

УДК 523
**ТЕОРИЯ
ПРОИСХОЖДЕНИЯ
ЗЕМЛИ
2-й ПОЛОВИНЫ
XX ВЕКА
И НАЧАЛА
XXI ВЕКА**

Е. Л. Рускол

*Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Москва, Россия*

Ключевые слова: происхождение Земли и планет, протопланетное (допланетное) облако, планетезимали, планетная космогония.

АННОТАЦИЯ Дан очерк развития теории происхождения Земли и планет, начиная с середины XX в. Современные представления об образовании планетной системы из околосолнечного газопылевого облака (диска) восхо-

дят к классической небулярной гипотезе Канта–Лапласа. Благодаря достижениям астрофизики, планетологии, космохимии, наук о Земле и космическим исследованиям сделано много открытий, обогатилось понима-

ние основных процессов, происходивших в ранней Солнечной системе. Отмечается важная роль отечественных ученых в создании «стандартной» модели происхождения Земли и планет.

ВВЕДЕНИЕ

К середине XX в. в науках о Земле и исследованиях Солнечной системы возникла практическая потребность в понимании происхождения планет, т.е. в развитии планетной космогонии. Уже более 60 лет в мировой науке в острых дискуссиях вырабатывается так называемая «стандартная» модель этого процесса. В ее основе – небулярная гипотеза, от слова nebula (туманность, облако), предложенная еще в XVIII в. И. Кантом и П.С. Лапласом. Планеты формируются в околосолнечном газопылевом облаке (диске). У данной модели не видно альтернативы ни для нашей системы, ни для систем у других звезд.

Стандартная модель должна объяснить основные особенности Солнечной системы. Это обращение в одном направлении всех восьми планет вокруг Солнца по почти круговым орбитам, расположенным практически в единой плоскости, закономерное увеличение промежутков между орбитами по мере удаления от Солнца и соответствующее распределение углового момента системы: 98% в орбитальном движении планет и только 2% у вращения Солнца вокруг оси, при массе Солнца в 750 раз превышающей массу всех остальных тел его системы. Необходимо обосновать деление планет на группу планет земного типа и две подгруппы планет-гигантов (Юпитер–Сатурн и Уран–Нептун); наличие поясов астероидов между Марсом и Юпитером и за орбитой Нептуна; образование спутников у планет и у астеро-

идов; происхождение комет и метеоритов. Современная планетная космогония должна также объяснить химический и изотопный состав тел, их внутреннее строение, т.е. дифференциацию на тяжелые ядра и более легкие оболочки, строение поверхностей и состав атмосфер. Все построения должны быть согласованы с оценками возраста Солнца, метеоритов, земных и лунных пород, показывающих, что Солнечная система существует уже 4.6 млрд. лет. Не все из перечисленных свойств планет Солнечной системы характерны для экзопланет, т.е. планет у других звезд, и этому также необходимо дать объяснение.

К середине XX в. общепринятой теории образования планет не существовало. В учебных пособиях по астрономии обычно приводилась историческая сводка гипотез о небулярном либо катастрофическом происхождении планет и излагалась гипотеза о горячих гигантских протопланетах «солнечного» состава, из которых путем утечки газов (водорода, гелия, азота и инертных газов) образовались планеты (в том числе и Земля). Эта гипотеза противоречила фактическим данным о строении и химическом составе планет земной группы и планет-гигантов, поскольку ни один из известных физических механизмов не мог обеспечить требуемую утечку газов. Земля в этой концепции должна была бы «стартовать» с массой в 500-600 раз больше современной, а Юпитер – с шестикратной массой. Стро-

ение Земли и ее тектоника не соответствовали ее предполагаемому огненно-жидкому началу, при котором расслоение на оболочки было бы более совершенным, а современная геотектоника более слабой.

Вопрос о происхождении Земли и планет является комплексной проблемой многих наук. Начиная с середины XX в. ученые разных специальностей активно искали пути ее решения. Наибольшее влияние на развитие теории происхождения Земли оказали работы ученых на публикуемых портретах. О каждом из них можно написать большую книгу. Они выполнили фундаментальные

исследования в астрономии, математике, физике, химии, науках о Земле. Каждый из них создал собственный сценарий происхождения Солнечной системы. Их взгляды различались, но они послужили основой для дальнейшего развития планетной космогонии. В публикуемом ниже историческом очерке невозможно описать все перипетии международных дискуссий, где отработывались современные представления о ранней истории Солнечной системы. В них нашли отражение многие идеи ученых – основоположников планетной космогонии 2-й половины XX века.

Инициатива О.Ю. Шмидта в исследовании происхождения Земли и планет из небольших твердых тел [Шмидт, 1944, 1949, 1950, 1957] возникла в основном из потребностей наук о Земле, и была встречена в научных кругах неоднозначно. Тем не менее после острой дискуссии в 1951 г. на I Всесоюзном совещании по космогонии, где основным докладчиком был О.Ю. Шмидт, а его основным оппонентом В.Г. Фесенков – сторонник горячих протопланет [Труды..., 1951], в нашей стране началось планомерное изучение проблемы. В то время большое значение придавалось идеологической стороне вопроса. Была создана Комиссия по космогонии при Президиуме АН СССР. Председателем комиссии был назначен акад. В.А. Амбарцумян, в задачи комиссии входила координация планов научных учреждений по космогонии, без какой-либо дискриминации научных идей; а также организация общесоюзных совещаний. Позднее, к 1960 г., комиссия перешла в ведение Астросовета АН СССР и разделилась на три подкомиссии: по звездной космогонии под руководством В.А. Амбарцумяна и А.Г. Масевич, по планетной космогонии под руководством акад. В.Г. Фесенкова и по релятивистской астрофизике под руководством акад. Я.Б. Зельдовича. Комиссия работала до начала 1970-х годов.

В СССР было организовано издание специальных научных сборников «Вопросы космогонии» [1952-1964], содержание которых, после перевода на английский язык, было высоко оценено зарубежными специалистами. Был несколько расширен отдел эволюции Земли в Геофизическом институте АН СССР (ГЕОФИАН), где под руководством академика О.Ю. Шмидта работали астрономы, физики, геофизики и математики (всего около 10 специалистов). После реор-

ганизации ГЕОФИАНа в 1956 г. этот отдел входит в Институт физики Земли АН СССР (ИФЗ), носящий имя своего создателя.

О.Ю. Шмидт разделил проблему происхождения Солнечной системы на три части: а) происхождение звезды (Солнца) и допланетного облака (диска), б) образование планет в уже существующем околосолнечном облаке (центральная задача планетной космогонии) и в) догеологическая история Земли, аккумулирующей из небольших твердых тел. Как показало время, такое методическое расчленение проблемы себя оправдало, так как вопрос об образовании звезд с дисками стал проясняться на четыре десятилетия позже. Сам О.Ю. Шмидт, как известно, вначале отстаивал гипотезу захвата допланетного облака Солнцем, против которой астрономы выдвинули ряд веских доводов. И вопрос о происхождении облака был на время оставлен «за кадром».

Планомерное изучение центральной задачи (эволюции облака) и геофизических последствий роста Земли привело к тому, что важные результаты в данной области были получены в нашей стране на 10–15 лет раньше, чем в развитых странах Запада и в Японии.

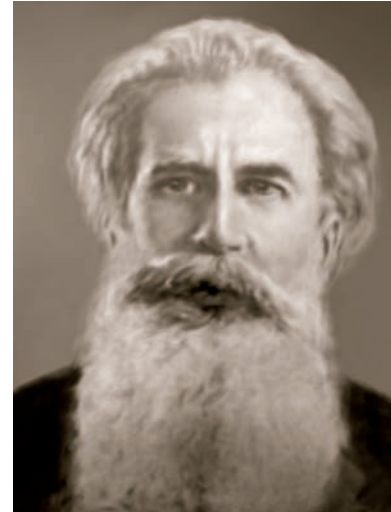
В 1958 г. в Москве проходила X Генеральная Ассамблея Международного астрономического союза, в рамках которой был проведен неформальный симпозиум по происхождению Солнечной системы. В нем приняли участие около 300 отечественных и зарубежных специалистов, в том числе ведущие астрофизики и геофизики мира, которые занимались планетной космогонией: Г. Джеффрис, Ф. Хойл, Р. Литтлтон (Англия), Г.К. Юри, Дж.П. Койпер, Ф. Уиппл, А. Камерон (США), Э. Шацман (Франция), отечественные астрономы В.А. Крат,

■ ШКОЛА
О.Ю. ШМИДТА

Основатели
планетной космогонии
2-й половины XX в.



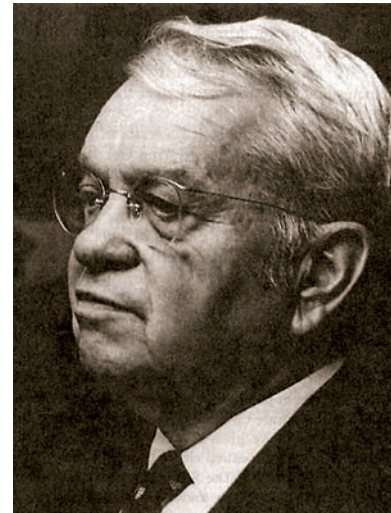
В.Г. ФЕСЕНКОВ
(1889–1972)



О.Ю. ШМИДТ
(1891–1956)



А.П. ВИНОГРАДОВ
(1895–1975)



Г.К. ЮРИ
(1893–1981)



ДЖ.П. КОЙПЕР
(1905–1973)



Х. АЛЬВЕН
(1908–1995)



Ф. Хойл
(1915–2001)



Дж. Везерилл
(1925–2006)



А. КАМЕРОН
(1928–2005)



Л.Э. Гуревич
(1904–1990)



А.И. ЛЕБЕДИНСКИЙ
(1913–1967)



Б.Ю. ЛЕВИН
(1912–1989)

А.И. Лебединский, многие сотрудники советских астрономических учреждений и, конечно, сотрудники ИФЗ (организатором симпозиума был Б.Ю. Левин, который руководил отделом эволюции Земли после кончины О.Ю. Шмидта в 1956 г.). Одним из ярких моментов симпозиума был спор между Г. Юри и Дж. Койпером, напоминавший дискуссию между академиками О.Ю. Шмидтом и В.Г. Фесенковым в 1951 г. [Труды... 1951]. Г.К. Юри с горячностью отстаивал холодную аккумуляцию Земли, а Дж. Койпер, который был автором вошедшей в американские учебники гипотезы о массивных протопланетах, т.е. сторонником первично расплавленной Земли, с холодным спокойствием выслушивал критику Г.К. Юри¹.

На русском языке материалы симпозиума вышли в 1960 г. [Вопросы ..., 1960, Т. 7].

В 1964 г. в популярной брошюре Б.Ю. Левиным [1964] была впервые опубликована схема эволюции газопылевого допланетного облака (рис. 1). Как отметил автор, она основана на работах О.Ю. Шмидта, Л.Э. Гуревича, А.И. Лебединского и на 15-летнем цикле работ сотрудников ИФЗ АН СССР: Б.Ю. Левина, В.С. Сафронова и Е.Л. Рускол. В качественном виде она остается пригодной и до сих пор.

В большой работе ленинградских физиков Л.Э. Гуревича и А.И. Лебединского [1950] впервые в количественной форме была исследована эволюция газопылевого уплощенного облака с небольшой массой по сравнению с солнечной, где образуются не газовые протопланеты, а первичные пылевые сгущения, которые превращаются в твердые тела – планетезимали. Их работа была выполнена практически одновременно со сходным исследованием ирландского астронома К. Эджворта [Edgeworth, 1949]. В этой его работе, в частности, содержится предположение о существовании пояса небольших тел за орбитой Нептуна, более чем

за 40 лет до открытия пояса. (В литературе часто встречается название «пояс Койпера», но надо иметь в виду, что Койпер опубликовал собственные соображения о наличии пояса в 1951 г., тогда как Эджворт писал об этом начиная с 1943 г. Поэтому более справедливо название «пояс Эджворта–Койпера».)

Работы, опубликованные в 1949–50 гг. в разных странах авторами, не принадлежавшими к школе О.Ю. Шмидта, свидетельствовали о возрождении в мире интереса к небулярной модели происхождения Солнечной системы, в противовес известной с начала XX в. катастрофической модели Дж. Джинса. При этом они гармонично сочетались с гипотезой О.Ю. Шмидта об образовании Земли из небольших твердых тел. Тогда было еще далеко до современного облика всей концепции. В работе Л.Э. Гуревича и А.И. Лебединского еще не предполагалась диссипация газа из диска, не был проработан вопрос об эволюции сгущений, а К. Эджворт принимал, что сгущения возникают при крайне заниженных значениях критической плотности пылевого слоя, и затем превращаются в планетезимали лишь под действием торможения их вращения солнечными приливами и т.п.

Сотрудники ИФЗ шаг за шагом исследовали эволюцию протопланетного диска. Было показано, что в нем отсутствовали условия для долгого поддержания крупномасштабной турбулентности – основного действующего механизма в известной в 1940-е годы гипотезе немецкого физика К. фон Вайцзеккера. Она также строилась на небулярной модели, в которой планеты образовывались на стыках гигантских газовых вихрей. При отсутствии таковых вращение диска должно было быть ламинарным. Это делало неизбежным оседание пыли сквозь газ и образование уплотненного пылевого субдиска в центральной плоскости [Сафронов, Рускол, 1957], что и показано на рис. 1. Торoidalная форма диска обусловлена тем, что линии равной плотности на разрезе имеют форму «лежачей восьмерки». Плотность вещества всего диска и его субдиска убывает в вертикальном направлении в обе стороны от центральной плоскости по очень крутой экспоненте вследствие доминирующего влияния силы притяжения Солнца. В радиальном же направлении плотность убывает по другой причине: потому что заполнение диска веществом «реконструируется» по распределению массы в современной планет-

¹ Г.К. Юри (1893–1981) – выдающийся космохимик и планетолог, Нобелевский лауреат по химии (1934 г.) за открытие им дейтерия в 1932 г., участник проекта по созданию первой американской атомной бомбы, вдохновитель американской лунной программы «Аполлон». Дж.П. Койпер (1905–1973) – выдающийся американский астроном голландского происхождения. Открыл спутник Урана – Миранду и спутник Нептуна – Нереиду, обнаружил метановую атмосферу на спутнике Сатурна – Титане, основал Аризонскую лунно-планетную лабораторию, организовал летающую обсерваторию, предсказал в 1951 г. существование пояса малых тел за орбитой Нептуна. В честь обоих ученых учреждены именные премии, ежегодно присуждаемые Американским Астрономическим Обществом за достижения в планетологии и космогонии.

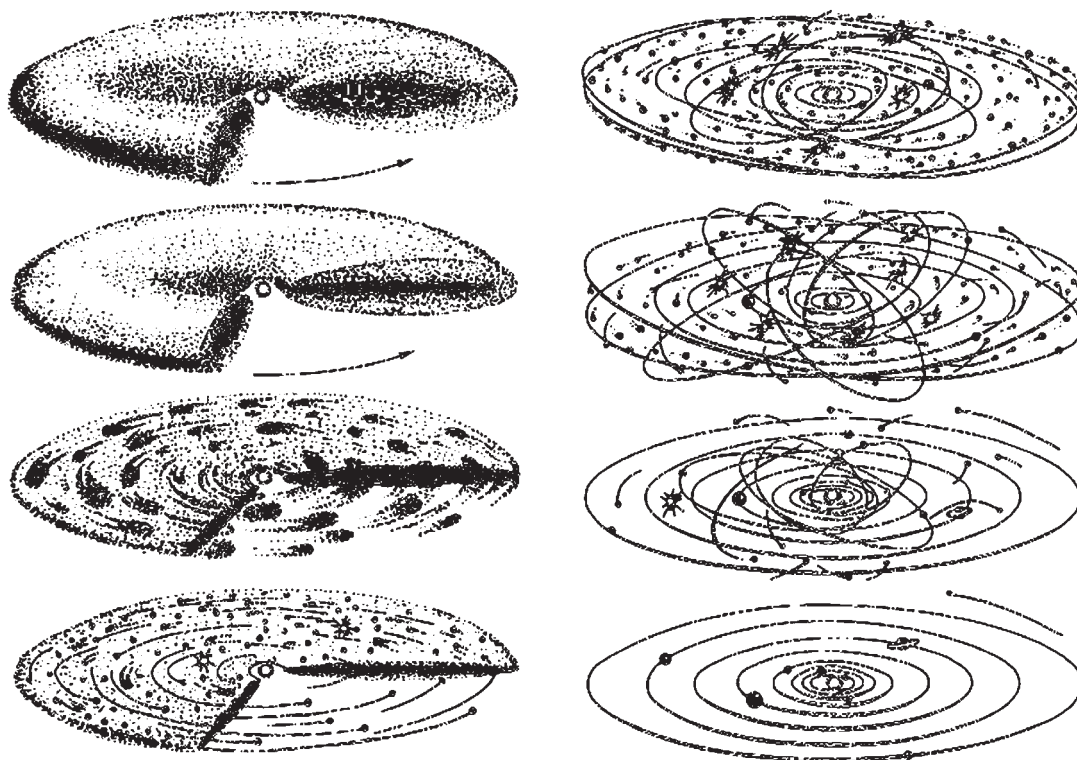


Рис. 1.
Схема эволюции допланетного газопылевого облака в систему планет [Левин, 1964]

ной системе. Распад пылевого субдиска на сгущения возможен только при достижении критической плотности, весьма высокой по значению. Так, плотность пылевой составляющей в центральной плоскости диска в зоне Земли должна была на два порядка превосходить плотность газа. Критерий гравитационной неустойчивости для диска конечной толщины, с дифференциальным вращением вокруг центральной массы, был впервые выведен В.С. Сафроновым [1960а], что позволило определить массы первичных пылевых сгущений². В рассматриваемой в ИФЗ модели гравитационная неустойчивость в газе не достигалась, и гигантские протопланеты солнечного состава образовываться не могли [Рускол, 1960а].

На рис. 1 схематически изображено превращение множества разреженных пылевых сгущений в рой твердых планетезималей. К этому в первую очередь приводило слияние

сгущений при столкновениях: в среднем их масса увеличивалась в большей степени, чем собственный угловой момент, т.е. они должны были сжиматься [Сафронов, 1960б]. Торможение солнечными приливами первоначального вращения сгущений, о котором писал еще К. Эджворт [Edgeworth, 1949] также действовало в сторону их уплотнения. Но этот эффект мог проявляться лишь в ближней к Солнцу зоне земных планет, поскольку действие приливного трения обратно пропорционально высокой степени расстояния между телами. В зоне земных планет и двух ближних планет-гигантов процесс превращения сгущений в рой твердых тел – планетезималей был относительно коротким – порядка 100 тыс. лет.

На три порядка дольше длилась аккумуляция планетезималей в планеты, изображенная в правой части рис. 1. Закон распределения масс твердых тел, изменявшийся в процессе роста тел, изучался с помощью теории коагуляции, с учетом тяготения крупных тел [Сафронов, 1962а]. Рост дисперсии скоростей тел, вызванный гравитационными возмущениями со стороны крупнейших из них, оценивался с помощью методов звездной динамики [Сафронов, 1962б]. Вся схема аккумуляции планет подтверждала сделанную В.С. Сафроновым [1954] оценку времени роста 98% массы Земли – 108 лет. Отметим, что эта ранняя оценка в течение

² Вот как спустя 40 лет оценивает этот критерий акад. А.М. Фридман [2002]: «Значение этого критерия трудно переоценить. Четыре года спустя А. Тоомре решил более узкую задачу – нашел критерий устойчивости бесконечно тонкого диска относительно радиальных возмущений. Этот критерий носит сейчас имя Тоомре. Работа В.С. Сафронова, более общая по своей постановке, менее известна. Однако эта классическая работа 1960 г. «О гравитационной неустойчивости в плоских вращающихся системах с осевой симметрией» далеко выходит за рамки планетной космогонии, она крайне важна как для галактических дисков, так и для всей динамики гравитирующих дисков».

ряда лет многими авторами подвергалась ревизии в сторону уменьшения, но устояла и в настоящее время находится в согласии с данными изотопной космохимии.

На приведенной на рис. 1 схеме не могли «поместиться» астероиды, кометы и спутники, происхождение которых также исследовалось в те годы в ИФЗ [Шмидт, 1954; Левин, 1960; Рускол, 1960б, 1963]. Вопрос о происхождении газопылевого диска вокруг Солнца все еще оставался открытым.

Одновременно с изучением эволюции диска в ИФЗ интенсивно изучалась термическая история и внутреннее строение Земли и планет в соответствии с концепцией О.Ю. Шмидта о «холодном» образовании. Очень важно, что впервые оценивалась начальная температура Земли, аккумулирующей из планетезималей. Было выведено специальное уравнение для нагревания шара с движущейся границей, где теплопроводность определялась коэффициентом перемешивания при ударном образовании кратеров на поверхности. Было показано, что наибольший вклад в нагревание Земли вносили падавшие тела с размерами крупных астероидов и массой порядка 0.001 земной. Такая оценка масс «импакторов» следовала из анализа распределения углов наклона осей вращения Земли и планет к оси эклиптики (позже массу падавших тел увеличили на 1–2 порядка, см. ниже). Для сравнения: ось Урана могла быть наклонена в результате удара тела с массой Земли, ось Сатурна – тела с 4–5 массами Земли [Сафронов, 1965] – этот результат был подтвержден им позднее совместно с Дж. Лиссауэром [Lissauer, Safronov, 1991].

Образование Земли оказывалось не столь уж «холодным»: в верхней мантии достигалась температура плавления силикатов. Значит, уже в ходе роста из планетезималей смешанного состава планетное тело подвергалось расслоению. Изотопные данные по Hf/W [Yin et al., 2002; Kleine et al., 2002] указывают на раннее отделение железа от силикатов внутри родительских тел метеоритов и в недрах планет земной группы.

Этот результат изотопной космохимии свидетельствует в пользу гомогенной аккумуляции, которая в модели ИФЗ всегда считалась более приемлемой, чем гетерогенная аккумуляция, с изначальным выделением железных масс. Последняя может проявляться в небольших масштабах, когда металлические частицы при столкновениях спаиваются, а силикатные дробятся и отстают в росте от первых. Но для роста крупных масс намного

важнее их тяготение. Невозможно сначала вырастить железные ядра планет, а затем наслоить на них силикатные оболочки. Железное ядро Земли в три раза превосходит по массе планету Марс. Формируясь в диске самостоятельно, оно должно было бы присоединять к себе тела любого состава, в том числе каменные, задолго до приобретения современной массы.

В настоящее время аккумуляция планет земной группы с участием очень крупных тел смешанного состава по описанному сценарию – магистральное направление в планетной космогонии во всем мире. Предполагается, что крупные допланетные тела, благодаря короткоживущим радиоактивным элементам, уже прошли через раннее разогревание и, как правило, расслоились на железные ядра и каменные оболочки. Новые расчеты делаются для все более крупных «импакторов», например для растущей Земли с массой 2/3 современной, столкнувшейся с телом в 3/7 ее массы. [Origin ..., 2000].

Еще в 1960-е годы в модели ИФЗ был сделан вывод о двухступенчатом росте планет-гигантов [Сафронов, 1969]. Прямая конденсация протопланет из газопылевого облака была бы возможна лишь при гравитационной неустойчивости в газе, для чего не было условий. Первой ступенью роста служила аккумуляция ядер планет из конденсируемых веществ (силикаты, металлы, льды). Второй ступенью роста была аккреция газов водорода и гелия на ядро. Теория газовой аккреции была разработана ранее английскими учеными для звезд, окруженных газовой туманностью. Идея о двухступенчатом росте Юпитера и Сатурна и сейчас более предпочтительна и лежит в основе многих современных расчетов [Витязев и др., 1990; Lissauer, Stevenson, 2007].

С начала 1970-х годов интерес к планетной космогонии на Западе резко возрос благодаря успешным экспедициям на Луну и к ближайшим планетам. Во многих научных центрах США, Японии, Италии начало развиваться компьютерное моделирование эволюции диска. Основные результаты, полученные в ИФЗ с помощью аналитических методов и до-компьютерной техники, подтверждались позже при более совершенных вычислениях. Признание стало возможным после выхода в 1972 г. в США перевода книги В.С. Сафронова [1969] и после международной конференции 1972 г. в Ницце, где его модель была признана (из представленных шести) наиболее динамически обоснованной [On the origin ... 1972].

В 1980-е годы в ИФЗ была исследована теоретическая схема совместного образования допланетного облака и Солнца [Рузмайкина, Маева, 1986], что было весьма назревшим. В конце 1980-х годов с помощью наблюдений были открыты газопылевые диски, вращающиеся вокруг молодых звезд типа Т Тельца, с массой, близкой к солнечной. Параметры дисков оказались сходными с величинами в теоретической модели Шмидта–Сафронова для допланетного облака (размеры – в десятки и сотни а.е., массы – от 0.001 до 0.1 массы звезды [Beckwith et al., 1990]). Естественно было принять, что в этих дисках, генетически связанных со звездами образуются планеты по сценарию, уже разработанному для единственного известного прежде объекта – Солнечной системы. Модель Шмидта–Сафронова получила статус стандартной модели³.

Американские историки планетной космогонии пристально следили за развитием этой области науки в СССР (см., например, [Brush, 1990]). В 1995 г. в США была издана книга переводов более 120 статей отечественных авторов (в том числе 13 публикаций О.Ю. Шмидта) под заголовком «Происхождение Солнечной системы. Советские исследования (1925–1991)» [The origin ..., 1995]. На обложке книги – схема Б.Ю. Левина (рис. 2). Книга снабжена обстоятельными вводными статьями историков науки А.Е. Левина и С. Браша, а также фотографиями сотрудников ИФЗ периода 1980-х годов (рис. 3). Аннотация к книге гласит: «Труды советских ученых оказали сильнейшее влияние на исследования происхождения Солнечной системы на Западе в 1970-е и 1980-е годы. Однако переводы оригинальных русских публикаций по планетной космогонии, включая основополагающие труды Отто Шмидта, не были легко доступными. Теперь эти работы собраны в едином издании, которое дает большой объем увлекательной и полезной информации и для ученых и для историков науки».

Планетная космогония неразрывно связана со сравнительной планетологией. Расцвет этой новой науки обязан прогрессу космических исследований в зоне земных

³ В 1989 г. Международным метеоритным обществом В.С. Сафронов был награжден медалью Леонарда, а Международный астрономический союз (МАС) присвоил астероиду № 3615 имя Safronov; в 1990 г. Американское астрономическое общество наградило его премией им. Койпера.

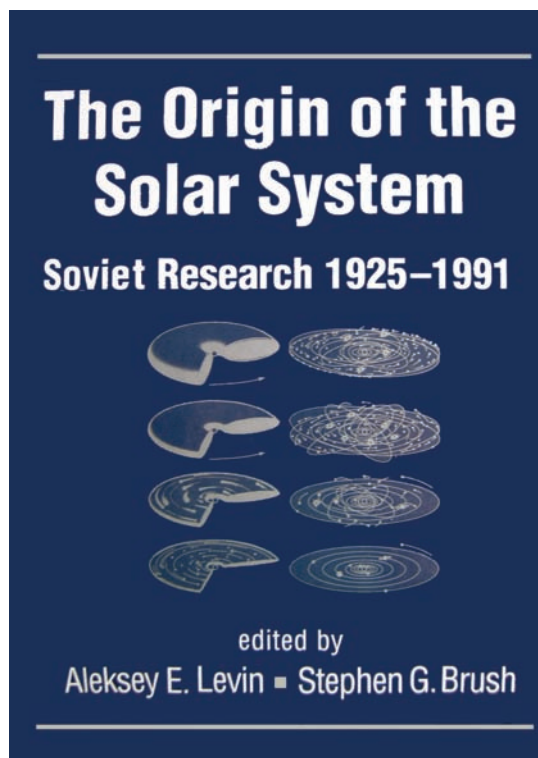


Рис. 2. Обложка книги переводов статей отечественных авторов, изданной в США [The origin ..., 1995]

Книга получила положительную оценку в рецензии У.М. Каула [Kaula, 1996] в журнале «Icarus», где, впрочем, было высказано сожаление, что в ней среди более чем 30 работ В.С. Сафронова не помещена его монография 1969 г. и не нашли отражения работы советских космохимиков и геохимиков, важные для планетной космогонии. (Этот упрек справедлив: в сборник не вошли многие работы, выполненные в 1950–1980-е годы под руководством акад. А.П. Виноградова в ГЕОХИ АН СССР. – Е.Р.). Рецензент отмечает, что учитывая приоритет физико-механических процессов, изученных в переведенных работах, более правильно было бы озаглавить книгу «Динамика происхождения Солнечной системы». Отметим, что за 1986–2005 гг. число ссылок в научной периодике (в основном западной) на работы В.С. Сафронова составило более полутора тысяч.

планет и в отдаленных областях Солнечной системы, а также изучению астероидов и метеоритов. Важный вклад в создание и развитие планетологии внесли ученые из российских институтов: ГЕОХИ РАН, ИКИ РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ИПМ РАН, ИФЗ РАН и др. С 1970 г. ежегодно публикуются сотни научных сообщений со всего мира о новых открытиях – в трудах Хьюстонских лунно-планетных конференций в США, в

ПЛАНЕТНАЯ КОСМОГОНИЯ В КОНЦЕ XX ВЕКА

Рис. 3.
Школа О.Ю. Шмидта –
сотрудники Института
физики Земли АН СССР,
1980-е годы
[The origin..., 1995].
Слева направо и сверху
вниз: А.Б. Макалкин,
Е.Л. Рускол, В.С. Саф-
ронов, Т.В. Рuzмайкина,
А.В. Витязев, Г.В. Печер-
никова и О.Ю. Шмидт
(снимок 1912 г.).



Andrei Borisovich Makalkin.
Senior Research Scientist,
Schmidt Institute of Physics of the
Earth, Moscow.



Evgenia L. Ruskol. Senior
Research Scientist, Schmidt
Institute of Physics of the Earth,
Moscow.



Victor Sergeevich Safronov.
Chief Scientist, Schmidt Institute
of Physics of the Earth, Moscow.



**Tamara Vladimirovna
Ruzmaikina.** Senior Research
Scientist, Schmidt Institute of
Physics of the Earth, Moscow.



Andrei Vasilyevich Vitязev.
Head of the Laboratory "Origin
of the Earth and Planets" at the
Schmidt Institute of Physics of the
Earth, Moscow.



Galina Victorovna Pechernikova.
Senior Research Scientist at the
Schmidt Institute of Physics of the
Earth, Moscow.



**Otto Iulevich Schmidt (1912
photograph).**

журналах «Icarus» (США), «Planetary and Space Science» (Европа), в «Астрономическом Вестнике» (Россия) – и это лишь те издания, которые полностью отданы исследованиям Солнечной системы. Важнейшие результаты публикуются в ведущих научных изданиях более широкого профиля.

Планетная космогония сомкнулась также со звездной космогонией, т.е. с теорией

звздообразования. В современной Галактике с помощью новейших астрономических приборов наблюдается процесс образования звезд, сопровождаемый выделением дисков, из общих гигантских молекулярных облаков. По-видимому, есть прямая аналогия между этим процессом и образованием нашей планетной системы 4.6 млрд. лет назад, так как условия в тогдашней Галактике

кардинально не отличались от современных. Научным исследованиям комплексной проблемы происхождения звезд с планетами посвящена серия фундаментальных международных монографий [Protostars and Planets, I–V, 1978-2007], издаваемых Аризонским Университетом в США. Для околозвездных дисков введен специальный термин *proplyds* (*protoplanetary disks*).

Теория и наблюдения однозначно показывают, что планетные тела могут конденсироваться лишь в условиях достаточно высокой плотности вещества, которая достигается в Галактике только в близких окрестностях звезд. Сами звезды (с массами порядка массы Солнца) конденсируются за время порядка 1 млн. лет, и чем массивнее звездный объект, тем быстрее он сжимается. Пока идет формирование звезды, в окружающем аккреционном диске и внешней оболочке должно происходить интенсивное перетекание вещества в радиальном и вертикальном направлениях. В целом рост звезды и ее превращение в светящееся тело заканчивается

быстрее, чем протекает рост планет. Все это свидетельствует о зависимости планетообразования от роста звезд. Найдено важное ограничение на продолжительность процесса роста планет: те из них, которые содержат газ, должны успеть сформироваться за время порядка 10 млн. лет – таково наиболее типичное время жизни газовой составляющей у наблюдаемых дисков (оно варьирует от 1 до 100 млн. лет).

Планетные системы, обнаруживаемые у других звезд, не похожи на Солнечную систему. Экзопланеты – это крупные тела, по массе подобные Юпитеру и обращающиеся на близких расстояниях (зачастую – менее 1 а.е.) от звезд, по орбитам со значительным эксцентриситетом. Наблюдения пока что способны уловить периодические смещения центра масс звезда–планета (или планеты) только у подобных систем. Прогресс наблюдений позволяет надеяться на обнаружение менее массивных и более удаленных планет, т.е. найти системы подобные Солнечной.

Во 2-й половине XX в. стало ясно, что устарели многие привычные еще с прошлых веков взгляды на природу тел Солнечной системы.

Изменилось толкование «закона Тициуса–Боде», или что то же, «закона планетных расстояний». В его наиболее простом виде расстояние планеты от Солнца (а.е.) выражается формулой:

$$a = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n,$$

где n – номер планеты (у Венеры – 0, у Земли – 1 и т.д.). Как известно, «закон планетных расстояний» предсказывал наличие планеты на расстоянии $a = 2.8$ а.е. (где вместо единой планеты обращается множество астероидов) и давал сильное расхождение для расстояния Нептуна (39 а.е. вместо фактических 30 а.е.). Но в остальном он приблизительно соответствовал наблюдаемому прогрессивному раздвиганию промежутков между орбитами планет. Это порождало различные объяснения – от магии чисел до привлечения физических законов (приливное взаимодействие крупных протопланет – у Дж. Койпера, осреднение удельных угловых моментов аккумулирующихся планетезималей – у О.Ю. Шмидта). В системах крупных спутников (например, в Галилеевой системе у Юпитера) также имеет место прогрессивное увеличение расстояний между орбитами, но численные формулы для них иные; а

существование протопланет не подтверждается ни для планет, ни, тем более, для спутников. Физический механизм осреднения, предложенный О.Ю. Шмидтом, должен был влиять на размеры орбит. Но, как показывают современные численные расчеты аккумуляции планетезималей, помимо этого на расстояния между финальными орбитами тел влияет размер их зон питания. Эти зоны тем шире, чем больше дисперсия скоростей планетезималей, пропорциональная кубическим корням из масс крупных тел; такую же зависимость имеют радиусы сфер тяготения планет. Ширина зон пропорциональна размерам сфер тяготения планет: для устойчивости системы промежутки между их орбитами должны в несколько раз превышать радиусы их сфер тяготения (сфер Хилла), в свою очередь пропорциональные расстоянию от центрального тела (Солнца, Юпитера и т.п.). Отсюда и прогрессивное увеличение промежутков между орбитами. При этом имеются в виду круговые орбиты крупных финальных тел. Ни для малых спутников, ни для астероидов и комет не существует никаких «законов расстояний». В числовом виде «закон Тициуса–Боде» следует рассматривать лишь как эмпирическую закономерность для Солнечной системы. Если же обратиться к массивным экзопланетам с их вытянутыми орбитами, то для них

■ УСТАРЕВШИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

явно не могут существовать закономерности типа «закона планетных расстояний», так как при наличии нескольких крупных тел на эксцентричных орбитах их взаимные возмущения будут постоянно менять конфигурацию системы.

Во второй половине XX в. устарела весьма популярная в прошлом гипотеза Ольберса (1805 г.) о происхождении астероидов в результате взрыва одной планеты – Фаэтон. Согласно «закону планетных расстояний» такая планета должна была обращаться по орбите между Марсом и Юпитером, на расстоянии 2.8 а.е. Страсти вокруг этой гипотезы кипели и в XX в. и даже в начале века нынешнего.

На основе многочисленных и разносторонних исследований, специалисты по изучению астероидов отвергли как саму гипотезу Ольберса, так и ее более поздние модификации. Это отражено в фундаментальных международных монографиях [Asteroids, 1979–2003]. Возражения против гипотезы разрыва единой планеты следующие.

а) Орбиты тысяч астероидов, обращающихся в поясе от 2 до 4 а.е. от Солнца, пересекаются в столь удаленных друг от друга участках пространства, что это свидетельствует против их происхождения из единого тела. На этом фоне выделяются немногочисленные семейства астероидов (например более 50 астероидов семейства Коронид), у которых почти совпадают элементы орбит (a, e, i) и химический состав. Каждое из семейств действительно произошло при разрушении более крупного астероида, столкнувшегося с себе подобным (у Коронид, по оценкам, было родительское тело с поперечником около 90 км).

б) В науке неизвестен источник энергии, который мог бы изнутри разорвать планету земного типа и разбросать ее фрагменты на орбиты астероидов. Некоторые сторонники гипотезы Ольберса считают даже лунные кратеры продуктами ударов этих фрагментов. Но ударные кратеры, подобные лунным, наблюдаются на всех твердых поверхностях тел Солнечной системы, от Меркурия, спутников Марса и астероидов до очень удаленных систем спутников Урана и Нептуна. Повсеместную кратерную бомбардировку уж точно нельзя приписать разрыву одной гипотетической планеты Фаэтон! Изучена интенсивность образования кратеров всех размеров в зависимости от времени. Найдено, что 4 млрд. лет назад удары тел происходили примерно в миллиард раз чаще, чем

в современную эпоху. Естественно связать это с вычерпыванием остатков планетезималей. Сейчас ударные кратеры образуются при выпадении астероидов, комет и их фрагментов – крупных метеоритов.

в) В поясе астероидов (от 2 до 4 а.е.) наблюдается закономерное изменение их химического состава по мере удаления от Солнца: от S-типа (более светлые и плотные каменные астероиды) на более близких орбитах, к C-типу (более темные и менее плотные астероиды) на более удаленных орбитах. Их аналогами среди метеоритов считаются обыкновенные хондриты для S-типа и углистые хондриты для C-типа. Данное разделение, конечно, не исчерпывающее, спектроскопически изучены многие иные разновидности астероидов, исследовано происхождение связанных с ними типов метеоритов. Но никакая химическая зональность в поясе астероидов не совместима с их происхождением из одного планетного тела.

г) О.Ю. Шмидт [1954] предложил естественное объяснение отсутствию единой планеты между Марсом и Юпитером. Рост Юпитера был ускорен за счет более крупных планетезималей его зоны, включавших помимо силикатов большую примесь льдов. Возмущения Юпитера не позволили каменным планетезималам соседней зоны вырасти в одну планету, так как дисперсия их скоростей превысила порог, когда малые тела при столкновениях объединяются, – вместо этого они разрушают друг друга. В монографии [Asteroids, 1979] ее главный редактор Т. Герелс среди важнейших вех в изучении астероидов отмечает даже не публикацию О.Ю. Шмидта 1954 г., а его работу 1944 г., когда он впервые выдвинул свою теорию происхождения планет и астероидов, сделавшую ненужной гипотезу о взрыве планеты Фаэтон [Шмидт, 1944].

д) Наличие пояса Эджворта–Койпера на расстояниях 35–50 а.е. от Солнца никак не связано с разрывом крупного тела, между тем это еще один «астероидный пояс», где обращаются тысячи тел и где не сформировалась единая планета.

К устаревшим гипотезам относилась также уже подзабытая гипотеза вулканического происхождения лунных кратеров. Ее поддерживали в основном геологи, которые настаивали на аналогии лунных кратеров с земными вулканическими структурами – кальдерами и маарами. В доказательство проводились специальные экспедиции в вулканические области и издавались роскош-

ные фотографические атласы, свидетельствующие о внешнем сходстве земных и лунных кольцевых образований. Сомнения в ударном происхождении лунных кратеров и круглых морей прекратились лишь после того, как на космических снимках 1970-х годов были обнаружены кратеры на столь малых телах, как, например, Фобос. Ясно, что у малого холодного каменистого тела с наибольшим диаметром 25 км не мог образоваться вулкан с поперечником 10 км, как у кратера Стикни на Фобосе. К тому времени теория ударных процессов была уже вполне развита, с ее помощью рассчитываются распределения масс и скоростей ударявших тел («импакторов»), оценивается прочность планетных тел. Кратерная летопись на по-

верхностях тел служит верным источником оценки относительного возраста участков поверхностей, на ее основе рассчитывается современная астероидная опасность для Земли. С другой стороны, изучается и вулканическая деятельность на планетных телах. На поверхности лунных морей наблюдаются невысокие уже потухшие вулканические конусы, на Марсе – огромные потухшие вулканы и т.п. Наиболее впечатляет открытие действующих вулканов на спутнике Юпитера Ио и позднее – на спутнике Сатурна Энцеладе. Вулканическая деятельность на Ио была заранее предсказана! [Peale et al., 1979]. Это свидетельствует о глубоком понимании природы небесных тел специалистами-планетологами.

Отметим некоторые яркие предсказания, сделанные во второй половине XX столетия.

1. Пояс тел Эджворта-Койпера за орбитой Нептуна на расстояниях 35–50 а.е. от Солнца (1950-е годы).

2. Азотный состав атмосферы Титана (1970-е годы). До пролетов космических аппаратов «Вояджер» и «Кассини» в 1980-е

годы наблюдения показывали наличие только линий метана в атмосфере Титана.

3. Возможность вулканической деятельности на Ио (1979 г., за несколько недель до ее обнаружения с помощью аппарата «Вояджер-1»).

4. Выпадение кометы Шумейкеров–Леви–9 на невидимую сторону Юпитера – было заранее предсказано и наблюдалось многими обсерваториями мира в 1994 г.

УДАЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ В ПЛАНЕТОЛОГИИ И КОСМОГОНИИ XX В.

В рамках стандартной небулярной схемы остается множество нерешенных проблем. Изучаются сценарии роста конкретных тел, с весьма различающимися условиями, деталями и последствиями. Вот лишь некоторые из этих различий.

Во всех сценариях предполагается сходство химического состава допланетного диска и Солнца, т.е. более 98% газов водорода и гелия и около 1,5% всех остальных элементов. Это означает, что первоначальная масса диска была в несколько раз больше суммарной массы всех нынешних тел планетной системы. Было введено понятие «минимальная масса» – около 1% от массы Солнца, когда к современной массе планет, спутников, астероидов и пр. (0,13% массы Солнца) добавлены недостающие водород и гелий. Однако было установлено, что реальная начальная масса диска скорее всего превышала «минимальную массу» в 5–10 раз. К такому выводу приводят расчеты роста удаленных планет Уран и Нептун, а также оценки массы твердых тел, выбрасываемых возмущениями планет-гигантов за пределы Солнечной системы. Трудностей с избавлением от излишков газов из протяженных дисков, как в случае

гипотетических протопланет, по-видимому, не возникает. Наблюдения показывают, что газовая составляющая околозвездных дисков диссипирует из них за десятков миллионов лет. Известен и действующий механизм: ультрафиолетовое и корпускулярное излучение молодых звезд.

Начальная масса влияет на P,T-условия в диске и на химический состав газовой и твердой компоненты. Для построения моделей тел Солнечной системы весьма важна последовательность конденсации различных тугоплавких и летучих соединений в диске. В последние годы в работах отечественных ученых достигнуты заметные успехи в комплексном физико-химическом подходе к изучению эволюции протопланетного вещества [Дорофеева, Макалкин, 2004; Кусков и др., 2008].

Развитие гравитационной неустойчивости в газопылевом диске с участием газовой и пылевой компонент возможно, но лишь в достаточно массивных дисках, с массами не менее 30% массы центрального тела. Это намного превосходит диапазон масс для протопланетного облака. Поэтому реально можно говорить о гравитационной неустойчивости только в пылевом субдиске. Осуществление этого

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ПЛАНЕТНОЙ КОСМОГОНИИ

процесса очень сложно из-за относительных движений пыли и газа [Кусков и др., 2008]. Численное моделирование [Tanga et al., 2004] показало, что даже при достижении критической плотности в субдиске первичные пылевые сгущения могут не только разрастаться и уплотняться, но и вновь рассеиваться. Проблема требует дальнейшего изучения.

Всегда считалось, что планетезимали могут образоваться не только из первичных сгущений, но и путем прямого роста из мелкой пыли. Пока что эта идея не подтверждается экспериментально. Существует нерешенная проблема роста твердых частиц и тел в диапазоне размеров от 1 см до 1 км [Pater, Lissauer, 2004].

Рост крупных тел, способных стать зародышами планет, может идти различными путями. Еще в работе [Сафронов, 1969] было показано, что крупнейшее тело «отрывается» в росте от следующего за ним по причине большего гравитационного сечения. Этот отрыв одного тела получил в западных численных моделях роста планет название «run-away growth», значительно ускоряющий аккумуляцию. Но анализ показал, что «run-away» (обгон) эффективен лишь на определенном начальном этапе роста, а затем идет так называемый упорядоченный рост, когда растут не только самые большие тела. Во время такого роста устанавливается степенное («иерархическое») распределение масс тел [Витязев и др., 1990]. Еще один вид роста планет получил название «олигархического» [Kokubo, Ida, 1998]. Здесь опережающий рост происходит параллельно у нескольких крупнейших тел, но их образуется раз в 10 больше, чем имеющих планет, они должны в конечном счете столкнуться друг с другом и объединиться в небольшое число планет. Расчеты однако показали, что в «олигархической» модели невозможно образовать планеты Уран и Нептун за все время существования Солнечной системы [Thommes et al., 2003].

Выброс планетезималей на отдаленную периферию планетной системы [Safronov, 1972], а также миграция планет в процессе роста [Ипатов, 2000] и образование Урана и Нептуна в приемлемые сроки требуют дальнейшего исследования.

В настоящее время нет единого мнения о способе образования Луны. В коллективной

монографии [Origin ..., 1986] дано такое резюме: «Мы должны прийти к выводу, что около $4.5 \cdot 10^9$ лет назад обедненная летучими и железом Луна обращалась в прямом направлении вокруг Земли на расстоянии примерно 10 ее радиусов, а наклон ее орбиты к земному экватору был около 10° . Почти все согласны, что такая стадия существовала; но нет согласия в вопросе, как это возникло». Можно добавить, что на предыдущей стадии вокруг Земли должен был обращаться диск рассеянного вещества с требуемыми физическими и химическими свойствами. Разногласия связаны с происхождением диска. В модели Шмидт–Сафронова диски постепенно образуются вокруг планет как сопутствующий их росту процесс – так называемая коаккреция [Рускол, 1975, 2006; Safronov et al., 1986]. Для Луны (и только для нее!) предложен и детально разработан иной, катастрофический вариант [Origin ..., 2000]. Массивный протолунный диск образуется при мегаимпакте – ударе в земную мантию крупного допланетного тела с массой вдвое большей массы Марса. Удары тел меньшего масштаба (с массой Луны или астероида) не могут образовать подобный диск [Stevenson, 1987]. В случае мегаимпакта более приемлем «олигархический» вариант роста в зоне планет земной группы. Но для всех остальных (свыше 100) спутников планет образование путем мегаимпактов неприемлемо, для них возможна только коаккреция [Canup, Ward, 2002; Рускол, 2006; Кусков и др., 2008]. Луна не может быть исключением из общего правила формирования спутников. Проблема состоит в том, может ли только коаккреция обеспечить необходимую массу протолунного диска, или все же нужен мегаимпакт для вбрасывания в диск преобладающей массы вещества. В обзорной статье В.В. Адушкина и А.В. Витязева [2007] отмечено, что сейчас существуют только три не маргинальных варианта образования системы Земля–Луна: коаккреция, мегаимпакт либо их синтетический вариант.

Приблизить решение этой проблемы может детальное изучение всех ступеней роста самих планет – как менялось в ходе процесса распределение масс, размеров и состава допланетных тел во всем огромном диапазоне – от первоначальных «межзвездных» частичек до тел планетарного масштаба.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен А.И. Еремеевой и А.В. Козенко за идею написания исторического очерка на данную тему, А.Б. Макалкину за помощь в работе и Р.Л. Мишиной за ценные замечания, Т.Г. Мишуковой за работу с иллюстрациями.

- Адушкин В.В., Витязев А.В. Происхождение и эволюция Земли: современный взгляд // Вестн. РАН. 2007. Т. 77, № 5. С.396–402.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Вопросы космогонии / Отв. ред. Б. В. Кукаркин. М.: Изд-во АН СССР. Т. I, 1952; Т. II, 1954; Т. III, 1954; Т. IV, 1955; Т. V, 1957; Т. VI, 1958; Т. VII, 1960; Т. VIII, 1962; Т. IX, 1963; Т. X, 1964.
- Гуревич Л.Э., Лебединский А.И. Об образовании планет. I, II, III // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1950. Т. 14, № 6. С.765–799.
- Дорофеева В.А., Макалкин А.Б. Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: УРСС, 2004. 264 с.
- Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. М.: УРСС, 2000. 318 с.
- Кусков О.А., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б. Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: Издательство ЛКИ / URSS. 2008. (В печати).
- Левин Б.Ю. О расстояниях и массах планет // Вопросы космогонии. 1960. Т. 7. С.55–58.
- Левин Б.Ю. Происхождение Земли и планет. 4-е изд. М.: Наука, 1964. 116 с.
- Рузмайкина Т.В., Маева С.В. Исследование процесса формирования Солнечной туманности // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. С. 212–227.
- Рускол Е.А. К вопросу об образовании протопланет // Вопросы космогонии. 1960а. Т. 7. С.8–14.
- Рускол Е.А. О происхождении Луны. I // Астрон. журн. 1960б. Т.37. N4. С.690–702; II // Астрон. журн. 1963. Т. 40, № 2. С.288–296.
- Рускол Е.А. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
- Рускол Е.А. Происхождение спутников Юпитера и Сатурна в аккреционных дисках // Астрон. вестн. 2006. Т. 40. С.499–504.
- Сафронов В.С. О росте планет в протопланетном облаке // Астрон. журн. 1954. Т. 31, № 6. С.499–510.
- Сафронов В.С. О гравитационной неустойчивости в плоских вращающихся системах с осевой симметрией // Докл. АН СССР. 1960а. Т. 130, № 1. С.53–56.
- Сафронов В.С. К вопросу об образовании и эволюции протопланетных пылевых сгущений // Вопросы космогонии. 1960б. Т. 7. С.121–141.
- Сафронов В.С. Частный случай решения уравнения коагуляции // Докл. АН СССР. 1962а. Т. 147, № 1. С. 64–67.
- Сафронов В.С. О дисперсии скоростей во вращающихся системах гравитирующих тел с неупругими столкновениями // Вопросы космогонии. 1962б. Т. 8. С.168–179.
- Сафронов В.С. Размеры наибольших тел, падавших на планеты в процессе их образования // Астрон. журн. 1965. Т. 42, № 6. С.1270–1276.
- Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с. Англ. пер.: *Safronov V.S. Evolution of the protoplanetary cloud and the formation of the Earth and the planets.* Washington: NASA TTF 677, 1972. 206 p.
- Сафронов В.С., Рускол Е.А. О гипотезе турбулентности в протопланетном облаке // Вопросы космогонии 1957. Т. 5. С.22–46.
- Труды I совещания по вопросам космогонии, 16–19 апреля 1951 г. / Ред. И.Г. Петровский. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 373 с.
- Фридман А.М. [Из предисловия] // Избранные труды В.С. Сафронова. М.: ОИФЗ РАН, 2002. Т. 1. С. 4–5.
- Шмидт О.Ю. Метеоритная теория происхождения Земли // Докл. АН СССР. 1944. Т. 45, № 6. С.245–249.
- Шмидт О.Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 70 с.; 2-е изд. (доп.). 1950. 95 с.; 3-е изд. (доп.). 1957. 140 с.
- Шмидт О.Ю. О происхождении астероидов // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96, № 3. С. 449–452.
- Asteroids* / Ed. T. Gehrels. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1979.
- Asteroids II* / Eds. R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1989.
- Asteroids III* / Eds. W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R.P. Binzel. Tucson: Univ. Ariz. Press, 2003.
- Beckwith S.V.W., Sargent A.I., Chini R.S., Guesten R. A survey for circumstellar disks around young stellar objects // Astron. J. 1990. Vol. 99. P.924–945.
- Brush S.G. Theories of the origin of the solar system 1956–1985 // Rev. Mod. Phys. 1990. Vol. 62, N 1. P.43–112.
- Canup R.M., Ward W.R. Formation of the Galilean satellites: conditios of accretion // Astron. J. 2002. Vol. 124. P. 3404–3423.
- Edgeworth K.E. The origin and evolution of the Solar system // Month. Not. Roy. Astr. Soc. 1949. Vol. 109, N 5. P.600–609.
- Kaula W.M. Book review: «The Origin...» // Icarus. 1996. Vol. 123. P. 584.
- Kokubo E., Ida S. Oligarchic growth of protoplanets // Icarus. 1998. Vol. 131. P. 171–178.

- Lissauer J.J., Safronov V.S.* The random component of planetary rotation // *Icarus*. 1991. Vol. 93, N 2. P.260–271.
- Lissauer J.J., Stevenson D.J.* Formation of giant planets // *Protostars and Planets V* / Eds. B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. Tucson: Univ. Ariz. Press, 2007. P. 591–606.
- On the origin of the Solar system* / Ed. H. Reeves (Nice Symp.) Paris: CNRS, 1972. Рус. пер.: Происхождение Солнечной системы. М.: Мир, 1976.
- Origin of the Earth and Moon* / Eds. R.M. Canup, K. Righter. Tucson: Univ. Ariz. Press. Sp. Sci. Series, 2000. 555 p.
- Origin of the Moon* / Eds. W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1986. 781 p.
- Pater I., de, Lissauer J.J.* Planetary Sciences. Cambridge: Univ. Press, 2004. 528 p.
- Peale S.J., Cassen P., Reynolds R.T.* Melting of Io by tidal dissipation // *Science*. 1979. Vol. 203. P.892–894.
- Protostars and Planets* / Ed. T. Gehrels. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1978. Рус. пер.: Протозвезды и планеты. В 2 ч. М.: Мир, 1982. 870 с.
- Protostars and Planets II* / Eds. D.C. Black, M.S. Matthews. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1985.
- Protostars and Planets III* / Eds. E.H. Levy, J.I. Lunine. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1993.
- Protostars and Planets IV* / Eds. V. Mannings, A.P. Boss, S.S. Russell. Tucson: Univ. Ariz. Press, 2000.
- Protostars and Planets V* / Eds. B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. Tucson: Univ. Ariz. Press, 2007.
- Safronov V.S.* Ejection of bodies from the solar system in the course of the accumulation of the giant planets and the formation of the cometary cloud // *The motion, evolution of orbits and origin of comets* / Eds. G.A. Chebotarev, E.I. Kazimirchak-Polonskaya, B.G. Marsden. Dordrecht: Reidel, 1972. P.329–334.
- Safronov V.S., Pechernikova G.V., Ruskol E.L., Vitjazev A.V.* Protosatellite swarms // *Satellites* / Eds. J.A. Burns, M.S. Matthews. Tucson: Univ. Ariz. Press, 1986. P. 284–296.
- Stevenson D.J.* Origin of the Moon – the collision hypothesis // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 1987. Vol. 15. P. 271–315.
- Tanga P., Weidenschilling S.J., Michel P., Richardson D.C.* Gravitational instability and clustering in a disk of planetesimals // *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 427. P.1105–1115.
- The origin of the Solar system. Soviet Research 1925–1991* / Eds. A.E. Levin, S.G. Brush. N.Y.: Amer. Inst. of Physics, 1995. 415 p.
- Thommes E.W., Duncan M.J., Levison H.F.* Oligarchic growth of giant planets // *Icarus*. 2003. Vol. 161. P. 431–455.
- Yin Q., Jacobsen S.B., Yamashita K. et al.* Short timescale for terrestrial planet formation from Hf–W chronometry of meteorites // *Nature*. 2002. Vol. 418. P.949–952;
- Kleine T., Muenker C., Mezger K., Palme H.* Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planet from Hf–W chronometry // *Nature*. 2002. Vol. 418. P.952–955.

СВЕДЕНИЯ РУСКОЛ Евгения Леонидовна

ОБ АВТОРЕ доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская,
д. 10. Тел.: 254-90-06. E-mail: evgeniar177@yandex.ru

ORIGIN OF THE EARTH: EVGENIA L. RUSKOL
THEORY OF THE 2-ND HALF OF
XX CENTURY AND THE BEGINNING
OF XXI CENTURY
Schmidt Institute of Physics of
the Earth, Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russia

Abstract The theory of the Earth' formation is reviewed since the middle of XX century toward its contemporary state. The present picture of the origin of planets is based on the classic nebular hypothesis by Kant and Laplace. The understanding of main processes in the early Solar system is now enormously enriched grace to achievements in astrophysics, comparative planetology, Earth sciences and space research. The important role is mentioned of Russian scientists in the elaboration of a «standard» model of the origin of the Earth and planets.