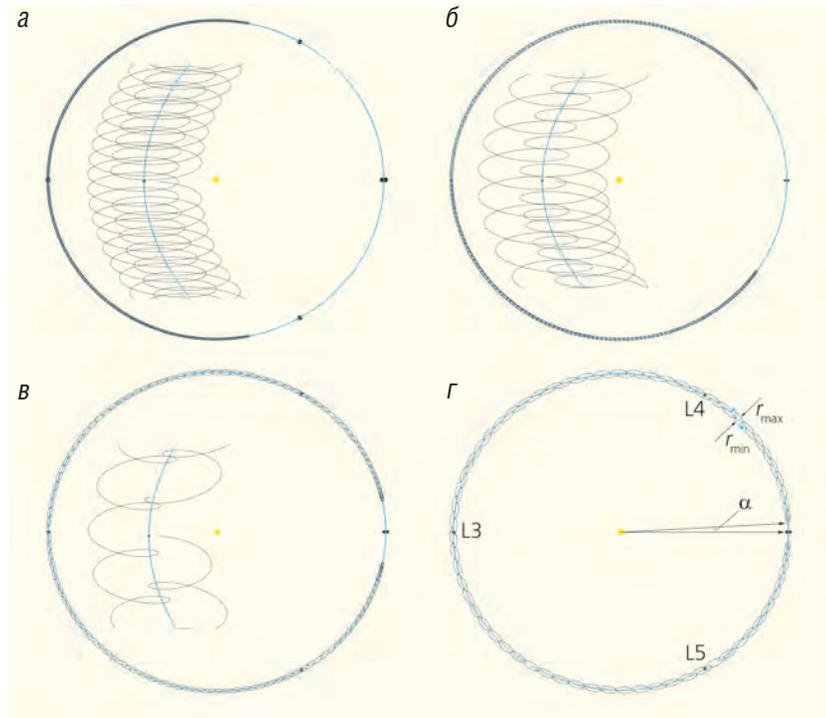


Рис.2. Многообразие подковообразных орбит. Синим цветом отмечена орбита Земли. Крупно показана часть подковообразной орбиты около точки L3 (а, б, в); обозначены расположение точек L3, L4, L5, угол разворота траектории α и размеры r_{\min} и r_{\max} подковообразной орбиты (r).

нутый оборот по такой орбите занимает от нескольких сот до нескольких тысяч лет (рис.3).

Важная особенность подковообразных орбит состоит в наличии встречных движений. При множестве вариантов распределения зодиакальных тел по скоростям вероятность их взаимных столкновений оказывается достаточно высокой. И хотя взаимные скорости на встречных орбитах невелики, порядка 1–3 км/с, удары с такими скоростями при-

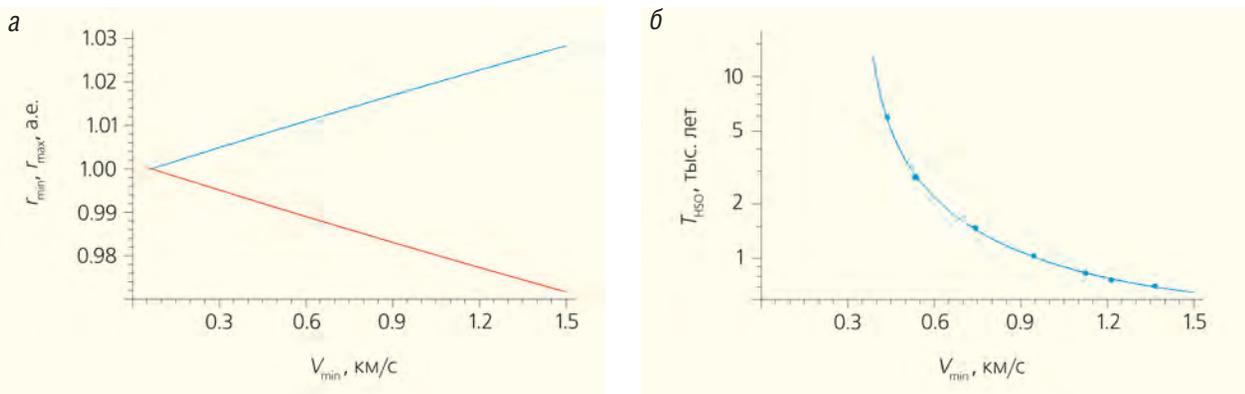


Рис.3. Зависимости от минимальной скорости V_{\min} минимального и максимального радиусов дрейфа r_{\min} и r_{\max} (а) и периода замкнутой траектории T_{HSO} (б). Размеры подковообразной орбиты зависят от минимальной скорости почти линейно, а период замкнутой траектории — гиперболически.

водят к дроблению тел, а следовательно, к росту относительного содержания пыли. Обратные процессы консолидации пылевых тел в более массивные объекты также не исключены, однако рассчитать их интенсивность пока невозможно. Так, солнечное излучение приводит к электронной эмиссии и появлению положительного заряда пылинок. По этой причине в среде зодиакального света не исключены явления, аналогичные грозovým разрядам, которые могут способствовать консолидации пыли. Кроме того, присутствие в составе этих тел окислов железа вызывает их магнитное притяжение, также приводящее к росту тел. Эти процессы физически очень интересны, но их теория, к сожалению, не развита.

Переходы зодиакальных тел на орбиты астероидов групп Аполлона и Атона

Исходя из длительности нахождения тел на подковообразных орбитах и их концентрации в малом диапазоне вблизи земной орбиты возникла идея объяснения зодиакального света рассеянием на множестве подковообразных орбит. Все траектории малых тел на рис.2 были рассчитаны решением ограниченной задачи трех тел, стартующих под разными углами со скоростью, равной 1.8 км/с. Она же остается максимальной при движении на всей траектории. Но что происходит, когда эта стартовая скорость увеличивается? Очень скоро она достигает критической, равной примерно 1.86 км/с, и траектории малых тел начинают подходить к точкам Лагранжа L2 и L1 на малые расстояния. При превышении критической скорости тело с подковообразной траектории вдоль земной орбиты переходит на эллиптическую орбиту вокруг Солнца. При этом в достаточно узком диапазоне скоростей возможны два варианта орбиты: аналогичная астероиду Аполлон с эксцентриситетом, большим единицы, и аналогичная астероиду Атон с эксцентриситетом, меньшим единицы (рис.4). В обоих случаях орбита или пересекает земную, или остается очень близкой к ней, что приводит к заметной вероятности дальнейших столкновений тела с Землей или Луной.

Отметим следующий важный момент. Уравнения гравитации, описывающие эти переходы, симметричны по отношению к изменению знака времени. Это означает, что орбитам перехода из зодиакального состояния в астероиды групп Аполлона и Атона соответствуют такие же орбиты обратного перехода из астероидов в зодиакальные тела. В нашей с М.И.Кузьминым работе [3] и ее изложениях в «Природе» мы считали, что насыщение подковообразных орбит осколками образования Луны

возможно вследствие их взаимного рассеяния в узкой области пересечения всех околосолнечных орбит. Теперь мы видим, что существует и чисто гравитационный путь перехода осколков на орбиты зодиакальных тел. Какова его вероятность, иначе говоря, каковы сечения рассеяния на точках Лагранжа L2 и L1, выяснить теоретически пока не удалось, однако их можно оценить статистически при переборе многочисленных возможных траекторий с разными начальными условиями.

Кроме этих способов перехода тел зодиакального света на орбиты, не исключаящие столкновения с Землей, есть еще один простой сценарий: при ударе достаточно крупного астероида по зодиакальному телу его скорость может стать выше критической. Интересно, что исследование древних кратеров астероида Бенну (который, судя по его рыхлости, относительно недавно находился на подковообразной орбите) показало, что последний внешний удар он получил всего лишь примерно 1.75 ± 0.75 млн лет назад [5].

Возникает также вопрос, насколько изменяется это гравитационное рассеяние при уходе от круговой орбиты Земли к эллиптической. Попробуем разобраться.

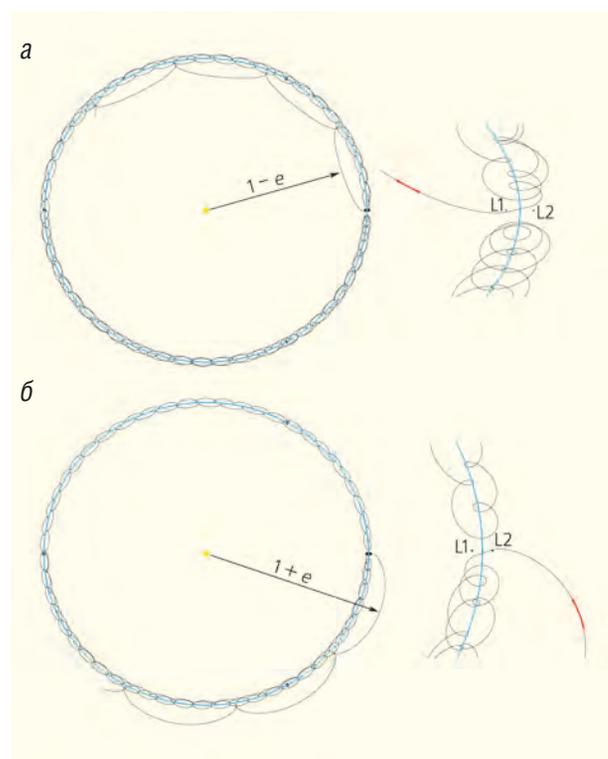


Рис.4. Траектории перехода с подковообразной на солнечные орбиты при рассеянии на точках L1 и L2 (максимальная скорость 1.86 км/с): а — на орбиты астероидов группы Атона; б — на орбиты астероидов группы Аполлона.

Смещение точек Лагранжа при эллиптической траектории Земли

При решении ограниченной задачи трех тел выяснилась важная роль рассеяния на неустойчивых точках Лагранжа L1 и L2. Оно влияет на выход тел зодиакального света на траектории астероидов групп Аполлона и Атона вокруг Солнца, а также на возвращение этих тел на подковообразные зодиакальные орбиты. Однако реальная траектория Земли есть эллипс с малым эксцентриситетом e , изменяющимся во времени с характерным периодом около 100 тыс. лет [6, 7]. Возникает вопрос, насколько существенно отличается взаимообмен траекторий при фактическом эллиптическом движении Земли от случая ее движения по окружности. Решение этой задачи возможно, но, к сожалению, расчеты этих траекторий пока не исследованы. Поэтому ограничимся изучением частного вопроса: посмотрим, насколько сильно смещаются точки Лагранжа L2 и L1 при переходе от круговой орбиты к эллиптической с малым эксцентриситетом (рис.5).

Логично предположить, что эти смещения происходят вдоль прямой, соединяющей Солнце и Землю, иначе говоря, вертикальная координата первых двух точек Лагранжа остается равной нулю. Выпишем уравнение для движения малой частицы в системе координат, вращающейся с переменной скоростью. Когда Земля находится в перигее на расстоянии от Солнца, равном $1 - e$, ее угловая скорость увеличивается пропорционально $1 + 2e$; в афелии она, напротив, относительно снижается до $1 - 2e$. Условием равновесия служат равенства нулю скорости и ускорения малого тела. В результате для смещений точек Лагранжа L2 и L1 получается кубическое уравнение, действительное решение которого дает зависимость смещения от положения Земли на орбите. При нулевом эксцентриситете решение дает известный результат, расстояние от Земли до этих точек Лагранжа равно 0.01004.

Таким образом, в случае эллиптического движения с малым эксцентриситетом не происходит принципиальных изменений по сравнению со стандартной ограниченной задачей трех тел. Когда эксцентриситет Земли достигает максимальных значений около 0.06, диапазон колебаний первых двух точек Лагранжа заметно расширяется, но остается в конечных пределах. Поэтому вывод о принципиальной возможности выхода тел зодиакального света из подковообразных орбит на орбиты астероидов групп Аполлона и Атона остается справедливым, но при увеличении эксцентриситета земной орбиты диапазон ухода в астероиды с высокой вероятностью падения на Землю захватывает все большую область элонгации.

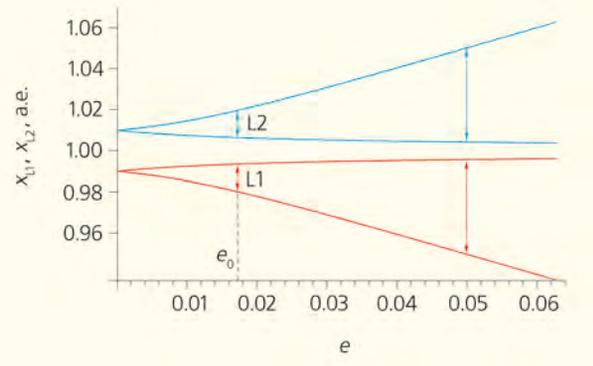


Рис.5. Вариации горизонтальных координат точек Лагранжа L1 (выделены красным) и L2 (синим) при различных значениях эксцентриситета Земли. В моменты прохождения перигелия положения этих точек приближаются к Земле (ее координата равна 1); при удалении к афелию расстояние точек Лагранжа от Земли возрастает. Стрелками показаны вариации горизонтальных координат точек Лагранжа при современном значении эксцентриситета ($e_0 = 0.0173$) и при произвольном.

Следы космических тел во льдах Антарктиды

Измерения содержания диоксида углерода и дейтерия в кернах, полученных бурением льдов Антарктиды, дали информацию о климате Земли за последние 400 тыс. лет (российская станция «Восток») и за 800 тыс. лет (французско-итальянская станция «Конкордия», Купол С) [8]. Измерения нерастворимой пыли в этих кернах показали, что в течение ледниковых периодов ее концентрация была примерно в 25 раз выше, чем в теплые периоды межледниковий [9, 10]. В работах европейских исследователей эта закономерность объяснялась климатическими причинами: возможно, система ветров менялась тогда таким образом, что пыль из пустынь начинала массово достигать Антарктиды. Это предположение казалось несколько нелогичным, поскольку в Южном полушарии пустынь не так много, а особых причин для кардинального изменения ветров не видно.

Подковообразные орбиты пылевых частиц были исследованы на устойчивость при малых эксцентриситетах. Однако естественно предположить, что те частицы, которые подходят к развороту орбиты, как бы отталкиваясь от Земли, при увеличении эксцентриситета переходят на орбиты близких к Земле астероидов групп Аполлона и Атона, и вероятность их столкновения с Землей и Луной существенно возрастает. Поэтому и была высказана гипотеза, что антарктическая пыль имеет не эоловое, пустынное, а космическое происхождение.

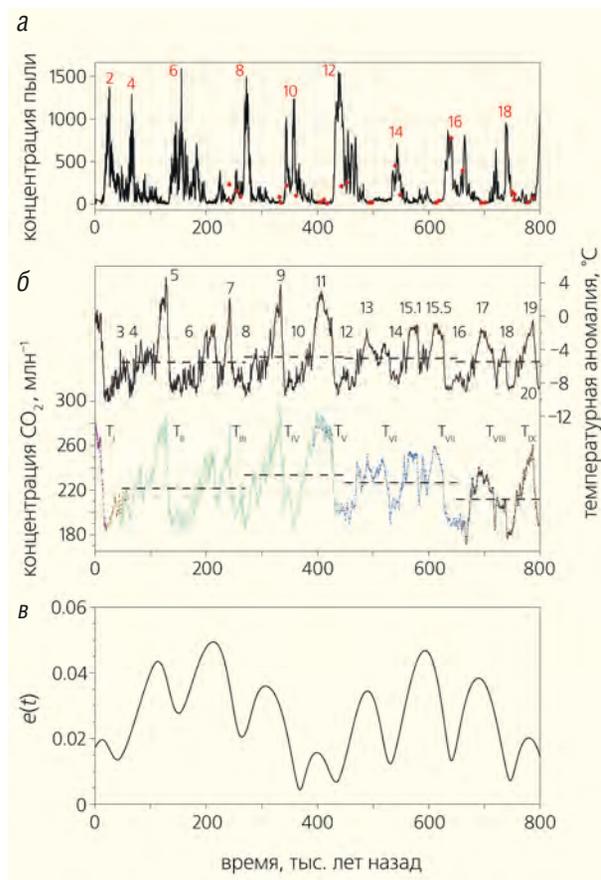


Рис.6. Анализ керна антарктического льда Купола С за последние 800 тыс. лет: а — концентрация пыли в керне (черная кривая — общая концентрация пыли, красные точки — ее магнитная восприимчивость) [11]; б — вариации температуры и концентрации CO_2 (числа на графике температуры соответствуют морским изотопным стадиям, четные — похолоданиям) [8]; в — вариации эксцентриситета земной орбиты $e(t)$ [7].

Метеориты, выпадающие на Землю, неизбежно проходят ее атмосферу с высокой начальной скоростью. При этом они сильно нагреваются, а вследствие резкого торможения распадаются на мелкие, а иногда и микроскопические осколки, которые исследователи Антарктики называют пылью. Их оплавленные поверхности по структуре существенно отличаются от эоловой пыли, которая не претерпевает радикальных изменений при переносе ветром. Кроме того, космическая пыль отличается от эоловой пыли пустынь по своему составу. Железо, никель и кобальт содержатся в ней в соотношении примерно 94:5:1. В песках пустынь железо в меньшей концентрации тоже присутствует, но никеля и кобальта там существенно меньше. Поэтому принципиально возможен первичный отбор пыли по ее магнитным свойствам.

В июле 2020 г. вышла статья итальянских ученых из университетов Урбино, Милана и Пизы [11], в которой были представлены результаты магнитных исследований кернов льдов Антарктиды озера Восток и Купола С. Приведем график выпадения пыли в кернах Купола С из этой статьи вместе с графиком вариаций эксцентриситета земной орбиты за 800 тыс. лет, рассчитанные Ж.Ласкаром из Парижской обсерватории [7] (рис.6). Ледниковые периоды (четные числа на рис.6,а) наступали примерно в те эпохи, когда кривая эксцентриситета проходила свои максимумы. В эти же времена усиливалось выпадение пыли в Антарктике, в том числе и космической.

Следы космических осадков на дне мирового океана

Если происходило выпадение тел зодиакального света на льды Антарктиды, то с той же вероятностью должно было происходить и выпадение их на остальную земную поверхность, в частности в океан. Падение метеоритов на Землю и Луну случается регулярно, но датировки их кратеров удается установить во временном диапазоне в сотни миллионов лет. Нас же для сравнения с вариациями земного эксцентриситета интересуют, по возможности, подробные датировки за последний миллион лет.

В книге Е.Г.Гурвича [12] показано, что металлоносные осадки на дне Мирового океана распространены очень широко, но они образовались в основном за счет гидротермальных источников в области разломов и спрединга земной коры. Для обнаружения космогенной пыли на дне океана нужен анализ осадков в областях, далеких от разломов. Такой анализ был проведен по результатам бурения глубокого дна Тихого океана в 329-м рейсе судна «JOIDES Resolution» [13]. Отбор кернов проходил в районах, далеких от гидротермальных источников, где скорость накопления осадков минимальна, ее порядок величины 1 м в млн лет.

В опубликованных результатах анализа полученных кернов содержатся кривые магнитной восприимчивости в зависимости от глубины. Магнитные свойства осадков пропорциональны содержанию в них окислов железа и в принципе могут соответствовать накоплению космогенных осадков. Трудность состоит в датировке отложений, ее геологические оценки относятся к большим временам — порядка десятка миллионов лет. Однако в результатах анализа содержатся также данные о гамма-излучении осадков. Для большинства глубинных кернов станций 1365–1371 они имеют ха-

рактерный вид быстрого убывания на первом метре осадка с максимальных значений до стационарного уровня. Этот уровень, очевидно, определяется содержанием в осадках радиоактивных солей урана, тория и калия с очень большими временами полураспада. За быстрый спад излучения может отвечать распад радиоуглерода ^{14}C (его период полураспада равен 5700 лет), сопровождаемый гамма-излучением с энергией 156 кэВ. Других естественных источников с близким периодом радиоактивности нет.

Рассмотрим в качестве примера данные станции 1367 (23°29' ю.ш., 135°56' з.д.; глубина 4285 м). Сопоставление гамма-излучения в керне с распадом радиоуглерода приводит к скорости накопления осадка, равной 1 м за 45 тыс. лет (рис.7). Для первых метров осадков она, по-видимому, точнее геологических оценок. Магнитную восприимчивость можно считать пропорциональной концентрации космического железа на дне океана. Но ее соответствие вариациям эксцентриситета за 250 тыс. лет особенно не впечатляет.

Возможные климатические следствия выпадения метеоритов

Нельзя сказать, что сравнение отложений пыли в антарктических льдах и в осадках океанского дна (см. рис.6, 7) с вариациями земного эксцентриситета выглядит убедительно для подтверждения нашей гипотезы о происхождении этих отложений из тел зодиакального света. Максимумы эксцентриситета $e(t)$ не соответствуют с достаточной точностью ни ледниковым эпохам (четным морским изотопным стадиям), ни максимумам концентрации нерастворимой пыли Антарктиды, ни точкам высокого содержания магнитной пыли на дне океана. Эти расхождения возможны по нескольким естественным причинам. Во-первых, циклы Миланковича не синхронизированы с эксцентриситетом ни в теории климата, ни в сравнении с экспериментальными данными. В теории периодичность эксцентриситета приходится дополнять вариациями угла наклона земной оси с периодом 41 тыс. лет и ее прецессией. А для сравнения с климатическими данными сделаны попытки, следуя Миланковичу, коррелировать температуру земной поверхности в прошлом с инсоляцией (освещенностью Солнцем) 65°с.ш. Высокая корреляция проявляется только между температурой и концентрациями парниковых газов, главным образом, с содержанием диоксида углерода CO_2 в атмосфере. Во-вторых, между ростом эксцентриситета, выходом тел на орбиты астероидов и их последующим выпадением

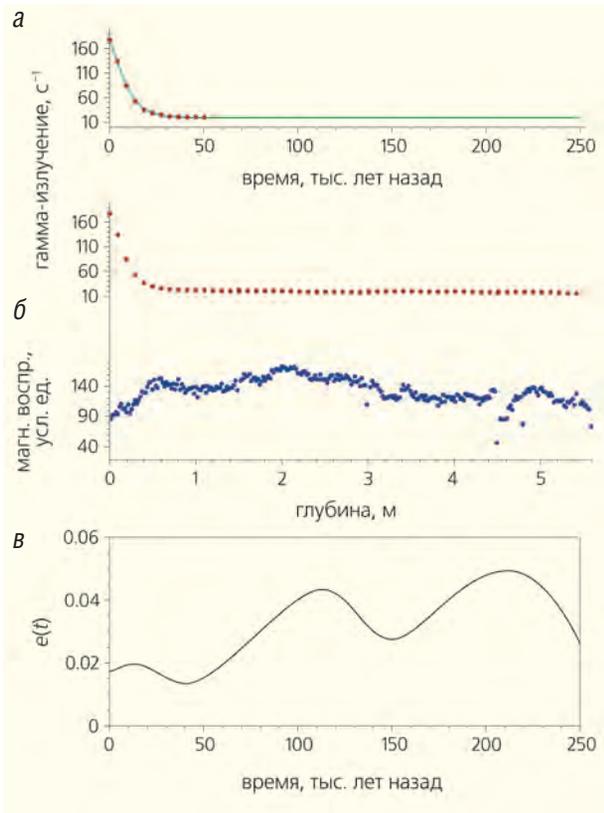


Рис.7. Анализ железосодержащих осадков со дна Тихого океана за последние 250 тыс. лет (станция 1367, 329-й рейс «JOIDES Resolution»): а — соответствие глубины бурения и времени отложения, установленное по радиоактивному распаду ^{14}C с периодом 5700 лет (зеленая кривая, наложенная на точки гамма-излучения); б — вариации гамма-излучения (красные точки) и магнитной восприимчивости (синие точки) в керне [13]; в — вариации эксцентриситета земной орбиты $e(t)$ [7].

на Землю и Луну естественны значительные промежутки времени в десятки тысяч лет по порядку величины. Наконец, даже если вся антарктическая пыль имеет космическое происхождение, выпадение крупных метеоритов в каждой точке земной поверхности случайно. Дальнейшие исследования магнитных свойств пыли и набор ее статистики могут улучшить корреляцию во времени.

Можно также подумать и об обратной причинной связи. Зададим вопрос, может ли выпадение на Землю метеоритной пыли с высоким содержанием железа и микроэлементов влиять на климат, а именно, вызывать периоды оледенений? Две причины в принципе могли бы этому способствовать. Во-первых, падение крупных метеоритов может вызвать эффект, близкий к «ядерной зиме»: аэрозоли в верхних слоях атмосферы будут способствовать образованию мощной облачности, которая

повышает альbedo Земли и понижает температуру ее поверхности. Во-вторых, обогащение океана солями железа и микроэлементов может способствовать росту фитопланктона, поглощающего CO_2 , что приводит к понижению парникового эффекта.

Обратим внимание, что значительному похолоданию и падению концентрации диоксида углерода 420–450 лет назад соответствует не только всплеск выпадения пыли в антарктических льдах, но и датированные данные о падении метеоритов на Антарктиду 480 [14, 15] и 430 тыс. лет назад [16].

В 1990 г. Дж. Мартин выступил с «железной гипотезой» [17], убедительно связав выпадение космического железа в прошлом с бурным ростом фитопланктона, поглощающего CO_2 , и последующим похолоданием. Эта публикация совпала по времени с началом борьбы с потеплением климата, так что был проведен эксперимент по обогащению участка океана солями железа. Опыт закончился неудачно: фитопланктон съел рассеянное железо и быстро выпал на дно, не вызвав заметного поглощения диоксида углерода. Тем не менее, сама идея вполне может быть дополнением климатической теории Миланковича, во многом случайным, но все же связанным с астрономическими вариациями земного эксцентриситета.

Проект полета к источникам зодиакального света

В январе прошлого года я докладывал работу [3] на семинаре академика В.Е. Фортова. После доклада он сказал, что нужно подготовить проект полета к телам подковообразных траекторий. К сожалению, обсудить с ним эту идею в деталях не удалось. У современных астрономов нет большого интереса к зодиакальному свету, он к нам слишком близок. После фундаментальной работы Н.Б. Дивари [2] появились только непринципиальные уточнения. В конце прошлого века значительный вклад в понимание структуры зодиакальной пыли внесла радиоастрономия, но даже точное расположение этой пыли пока не удалось однозначно установить [18, 19]. В ближайшем будущем размещение Космического телескопа имени Джеймса Уэбба НАСА в лагранжевой точке L2 предоставит возможность разглядеть

тела зодиакального света с близкого расстояния и с высоким разрешением. Одна только вероятность того, что это осколки образования Луны, сохранившиеся свыше 4 млрд лет в виде пылинок зодиакального света, — вероятность, пусть и неподтвержденная, — делает задачу их приборного исследования, структурного и химического анализа чрезвычайно содержательной.

Такое исследование: выбор траектории полета к зодиакальной пыли, ее экспресс-анализ, захват и возвращение образцов на Землю — не выглядит высокочувствительным. Способы достижения точек Лагранжа L1 или L2 системы Солнце—Земля известны. Небольшая корректировка траектории в нужном направлении и последующее торможение аппарата должны подвести его в область возврата большинства подковообразных траекторий. Ее точное положение нам пока неизвестно, по порядку величины оно находится на расстоянии 0.01 а.е. от Земли на ее орбите. В этой области аппарат нужно замедлить до нулевой скорости относительно нашей планеты. Далее исследуем тела зодиакального света, приближающиеся к аппарату с малыми скоростями. Выбрав подходящий по размерам, массе и составу (с содержанием магнетита) объект, подходим к нему ближе и включаем электромагнит; подтягиваем объект к стыковке, попутно уточняя его массу.

В пыли зодиакального света возможно проявление новых физических процессов, в том числе образование плазменных кристаллов. Интерес к этим телам может оказаться не только научным, но и коммерческим. Возникали несколько наивные рассуждения о том, насколько была бы выгодна добыча полезных ископаемых на астероидах. Обсуждалась также доставка с Луны гелия-3, возможно, полезного для термоядерной энергетики. Гелий-3 накопился в породах поверхности Луны по той причине, что в солнечном ветре отношение его концентрации к содержанию обычного гелия выше, чем на Земле. Но по этой же причине в рыхлых телах зодиакального света соотношение изотопов гелия также должно быть аномальным. Уловить пылинки нужного размера и состава и затем доставить их на Землю гораздо проще, чем собирать случайные микроскопические осколки взрыва на астероиде. ■

Автор выражает благодарность исследователям антарктических и гренландских льдов доктору технических наук Павлу Талалаю (Институт полярных наук и техники Цзилинского университета, Китай) и доктору Андерсу Свенссону (Anders Svensson; Институт Нильса Бора, Копенгагенский университет, Дания) за сообщение о выходе статьи [11] с анализом магнитной восприимчивости пыли в кернах льдов Антарктиды озера Восток и Купола С, а также доктору геолого-минералогических наук Евгению Гурвичу за указание важности результатов исследования материалов экспедиции 329-го рейса бурового судна «JOIDES Resolution» [13]. В этом рейсе были получены глубоководные металлоносные глины Южной котловины Тихого океана, которые накапливались с экстремально низкими скоростями.

Литература / References

1. *Jorgensen J.L., Benn M., Connerney J.E.P. et al.* Distribution of interplanetary dust detected by the Juno spacecraft and its contribution to the zodiacal light. *JGR Planets*. 2021; 126(3): e2020JE006509. DOI:10.1029/2020JE006509.
2. *Дивари Н.Б.* Зодиакальный свет. *УФН*. 1964; 84: 75–98. [*Divari N.B.* Zodiacal light. *Sov. Phys. Usp.* 1965; 7: 681–695. DOI:10.1070/PU1965v007n05ABEH003657.]
3. *Бялко А.В., Кузьмин М.И.* Осколки образования Луны: геофизические следствия Гигантского столкновения. *ЖЭТФ*. 2019; 156(4): 603–614. [*Byalko A.V., Kuzmin M.I.* Fragments of the Moon formation: geophysical consequences of the Giant Impact. *J. Exp. Theor. Phys.* 2019; 129: 511–520. DOI:10.1134/S1063776119100182.]
4. *Hollabaugh M., Everhart E.* Earth horseshoe orbits. *Astrophysical Letters*. 1973; 15: 1–5.
5. *Ballouz R.-L., Walsh K.J., Barnouin O.S. et al.* Bennu's near-Earth lifetime of 1.75 million years inferred from craters on its boulders. *Nature*. 2020; 587: 205–210. DOI:10.1038/s41586-020-2846-z.
6. *Quinn T.R., Tremaine S., Duncan M.* A three million year integration of the Earth's orbit. *Astronomical Journal*. 1991; 101: 2287–2305.
7. *Laskar J., Joutel F., Boudin F.* Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr. *Astronomy and Astrophysics*. 1993; 270: 522–533.
8. *Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B. et al.* High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*. 2008; 453: 379–382. DOI:10.1038/nature06949.
9. *Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999; 399: 429–436. DOI:10.1038/20859.
10. *Lambert F., Delmonte B., Petit J.R. et al.* Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature*. 2008; 452: 616–619. DOI:10.1038/nature06763.
11. *Lanci L., Delmonte B., Salvatore M.C., Baroni C.* Insight into provenance and variability of atmospheric dust in Antarctic ice cores during the late Pleistocene from magnetic measurements. *Frontiers in Earth Science*. 2020; 8: 258. DOI:10.3389/feart.2020.00258.
12. *Гурвич Е.Г.* Металлоносные осадки Мирового океана. М., 1998. [*Gurvich E.G.* Metalliferous Sediments of the World Ocean. Moscow, 1998. (In Russ.)]
13. *D'Hondt S., Inagaki F., Zarikian C.A. et al.* Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. Volume 329 Expedition Reports. 2010. DOI:10.2204/iodp.sp.329.2010.
14. *Misawa K., Kohno M., Tomiyama T. et al.* Two extraterrestrial dust horizons found in the Dome Fuji ice core, East Antarctica. *Earth Planetary Science Letters*. 2010; 289: 287–297. DOI:10.1016/j.epsl.2009.11.016.
15. *Van Ginneken M., Folco L., Perchiazzi N. et al.* Meteoritic ablation debris from the Transantarctic Mountains: Evidence for a Tunguska-like impact over Antarctica ca. 480 ka ago. *Earth Planetary Science Letters*. 2010; 293: 104–113. DOI:10.1016/j.epsl.2010.02.028.
16. *Van Ginneken M., Goderis S., Artemieva N. et al.* A large meteoritic event over Antarctica ca. 430 ka ago inferred from chondritic spherules from the Sor Rondane Mountains. *Science Advances*. 2021; 7(14): 1008–1019. DOI:10.1126/sciadv.abc1008.
17. *Martin J.H.* Glacial-interglacial CO₂ change: The Iron Hypothesis. *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 1990; 5(1): 1–13. DOI:10.1029/PA005i001p00001.
18. *Reach W.T.* Zodiacal emission. I. Dust near the Earth's orbit. *Astrophysical Journal*. 1988; 335: 468–485.
19. *Reach W.T.* Zodiacal Emission. II. Dust near ecliptic. *Astrophysical Journal*. 1991; 369: 529–543.

The Bodies of the Zodiacal Light: Origin, Evolution, Fallout to Earth

A.V.Byalko

Landau Institute for Theoretical Physics, RAS (Moscow, Russia)

This work continues a series of articles that consider the fragments of the Giant Impact, which resulted in the Moon formation. We believe that one of the consequences of the Giant Impact was a release of a significant amount of these fragments into horseshoe-shaped orbits, which were calculated by solving the Three-Body Problem. The observed intensity of the zodiacal light was theoretically explained by the reflection of sunlight from particles moving in many horseshoe-shaped orbits, their reflecting surface was estimated, a hypothesis that explain the increase in the fallout of meteorites in those periods when the eccentricity of the Earth's orbit is close to its maximum was asserted. This assumption was confirmed by Italian scientists during their studies on magnetic properties of dust in Antarctic ice cores. In this article we analyze deposits of cosmic dust in the depths of the Pacific Ocean. The evidence is presented along with a causal statement showing how variations in the Earth's eccentricity enhance the orbiting of the zodiacal bodies to trajectories of the Apollo and Aton asteroids, which are likely to collide with our planet. The possibility of a research mission to the bodies of the zodiacal light is also discussed.

Keywords: Three-Body Problem, Lagrange points, horseshoe-shaped orbits, orbits of Apollo and Aton asteroids, cosmic dust, Earth's eccentricity.